

UNIVERSIDADE DO PLANALTO CATARINENSE – UNIPLAC
UNIVERSIDADE DO CONTESTADO – UNC
UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS PRODUTIVOS -
PPGSP

LUCAS FOGAÇA DE SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FORNOS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

LAGES/SC
2024

LUCAS FOGAÇA DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FORNOS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

Dissertação de Mestrado, vinculada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP em forma associativa entre UNIPLAC, UNC, UNESC e UNIVILLE, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre(a) em Sistemas Produtivos.

Orientador(a): Prof(a) Dr(a) Leopoldo Pedro Guimarães Filho

Coorientador(a): Prof(a) Dr(a) Elisabeth Wisbeck

LAGES/SC
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha Catalográfica

S729d

Sousa, Lucas Fogaça de

Desenvolvimento de sistemática para avaliação da eficiência energética em fornos de revestimentos cerâmicos / Lucas Fogaça de Sousa ; orientador Dr. Leopoldo Pedro Guimarães Filho ; coorientadora Dra. Elisabeth Wisbeck. – 2024.

91 f. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Sistemas Produtivos) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense ; Universidade do Contestado ; Universidade do Extremo Sul Catarinense ; Universidade da Região de Joinville. Lages, SC, 2024.

1. Fornos - Consumo de combustível. 2. Planejamento - Projeto experimental. 3. Revestimentos cerâmicos - Processos. I. Guimarães Filho, Leopoldo Pedro (orientador). II. Wisbeck, Elisabeth (coorientadora). III. Universidade do Planalto Catarinense. IV. Universidade do Contestado. V. Universidade do Extremo Sul Catarinense VI. Universidade da Região de Joinville. VII. Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos. VIII. Título.

CDD 658.5

Catálogo na fonte – Biblioteca Central

FOLHA DE APROVAÇÃO
LUCAS FOGAÇA DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM FORNOS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a **Dissertação** apresentada no Programa de Pós-Graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP, Linha de Pesquisa 2 – Sistemas Produtivos e Sustentabilidade, em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, a Universidade do Contestado – UNC, a Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e a Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Sistemas Produtivos**.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Leopoldo Pedro Guimarães Filho - UNESC
Presidente da Banca / Orientador

Profa. Dra. Elisabeth Wisbeck - UNIVILLE
Coorientadora

Profa. Dra. Elaine Virmond - PPGES/UFSC
Membro externo da banca

Prof. Dr. Jacir Favretto – UNC
Membro interno da banca

Lages, SC, 15 de outubro de 2024

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha esposa Caroline de Oliveira que me apoiou ao longo de toda essa caminhada

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos dons recebidos que me permitiram construir essa pesquisa

Aos meus pais pelo exemplo de vida, sem vocês não teria chegado até aqui. A minha esposa Caroline que esteve comigo ao longo dessa caminhada.

Agradeço a equipe do setor de fornos que auxiliaram durante os testes experimentais em campo.

Agradecimentos institucionais:

- À Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, a Universidade do Contestado – UNC, a Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e a Universidade da Região de Joinville - UNIVILLE;

- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

Agradeço a FAPESC, Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação de Santa Catarina pelo apoio na realização da pesquisa.

RESUMO

SOUSA, Lucas Fogaça de. **DESENVOLVIMENTO DE SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FORNOS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**. 2024, 91 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Produtivos). Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, da Universidade do Contestado – UNC, da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Lages, 2024.

O Brasil é um país referência na produção de revestimentos cerâmicos sendo o país o terceiro maior produtor e consumidor do mundo. A maior parte da produção está dividida em dois polos, sendo um localizado no interior de São Paulo e o outro localizado no Sul de Santa Catarina. O Setor é caracterizado pela alta demanda de energia, principalmente térmica, para realizar suas operações. Onde a sua maior parte é gerada pela queima de combustíveis fósseis, principalmente o gás natural. Esse consumo eleva as emissões de gases do efeito estufa na atmosfera impactando a região ao entorno das fábricas e ao mesmo tempo se apresenta como um dos maiores custos para o processo. Nesse cenário o maior consumidor de energia do processo é o forno a rolo, responsável pela queima das placas cerâmicas. Assim é importante para o setor estudar como é possível obter o ponto ótimo de rendimento desses equipamentos. Dessa forma o objetivo geral do trabalho foi elaborar uma sistemática de avaliação da eficiência energética para forno cerâmico mono estrado a rolo. Ao longo do trabalho foram realizadas variações em três variáveis de processamento e avaliados os impactos no consumo de combustível e no produto final, as condições de operação seguiram a metodologia do delineamento composto central rotacional (DCCR) para otimizar o experimento. A partir dos dados foi observado que é necessária uma demanda adequada do ar de combustão, sendo valores muito baixos prejudiciais para o rendimento equipamento pela geração de CO na atmosfera interna. Por outro lado, muito elevados reduzem a temperatura de chama o que causa um aumento na demanda de combustível para manter a temperatura desejada. Quanto a temperatura do ar de combustão foi identificada que quanto maior a temperatura menor a vazão de combustível e quanto maior a exaustão da chaminé menor o consumo de gás. Foi identificado com base no planejamento DCCR a melhor condição de operação do equipamento e comparada essa condição com a condição inicial do equipamento. Essa comparação gerou uma economia de 11% no consumo específico de energia térmica do equipamento, medido kcal/kg. Foram identificados parâmetros de operação que indicam que se o equipamento está operando dentro dos parâmetros desejados de forma rápida e eficiente, facilita assim a manutenção da melhor condição de operação. Com base nessa metodologia é possível replicar o resultado em outros fornos contribuindo assim para a redução do consumo de combustíveis fósseis no setor cerâmico. Fica aberta a proposta de avaliar outras variáveis do equipamento quanto a sua relação com a eficiência energética tais como variação na curva de queima e fluxos de ar no resfriamento.

Palavras-chave: Combustível, otimização, planejamento experimental

ABSTRACT

SOUSA, Lucas Fogaça de. **DESENVOLVIMENTO DE SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FORNOS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**. (2024), 91 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Produtivos). Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos – PPGSP em forma associativa entre a Universidade do Planalto Catarinense – UNIPLAC, da Universidade do Contestado – UNC, da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC e da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, Lages, 2024.

Brazil is a reference country in the production of ceramic tiles, being the third largest producer and consumer in the world. Most of the production is divided into two poles, one located in the interior of São Paulo and the other located in the south of Santa Catarina. The Sector is characterized by the high demand for energy, mainly thermal, to carry out its operations. Where most of it is generated by burning fossil fuels, mainly natural gas. This consumption increases greenhouse gas emissions into the atmosphere, impacting the region surrounding the factories and, at the same time, represents one of the highest costs for the process. In this scenario, the biggest energy consumer in the process is the roller kiln, responsible for firing the ceramic tiles. Therefore, it is important for the sector to study how it is possible to obtain the optimal performance point of these equipment. In this way, the general objective of this work is to elaborate an energy efficiency evaluation system for a single roller platform ceramic kiln. Throughout the work, variations were made in three processing variables and the effects on fuel consumption and on the final product were evaluated, the operating conditions followed the methodology of the rotational central composite design (DCCR) to optimize the experiment. From the data it was observed that an adequate demand for combustion air is necessary, with very low values being detrimental to the performance of the equipment because of the formation of CO in the interior atmosphere. On the other hand, high air values decrease the flame temperature, this causes the fuel demand to increase for keeping the needed temperature. About the combustion air temperature, it was identified that the higher its temperature the lower was the fuel demand. And about the chimney exhaustion the higher it was the lower was the fuel consumption. Based on the DCCR it was identified the best operation condition of the equipment and compared with the standard condition. This comparison has show a economy of 11% of the specific thermal energy consumption in the kiln measured in kcal/kg. There were identified operational parameters that shows if the equipment is operating within the desired parameters in a fast and efficient way, making easy the maintenance of the best operational condition. Based on this methodology it is possible to replicate this results in other kilns giving support for the reduction of fossil fuel consumption on the ceramic sector. It's open the proposal to evaluate other equipment variables about the relation with the energy efficiency, such as the firing curve and the air fluxes on the colling zone.

Key words: Fuel, optimization, experimental planning.

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Relação da Interdisciplinaridade no Estudo	19
Figura 2: Fluxo de atividades do projeto.....	20
Figura 3: Fluxograma processo cerâmico	22
Figura 4: Esquema do forno a rolo	26
Figura 5: Perfil de temperatura durante o resfriamento	27
Figura 6: Distribuição dos uso da energia na indústria do Reino Unido	28
Figura 7: Participação dos consumos elétrico e térmico sobre o consumo energético total.	29
Figura 8: Perdas do processo de queima	31
Figura 9: Mudança nas condições de chama com a variação de ar	36
Figura 10: Esquema do projeto de produção mais limpa.....	39
Figura 11: Localização das principais zonas do forno estudado	41
Figura 12: Ilustração de um módulo do forno.....	43
Figura 13: Esquema de operação do sistema de controle de temperatura.....	44
Figura 14: Curva de queima	46
Figura 15: Representação da bancada teste	49
Figura 16: Relação entre pressão e vazão dos gás no queimador.....	54
Figura 17: Relação entre pressão e vazão dos ar no queimador.....	56
Figura 18: Comparação das pressões internas dos diferentes queimadores variando a vazão de ar.....	56
Figura 19: Relação entre as pressões de ar e gás nos queimadores	58
Figura 20: Variação da vazão volumétrica de ar em função da pressão	59
Figura 21: Variação da vazão mássica de ar em função da pressão	59
Figura 22: Relação estequiométrica das pressões de ar e gás em diferentes temperaturas.....	60
Figura 23: Relação da rotação chaminé com a sua vazão	61
Figura 24: Superfícies de resposta do consumo de gás em função das variáveis críticas.....	63
Figura 25: Variação vazão mássica de ar	65
Figura 26: Variação da relação ar x gás em função da pressão de ar e temperatura do ar.....	66
Figura 27: Variação da temperatura da entrada do forno em função da pressão de ar e da rotação da chaminé.....	67
Figura 28: Potência térmica dos queimadores.....	69

Figura 29: Variação da temperatura do Módulo 2 em função da vazão de ar e da temperatura do ar de combustão.....	69
Figura 30: Comparação dos resultados do consumo de gás com a pressão interna do forno ...	70
Figura 31: Variação da Concentração de O ₂	72
Figura 32: Variação do Percentual de CO em função das variáveis críticas.....	73
Figura 33: Variação de CO ₂ em função das Variáveis Rotação da Chaminé e Pressão de ar dos queimadores	75
Figura 34: Variação da Absorção de Água com a Pressão de ar dos queimadores e a Temperatura de ar de Combustão	77
Figura 35: Resultado do teste de longa duração	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reações do processo de queima	24
Tabela 2: Comparação dados das Chaminés de Entrada.....	33
Tabela 3: Planejamento fatorial 2^3 , tipo estrela com ponto central (DCCR).	51
Tabela 4: Comparação das Condições de Operação	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DCCR – Delineamento composto central rotacional

ODS – Objetivos de desenvolvimento Sustentável

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA	17
1.3.1 Inserção social esperada	17
1.4 CARACTERIZAÇÃO INTERDISCIPLINAR E ADERÊNCIA AO PROGRAMA 18	
2 PANORAMA TEÓRICO.....	21
2.1 O Setor de revestimentos cerâmicos no brasil.....	21
2.2 O PROCESSO CERÂMICO	21
2.2.1 A operação de queima de revestimentos cerâmicos.....	23
2.2.2 Forno mono estrado a rolo.....	25
2.3 O USO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA.....	28
2.4 Uso de energia no processo cerâmico	28
2.5 AVALIAÇÃO DO PERFIL ENERGÉTICO DO PROCESSO DE QUEIMA 30	
2.6 CARACTERÍSTICAS DA CORRENTE DE ASPIRAÇÃO DA CHAMINÉ 33	
2.7 CORRENTE DO AR DE COMBUSTÃO	34
2.8 AVALIAÇÃO DA CORRENTE DE ASPIRAÇÃO DO RESFRIAMENTO 37	
2.9 Produção mais limpa.....	38

3	METODOLOGIA DA PESQUISA	41
3.1	Materiais	41
3.1.1	Descrição do forno	41
3.2	Procedimento experimental	47
3.2.1	Aplicação do planejamento experimental nas variáveis críticas	48
3.2.2	Teste de longa duração	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1	Relação entre pressão e vazão de ar e gás nos queimadores	54
4.1.1	Avaliação do Impacto da variação da temperatura do ar	58
4.2	Avaliação do planejamento DCCR	62
4.3	avaliação da atmosfera interna do equipamento	71
4.4	Avaliação da estabilidade do produto	76
4.5	Indicadores de desempenho.....	78
4.5.1	Variáveis controladas	78
4.5.2	Variáveis de Resposta	79
4.6	TESTE DE LONGA DURAÇÃO	79
4.7	APLICABILIDADE DO ESTUDO.....	81
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial com 751 milhões de metros quadrados produzidos de acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. O setor possui cerca de 60 empresas distribuídas em 71 parques fabris, é responsável por 6% do PIB da indústria de material de construção, o que correspondeu a R\$18.924,48 milhões (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, 2024).

O setor é caracterizado por um processo de consumo energético intensivo, isso porque demanda uma quantidade de energia elevada para realizar as transformações necessárias ao material em processo (Branchini et al., 2021). Do total de energia consumida aproximadamente 90% é energia térmica (Alves et al., 2007). Essa energia é usada principalmente em três etapas do processo: a secagem da massa cerâmica em secadores do tipo *spray-driers*, secagem do material após a compactação e pelo processo de queima do produto. (Castro Oliveira et al., 2020).

Distribuindo a demanda de energia térmica por etapa do processo a queima é a que possui maior demanda, representando mais de 50% do total de energia (Alves et al., 2010; Castro Oliveira et al., 2020). O equipamento usado no processo de queima de placas cerâmicas é o forno monoestrado a rolo, ou forno a rolo. Ele opera de modo contínuo aonde as placas cerâmicas se movimentam em seu interior através de uma esteira de rolos de porcelana (Vieira, 2002). Ao longo do processo o material é submetido a elevadas temperaturas que podem chegar até 1220 °C para que se consolidem as propriedades desejadas do produto final (Cargnin, 2010).

A geração dessa energia vem principalmente da queima de gás natural, composto na sua maioria por metano (CH₄) (Ferrer et al., 2019). Existem empresas que substituem parte do gás natural por outros combustíveis fósseis como carvão (Castro Oliveira et al., 2020). Esse fato torna o processo cerâmico um grande gerador de emissões de CO₂, contribuindo para o efeito estufa (Boschi et al., 2020; Castro Oliveira et al., 2020; Karellas et al., 2013).

Estudos no campo de eficiência térmica apresentados por Castro Oliveira et. al. (2020), Delpech et. al. (2018) e Ferrer et. al. (2019) apontam a eficiência dos fornos a rolo na ordem de 5% a 20%, sendo o restante da energia gerada desperdiçada. Esses números mostram um campo de estudo vasto para buscar melhorias no processo visando atingir melhores índices de eficiência energética no setor.

Em conjunto com a bandeira de eficiência ambiental aparece o aumento gradual e constante do custo dos combustíveis para a indústria, que pode representar cerca de 20% do

custo total de produção do produto cerâmico (Boschi et al., 2020). Esses fatos posicionam a gestão energética como um foco estratégico das empresas.

A operação de queima na indústria cerâmica é composta de muitas variáveis que impactam tanto no produto final quanto no rendimento energético do equipamento, tais como curva de queima, ciclo de queima, quantidade de ar utilizada na operação, temperatura do ar utilizado, entre outras (Cargnin, 2010; Milani, Montorsi, Stefani, & Venturelli, 2017; Vieira, 2002). Milani et al. (2017) e Ruivo et al. (2021) mostram que ajustes de processo podem ter impacto direto no rendimento do equipamento. Assim é possível buscar melhores condições de operação por meio de ajustes no equipamento.

1.1 PROBLEMA

O consumo de energia térmica é uma necessidade do processo cerâmico, principalmente na etapa de queima, onde ocorrem as reações físico-químicas para dar ao produto as características finais desejadas (Cargnin, 2010). Esse processo impacta na sustentabilidade da operação em nível ambiental, por meio das emissões geradas; em termos econômicos no custo do combustível; e social por meio dos impactos negativos das emissões para a população ao entorno (Boschi et al., 2020).

Assim, há necessidade de o setor cerâmico controlar as operações térmicas com enfoque na melhoria da eficiência energética durante o processo.

Avaliando-se artigos de revisão acerca do tema, foram apresentadas propostas de melhorias ao processo (Castro Oliveira et al., 2020; Christodoulides et al., 2022; Jouhara et al., 2018), porém, não foram apresentados indicadores para realizar o diagnóstico dos equipamentos. Assim, há uma lacuna relativa à avaliação da operação e, com isso, de medidas de controle energético. Dessa forma, a pergunta de pesquisa deste estudo é: Quais os indicadores de eficiência energética para um forno cerâmico mono estrado a rolo?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Elaborar uma sistemática de avaliação da eficiência energética para forno cerâmico mono estrado a rolo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Verificar a relação das variáveis críticas; vazão da chaminé, temperatura do ar de combustão e vazão do ar de combustão com o consumo de energia, por meio de um planejamento experimental;
- Aplicar um planejamento do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR), para buscar o ponto ótimo do processo visando economia no consumo energético;
- Avaliar o produto cerâmico quanto as suas características técnicas (tamanho, curvatura e absorção de água).

1.3 JUSTIFICATIVA

A preocupação com o pilar ambiental da sustentabilidade, aliada ao ODS 7 sobre energias mais limpas reforçam a necessidade do uso eficiente de combustíveis. Ferrer et al.,(2019) realizou um levantamento em fornos cerâmicos que mostrou resultados de eficiência na ordem 15%, Castro Oliveira et al., (2020) apresente levantamentos onde a fração de energia útil variou de 5% a 20%. Esses dados mostram que há oportunidades para melhores resultados sobre consumo eficiente de combustíveis. Associando isso a metodologias de atuação produção mais limpa (P+L) o enfoque para a redução do uso de recursos deve ser foco para empresas que buscam melhorar seus índices de sustentabilidade (Milan et al., 2012).

A base de sustentabilidade dos programas de P+L está apoiada no pilar econômico tanto quanto no ambiental. Nesse contexto Boschi et. al.(2020) cita que aproximadamente 20% do custo de produção de placas cerâmicas é associado ao consumo de combustíveis. Considerando os aumentos recentes no preço do gás natural esse tema ganha maior relevância.

Os fornos são a principal fonte da demanda de energia térmica no processo cerâmico, segundo trabalhos de (Alves et al., 2007; Nasseti et al., 1998) o consumo de gás dos fornos representa mais da metade da demanda de uma linha de produção por via úmida. O que torna o estudo de sua eficiência foco para melhorar o rendimento da unidade de produção. (Jouhara et al., 2018)

1.3.1 Inserção social esperada

O projeto buscou apoiar o desenvolvimento do sistema produtivo cerâmico da região sul de Santa Catarina, elaborando uma base para diagnosticar a condição de eficiência

energética de um forno cerâmico, além de construir métodos para melhorar o consumo de gás natural e demais combustíveis.

A partir dessa proposta foi possível reduzir o consumo de combustível dos fornos a rolo e com isso as emissões geradas no processo melhorando a condição de ar atmosférico nas proximidades das indústrias.

1.4 CARACTERIZAÇÃO INTERDISCIPLINAR E ADERÊNCIA AO PROGRAMA

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) publicou a tabela de áreas do conhecimento, organizada em quatro níveis, sendo: Grande área; Área de avaliação; Subárea; e Especialidade (CAPES, 2020b).

O Programa de Pós-graduação em Sistemas Produtivos (PPGSP), foi aprovado em 2020 na 198ª reunião do Conselho Técnico-Científico da Educação Superior (CTC-ES) da CAPES (UNIPLAC, 2021). O programa é resultado da associação entre quatro universidades comunitárias sendo elas a UNIPLAC, UNC, UNESC e UNIVILLE e está inserido na área de avaliação interdisciplinar, especialidade Engenharia/Tecnologia/Gestão (CAPES, 2020a).

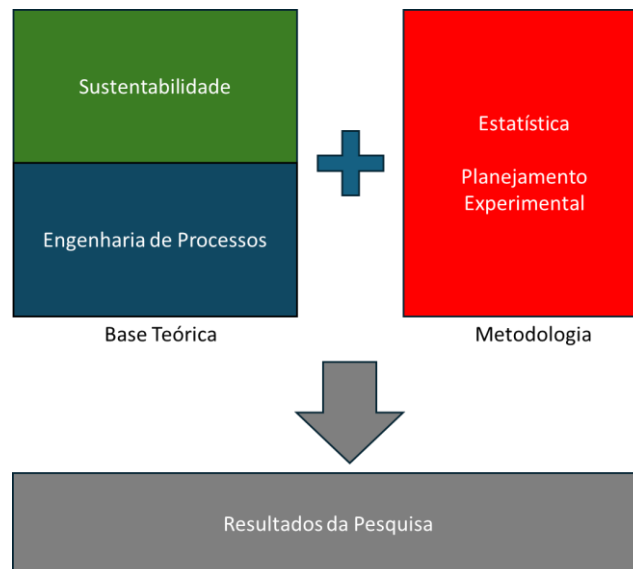
A interdisciplinaridade é a convergência de diferentes áreas de estudo, cada qual com seu estilo e foco buscando contribuir mutuamente com a construção de um novo conhecimento. Essa proposta vê a interdisciplinaridade como um campo de cooperação onde a construção mútua do conhecimento é a peça-chave (Jr. & Fernandes, 2021).

Carneiro (1994) apresenta a interdisciplinaridade como um paradigma metodológico, onde a construção conjunta do conhecimento permite ir além do que cada disciplina individual pode alcançar. Assim o conhecimento disciplinar não é deixado de lado, mas passa a ser uma base de onde é construída a nova proposta, sendo constantemente criticado e apoiado pelas disciplinas pares, elaborando assim uma solução inovadora para o tema estudado (Jr. & Fernandes, 2021).

No presente estudo a interdisciplinaridade está na intersecção das áreas de sustentabilidade com a engenharia de processos para buscar soluções na questão de consumo de combustíveis fósseis no setor cerâmico e redução de emissões atmosféricas provenientes dessa queima. Assim as duas visões trabalharam em conjunto para avaliar o tema. Porém, apenas as duas áreas não foram suficientes para fechar o ciclo, sendo adicionada ao processo a disciplina de estatística vinda da área da matemática para suportar a criação da metodologia empregada no estudo. Essa combinação suportou o avanço do estudo permitindo assim obter os resultados. Essa relação está apresentada na Figura 1.

Figura 1

Relação da Interdisciplinaridade no Estudo



Fonte: Autor, (2024)

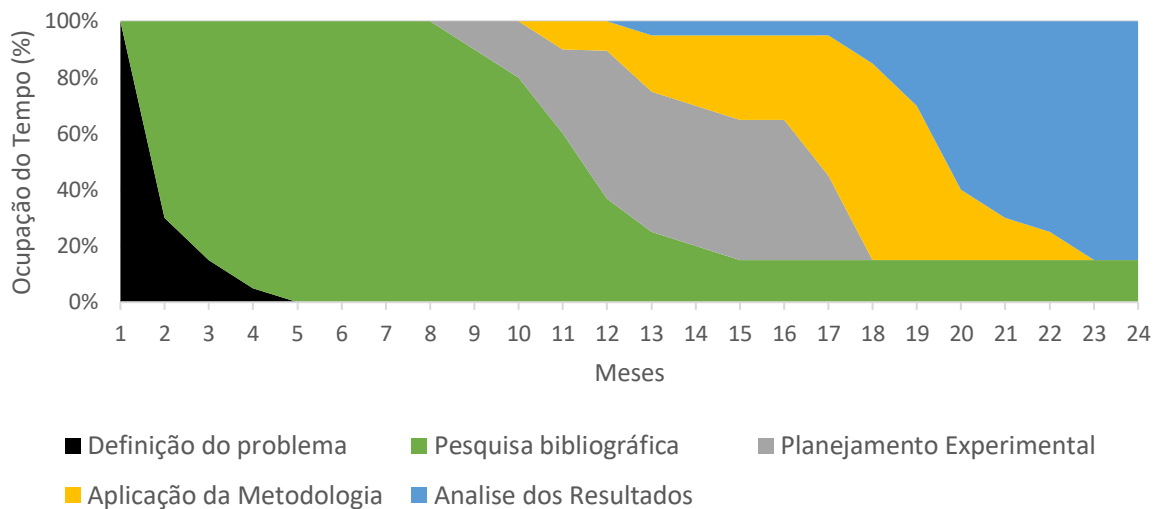
O projeto está inserido na linha de pesquisa 1: Gestão e Conhecimento em Sistemas Produtivos, e estudou a operação de queima na fabricação de revestimentos cerâmicos por meio de intervenções nas variáveis da operação do equipamento, identificando o impacto das mesmas sobre a eficiência energética. Com isso, a proposta buscou construir uma base para otimizar o rendimento do processo e identificar pontos de monitoramento que serviram para diminuir consumo de combustível.

1.5 ESTRUTURA GERAL DO DOCUMENTO

Para alcançar os objetivos propostos no estudo foi seguido o fluxo de atividades do macroprojeto, bem como as demandas de tempo em cada fase, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2

Fluxo de atividades do projeto



Fonte: Autor, (2024)

O estudo iniciou com o levantamento de dados bibliográficos sobre o tema e as propostas de estudos voltadas para o campo de eficiência energética dos fornos. Com base em estudos anteriores sobre fornos, foram levantadas as variáveis utilizadas no estudo. Essas variáveis foram medidas individualmente e com base nos dados obtidos foi elaborado o planejamento de testes para o sistema.

Com a execução dos testes propostos foram verificadas as respostas do equipamento para as variáveis de consumo de gás, variações de pressão e temperatura no interior do equipamento e composição dos gases na saída da chaminé. Por fim, foi realizado um teste de longa duração para comparar o estado inicial do equipamento com a melhor condição encontrada, para confirmar a os resultados obtidos.

2 PANORAMA TEÓRICO

2.1 O SETOR DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS NO BRASIL

De acordo com a (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, 2024) o Brasil é o terceiro maior país produtor de revestimentos cerâmicos, ficando apenas atrás da China e da Índia, em 2023 o país produziu 751 milhões de metros quadrados. Já no ranking de maiores consumidores o Brasil ocupa a terceira colocação ficando atrás apenas da China e da Índia. O setor ceramista está dividido em 62 empresas que juntas possuem 80 parques fabris e 137 marcas diferentes. Sua participação representa 6% do PIB da indústria de materiais de construção, o que representa R\$ 22,9 milhões em 2022. Vale salientar ainda que o setor é o segundo maior consumidor de gás natural do Brasil, indicando a sua relevância para auxiliar a redução de emissões atmosféricas (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, 2024; IBGE, 2024).

O Setor possui dois polos nacionais de produção o maior está localizado no interior de São Paulo, região de Santa Gertrudes, polo historicamente voltado para o processo de via seca, porém está avançando na produção de porcelanatos via úmida. E o segundo é no sul de Santa Catarina, voltado para a produção por via úmida mais focado em porcelanatos (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, 2024; IBGE, 2024).

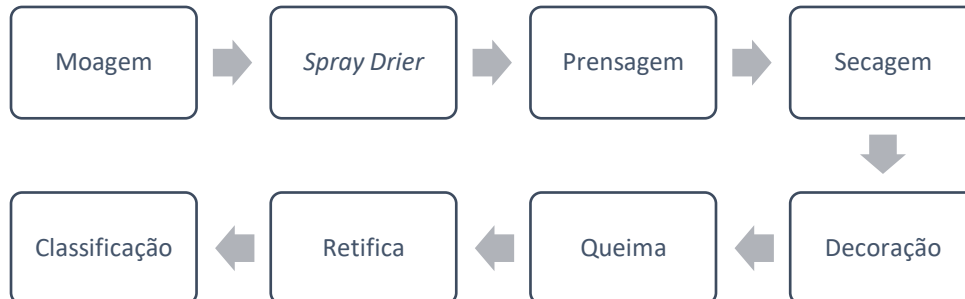
O polo de Santa Catarina se destaca pela produção de revestimentos cerâmicos do tipo Porcelanato. Estes produtos é caracterizam-se por possuir melhores características técnicas, sua principal diferenciação a absorção de água da placa cerâmica que deve ficar abaixo de 0,5%. Devido a isso seu processo é mais caro quando comparado com os demais produtos. Assim o polo necessita um foco em custos de fabricação para se manter competitivo no mercado (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, 2024; IBGE, 2024).

2.2 O PROCESSO CERÂMICO

O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos consiste na mistura de matérias-primas de origem mineral que são processadas para formar uma placa plana de dimensões desejadas. Para se obter esse resultado é realizado o processo conforme a Figura 3. O processo apresentado é conhecido por via úmida, pois utiliza água durante a moagem (Yu et al., 2021).

Figura 3

Fluxograma processo cerâmico



Fonte: adaptado de Ferrer et al. (2019).

O processo se inicia com a etapa de moagem, essa operação ocorre em meio aquoso onde as matérias primas são misturadas e moídas em moinhos de bolas na presença de água. O resultado do processo é uma suspensão de materiais cerâmicos denominada barbotina (Cargnin, 2010; Yu et al., 2021). Existe o processo que não utiliza água nessa etapa trabalhando com moinhos pendulares. Comparando os dois processos o de via úmida entrega uma mistura mais homogênea e grãos mais regulares enquanto a via seca apresenta menor custo energético do sistema. Custo esse associado a etapa de secagem da massa (Cargnin, 2010).

Na sequência ocorre a etapa de Atomização, também chamada de *Spray Drier* aonde a água utilizada no processo de moagem é retirada e o material é granulado. Nessa etapa o produto é um pó granulado com aproximadamente 7% de umidade. A operação do equipamento ocorre em duas etapas, a primeira é a pulverização da suspensão cerâmica na câmara de secagem e depois ocorre a secagem por meio do uso de ar aquecido entre 500 °C e 600 °C. O destaque para esse processo é a capacidade de formar grãos com elevada esfericidade, melhorando o fator de empacotamento no processo de prensagem (Baker & McKenzie, 2005; Mezquita et al., 2017; Roustapour et al., 2009).

O processo seguinte é a prensagem, nessa etapa o pó produzido na etapa anterior é prensado em prensas hidráulicas para obter o formado desejado para o produto final. Esse processo ocorre colocando o pó em cavidades rígidas ou formas e aplicando elevadas pressões (Cargnin, 2010).

Na sequência a umidade mantida no pó atomizado para a compactação precisa ser removida a fim de o produto seguir no processo. Para isso são usados secadores industriais que por meio de ar aquecido reduzem a umidade do produto para valores inferiores a 1%. A etapa

seguinte é a decoração, Essa etapa consiste em aplicar uma cobertura vítrea a placa cerâmica visando entre outros pontos dar o acabamento estético desejado para o produto final (Cargnin, 2010).

A etapa seguinte é a operação de queima ou sinterização onde o produto é exposto a elevadas temperaturas, entre 1200 °C e 1240 °C para porcelanatos, para que ocorram reações físico-químicas que irão consolidar as propriedades desejadas do produto final (Sohrabi Baba Heidary et al., 2018a; Vieira, 2002).

Por fim, o produto pode passar pelo processo de retífica para dar um melhor acabamento lateral ou ser diretamente enviado ao processo de classificação e posterior embalagem (Cargnin, 2010).

2.2.1 A operação de queima de revestimentos cerâmicos

A operação de queima, ou sinterização, de placas cerâmicas é o processo de aquecimento, tratamento térmico e posterior resfriamento do produto. Essa operação ocorre em equipamentos chamados de forno monoestrado a rolo, ou simplesmente forno a rolo (Vieira, 2002).

Durante a etapa de aquecimento ocorrem reações químicas no produto, essas reações estão apresentadas na Tabela 1. Ao longo do processo de aquecimento ocorrem sucessivas perdas de peso no produto caracterizadas por serem inicialmente perda de água residual presente no produto e água de constituição das argilas utilizadas (Cargnin, 2010; Vieira, 2002).

Na sequência ocorrem reações de liberação de dióxido de carbono (CO₂), reações essas que utilizam oxigênio presente na atmosfera do equipamento (Milani, Montorsi, Stefani, Saponelli, et al., 2017). A fonte da geração do CO₂ é a presença de compostos de origem orgânica que estão presentes nas matérias primas da massa cerâmica, esses com a elevação da temperatura são oxidados e liberados em forma de gás. Essa demanda de oxigênio precisa ser suprida por meio ajustes no equipamento, geralmente com a injeção de excesso de ar nos queimadores (Ferrer et al., 2019). Na faixa 700 °C começam a ocorrer a decomposição de carbonatos, onde há novamente liberação de CO₂ seguindo do início da formação de fase vítrea, fase importante para o processo de sinterização (Sohrabi Baba Heidary et al., 2018b; Vieira, 2002).

Tabela 1

Reações do processo de queima

Temperaturas	Transformações	Observações (gás liberado)
Até 150°C	Eliminação da água livre.	Perda de peso; Reação endotérmica; (H ₂ O).
150 a 250°C	Eliminação da água ligada. Decomposição dos hidróxidos de ferro: $\text{Fe(OH)}_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Perda de peso; Endotérmica; (H ₂ O). Perda de peso; Endotérmica; (H ₂ O).
350 a 600°C	Eliminação da água de constituição. Caulinita: 400 a 525°C Ilita: 350 a 600°C	Perda de peso; Endotérmica; (H ₂ O); (H ₂ O).
400 a 600°C	Decomposição da matéria orgânica. $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ $\text{C} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	Perda de peso; Exotérmica; (CO ₂ /CO/H ₂).
573°C	Transformação do quartzo alfa para beta.	Variação de volume; Endotérmica.
700 a 800°C	Início da fusão: - Álcalis - Óxido de ferro	Início da formação de fase vítrea.
700 a 900°C	Decomposição do carbonato de magnésio em dolomitas: $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$	Perda de peso; Endotérmica; (CO ₂).
800 a 1000°C	Decomposição dos carbonatos de cálcio em dolomitas e calcitas: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	Perda de peso; Endotérmica; CO ₂ .
800 a 1000°C	Início da fusão de massas com CaO, Fe ₂ O ₃ , Na ₂ O, K ₂ O.	Formação de fase vítrea.
1060 a 1100°C	Início da fusão dos feldspatos. Cristalização da mulita. Sinterização.	Formação: Fase vítrea Silicatos
573°C	Transformação do quartzo beta para alta.	Variação de volume; Endotérmica.

Fonte: Cargnin, 2010

O processo de sinterização do produto consiste em realizar a união química dos grânulos da massa de forma a constituir um corpo único. Dessa forma o corpo cerâmico eleva a resistência mecânica e reduz a porosidade (Vieira, 2002). A sinterização realiza dois fenômenos na peça a densificação e o crescimento de grãos, ambos são processos de transferência de massa onde as partículas migram de uma região de elevado potencial para outro. Reduzindo espaços vazios no interior do produto e consequentemente seu tamanho (Sohrabi Baba Heidary et al., 2018a).

Esse processo pode ocorrer a partir de dois mecanismos, o primeiro é a difusão, esse processo é mais lento e consiste no deslocamento das partículas dentro do corpo cerâmico. O segundo mecanismo é a formação de fase líquida e essa se desloca para cobrir os espaços vazios no interior do corpo, sendo esse processo mais rápido. O segundo se mostra mais termicamente eficiente porém com a formação de compostos de menor viscosidade há risco de ocorrer alterações indesejadas no formato do produto final (Cargnin, 2010; Sohrabi Baba Heidary et al., 2018a; Vieira, 2002).

Após essa etapa começa o resfriamento do produto. Nessa etapa as reações químicas e os processos de transferência de massa no corpo cerâmico são parados por conta da redução de temperatura sofrida pela peça. Esse processo ocorre pela troca de calor com ar atmosférico sendo parte por injeção direta e parte por trocadores de calor (Cargnin, 2010; Sohrabi Baba Heidary et al., 2018a; Vieira, 2002).

2.2.2 Forno mono estrado a rolo

A operação de queima na indústria de revestimentos cerâmicos é realizada pelo forno monoestrado a rolo. Esse equipamento foi o que apresentou melhor desempenho e adequação para o processo de monoqueima rápida, processo onde o produto é submetido a apenas um ciclo térmico de baixa duração, entre 20 min e 120 min. A característica base desse equipamento é o deslocamento do produto que ocorre por meio de um plano de rolos posicionado em meia altura do túnel (Bristot, 1996; Vieira, 2002).

A Figura 4 apresenta o esquema de funcionamento de um forno a rolo e suas regiões de operação. No início do processo não há queimadores e o calor presente é aspirado da região de temperaturas mais elevadas pela chaminé de entrada. Na região onde há maior necessidade térmica existem queimadores que irão aumentar sobremaneira a temperatura, para tanto, na sua maior parte o combustível usado neste tipo de forno é o gás natural (Milani, Montorsi, Stefani, Saponelli, et al., 2017).

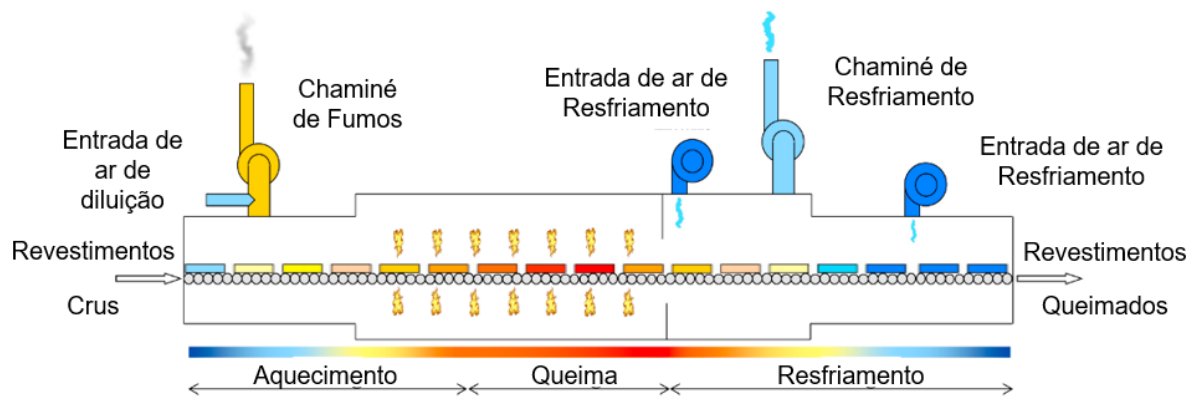
A construção do equipamento visa criar um fluxo interno para os gases quentes partindo das zonas de maior temperatura, regiões mais próximas ao final do processo, e seguindo em direção as zonas de menor temperatura, regiões próximas a entrada de material, sendo os gases posteriormente exaustos pela chaminé de fumos que fica localizada nos primeiros módulos do equipamento (Milani, Montorsi, Stefani, & Venturelli, 2017; Vieira, 2002)

Os fornos a rolo são construídos a partir de módulos, cada módulo pode ser equipado com um sistema individual de controle de temperatura sendo comum o uso de oito queimadores

por módulos sendo quatro acima do plano dos rolos e quatro abaixo dos rolos. A temperatura superior e inferior dos rolos pode ser diferente dependendo da necessidade do produto (Bristot, 1996; Milani, Montorsi, Stefani, & Venturelli, 2017; Vieira, 2002).

Figura 4

Esquema do forno a rolo



Fonte: Adaptado de Ferrer et. al. (2019)

A medida que o produto avança no processo a temperatura vai aumentando de forma gradual e controlada, esse avanço controlado é chamado de curva de queima, Vieira(2002) cita que a curva de queima é um parâmetro chave para o bom rendimento do processo. Com ela é possível prevenir defeitos e obter, melhores rendimentos energéticos. Sohrabi Baba Heidary et al.(2018a) avaliou diferentes taxas de aquecimento para curvas de queima e identificou impactos significativos no rendimento térmico e densificação do produto.

Após o tratamento térmico começa o processo de resfriamento do produto. A parte mais crítica do processo é a transformação alotrópica do quartzo, de beta para alfa, essa modificação gera uma mudança de tamanho no produto que se não controlada gera trincas no produto final(Cargnin, 2010; Milani et al., 2019).

Para controlar a condição o resfriamento é dividido em três etapas:

- resfriamento rápido – resfria a peça por meio de injeção direta de ar por meio de tubos furados chamados de flautas. As flautas são posicionadas na parte superior e inferior do plano de rolos com os furos direcionados para o produto. Elas captam ar da parte externa do equipamento e injetam com pressão de até 300 mmca. Essa etapa reduz a temperatura até próximo de 600 °C;
- resfriamento indireto – nesse ponto o forno resfria o produto por meio de trocadores de calor que irão resfriar a atmosfera do forno e essa irá resfriar o produto. Os trocadores

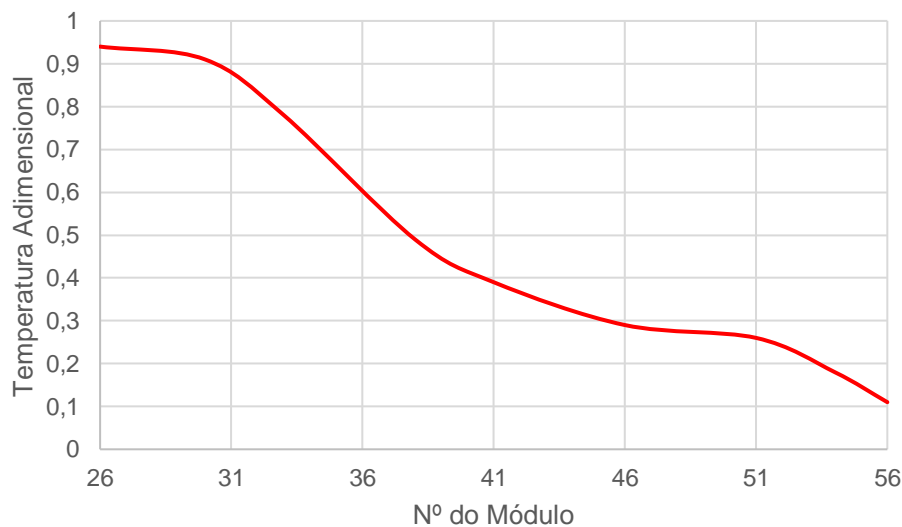
são posicionados na parte superior do túnel para aproveitar a convecção natural que ocorre pela diferença de densidade do ar com a temperatura. Comparando o tempo de duração do resfriamento rápido com o indireto o primeiro possui um tempo de exposição menor e com capacidade muito maior de retirar calor das peças. Dentro dessa etapa que ocorre a mudança de fase do quartzo de alfa para beta com redução de volume da placa cerâmica; e o

- resfriamento final – que acontece após a passagem da zona crítica nesta etapa o resfriamento volta a operar por meio de injeção direta de ar, semelhante ao resfriamento rápido.

A Figura 5 mostra esse perfil de variação de temperatura, o resfriamento rápido ocorre entre os módulos 31 e 36 onde a inclinação da curva é maior, logo depois se inicia o resfriamento indireto até o módulo 56. Observa-se que o número de módulos do resfriamento indireto é muito maior e a redução de temperatura é menor em relação ao resfriamento rápido (Cargnin, 2010; Milani et al., 2019; Vieira, 2002).

Figura 5

Perfil de temperatura durante o resfriamento



Fonte: Adaptado de Milani et al. (2019)

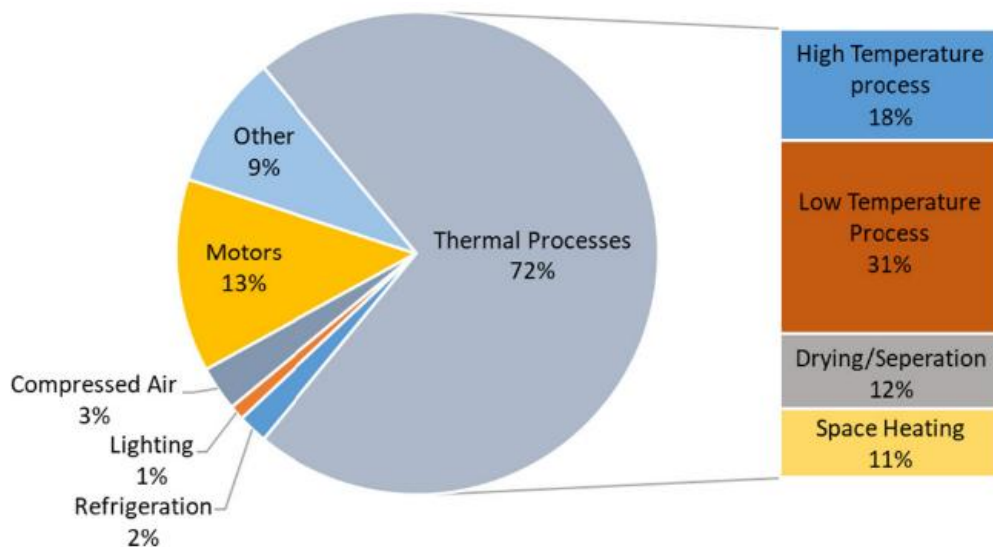
Milani et al. (2019) realizou um estudo sobre os efeitos do resfriamento no produto final e identificou que essa etapa tem grande influência na formação de tensões no produto final e variações de curvaturas no produto. Cargnin (2010) e Vieira (2002) reforçaram essa observação em seus estudos apresentando o resfriamento como uma etapa de controle importante para manter a estabilidade do produto final.

2.3 O USO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA

Avaliando a questão energética da queima de combustíveis fósseis há grande discussão acerca dos impactos causados pelo processo de geração de energia (Fan et al., 2020). Essa característica vem ao encontro do panorama do uso de energia na indústria conforme Figura 6 proposta por Simeone et al.(2016). Na Figura 4 pode-se ver que grande parte da demanda de energia do setor é relativa ao uso de energias térmicas, desse montante 12,96 % são referentes a processos de alta temperatura, acima de 400 °C, que podem associar-se a queima realizada no processo cerâmico. Jouhara et. al. (2018) apresenta que a indústria é responsável por 32% da geração de CO₂ com base em dados do Reino Unido.

Figura 6

Distribuição dos uso da energia na indústria do Reino Unido



Fonte: Simeone et al. (2016).

Essa condição vem alinhada à demandas globais de por parte de Organização das Nações Unidas (ONU), acerca do tema energia por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável, ODS, 07. Dentre os enfoques do objetivo podem ser destacados dois pontos: i) melhora na eficiência energética, ii) busca de fontes renováveis de energia.

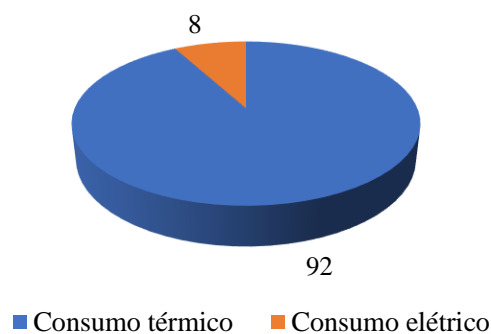
2.4 USO DE ENERGIA NO PROCESSO CERÂMICO

O processo cerâmico demanda elevados valores de energia para a sua produção, sendo considerado um setor de consumo intensivo de energia (Delpech et al., 2018), é o segundo

maior consumidor de gás natural do Brasil, o consumo médio em 2022 foi de 1,73 milhões de m³/dia (IBGE). Alves et. al. (2007) fez um levantamento das demandas energéticas do setor estratificando por energia elétrica e térmica. Conforme apresentado na Figura 7, fica evidente que a maior demanda do setor é focada no consumo de energia térmica, energia essa gerada por meio da queima de combustíveis fósseis, destaque para uso do gás natural (Ferrer et al., 2019).

Figura 7

Participação dos consumos elétrico e térmico sobre o consumo energético total.



Fonte: Adaptado de Alves et al. (2007).

Estratificando a fração de energia térmica do processo são obtidas demandas distribuídas em três equipamentos para o processo de via úmida e dois para o processo de via seca. Tomando como base a via úmida, processo mais comumente utilizado na indústria, a terceira maior demanda é o secador de peças representando em média de 12%, o *Spray Dryer* representa 36% os outros 52% ficam no processo de queima (Alves et al., 2010).

Segundo reavaliação de (Mezquita et al., 2014) essa estratificação apresenta distribuição semelhante 9% para o secador de peças, 36% para o *Spray Dryer* e 55% para o forno. Assim avaliando os estudos do setor o foco das pesquisas de eficiência energética se voltam para o processo de queima e como aproveitar os resíduos de energia térmica gerados no setor (Castro Oliveira et al., 2020; Jouhara et al., 2018)

Buscando melhorias quanto a eficiência energética trabalhos de revisão de Jouhara et. Al. (2018) e Castro Oliveira et. al. (2020) apresentam oportunidades no processo. Destaque nos artigos por abordagens referentes a reaproveitamento de calor nos processos de modo a reduzir a demanda por consumo de combustíveis. Essa linha de propostas visa capturar energia de correntes de massa saindo do processo, aqui se destacam fluxos gasosos das chaminés, e utilizá-los no processo, ou como fonte de calor para correntes de entrada ou como parte da própria

corrente de entrada na forma de reciclo. Essa proposta é avaliada para tanto para uso interno do forno como para uso em outras fontes consumidoras de calor.

Analisando as pesquisas sobre energias renováveis Madeddu et al. (2020) realizou um levantamento de oportunidades da indústria europeia referente a migração da energia térmica por meio de queima de combustíveis para o uso de energia elétrica. Em seu estudo é apresentada a oportunidade de eletrificação de praticamente toda a demanda térmica do processo com base em tecnologias consolidadas. Santos et al.(2020) apresenta estudos iniciais para o uso de aquecimento por micro ondas para o processamento térmico de produtos cerâmicos. Essa proposta visa reduzir a geração de carbono da cadeia de geração de energia, e com isso obter um processo mais sustentável (Fan et al., 2020).

Segundo Castro Oliveira & Iten (2021) o uso de energia solar para a utilização em processos de baixa temperatura, mais direcionado em seu estudo para usos de água quente para o processo produtivo. Sendo o foco desses estudos eliminar ou reduzir a demanda por combustíveis fósseis durante o processo, migrando para uma matriz energética renovável.

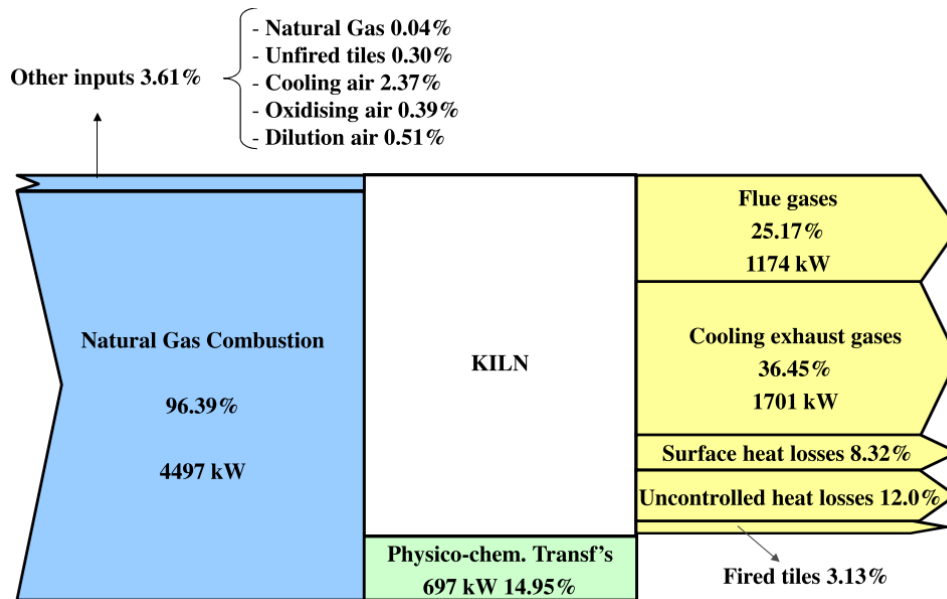
Outro ponto estudo é a eficiência do isolamento térmico e seu efeito na demanda térmica do equipamento. Com isolamentos mais robustos é possível reduzir a perda de calor para o ambiente, reduzindo assim a demanda por combustíveis para repor a energia Ferrer et. al. (2019).

2.5 AVALIAÇÃO DO PERFIL ENERGÉTICO DO PROCESSO DE QUEIMA

A demanda do processo de queima por elevadas temperaturas e posterior resfriamento do produto em um curto espaço de tempo levam a baixas eficiências do processo, valores entre 5% e 20%, isso ocorre pois com os ciclos rápidos é preciso fornecer uma grande quantidade de energia para iniciar as reações químicas necessárias no produto e posteriormente essa energia usada como calor latente é retirada do sistema por meio das correntes de ar do resfriamento, sendo assim descartadas (Castro Oliveira et al., 2020; Ferrer et al., 2019). A Figura 8 apresenta a distribuição das correntes de energia do processo conforme o estudo de Ferrer et. al. (2019), sendo que para atingir esses valores foi considerado como energia útil apenas a energia consumida pelas reações físico-químicas ocorridas no produto final.

Figura 8

Perdas do processo de queima



Fonte: Ferrer et al. (2019).

Observa-se que na entrada de energia, Figura 6, praticamente a totalidade da energia fornecida para o sistema é proveniente da queima de gás natural, 96,39%, sendo o restante a temperatura de entrada das correntes que ficam levemente mais aquecidas que a temperatura ambiente, porém com pouca representatividade.

Avaliando a Figura 8 é observado que as duas maiores correntes de saída são a exaustão do resfriamento e a exaustão de fumos com, respectivamente, 36,45% e 25,17% do uso de energia. Valores próximos foram obtidos por Utlu & Hepbaşlı (2014) indicando a tendência dessas correntes serem as dominantes independente do equipamento. O uso da energia para as transformações no produto representou 14,95% da energia inserida no sistema. A vazão de calor que sai do sistema por meio da corrente de exaustão do resfriamento representa a energia usada no aquecimento da placa cerâmica para ocorrer poder ocorrer as reações desejadas durante a queima. Essa energia é retirada de forma rápida do produto a fim de resfriar e permitir os processos seguintes (Cargnin, 2010; Vieira, 2002). Essa corrente é caracterizada por ser ar atmosférico aquecido, com baixa presença de resíduos da combustão Utlu & Hepbaşlı(2014) e Ferrer et. al.(2019) , o que a torna interessante para ser utilizada em ações de reaproveitamento de calor, uma vez que possui composição semelhante ao ar atmosférico e pouca presença de compostos que podem causar ataque ácidos ao equipamento (Castro Oliveira et al., 2020; Jouhara et al., 2018).

A vazão de ar quente exausta na chaminé próxima a entrada do forno representa o excedente de calor que foi deslocado para a região de entrada do equipamento que não foi utilizado no aquecimento do produto. De um modo geral quanto menor a temperatura e a vazão da chaminé menor será a sua parcela de energia no balanço do sistema. Porém por restrições termodinâmicas essa temperatura não pode ser reduzida abaixo da temperatura de operação das zonas de entrada do forno. (Cargnin, 2010; Vieira, 2002).

Outra característica da corrente de exaustão da chaminé é a presença elevada de produtos de combustão e baixo percentual de O_2 , o que a torna uma corrente mais difícil de ser recuperada Jouhara et al.(2021).

Um dos fatores que possui influência direta no rendimento energético da operação de queima é a utilização do equipamento. Assim os fornos conseguem atingir resultados de eficiência melhores quando sua produção realizada fica próxima a capacidade limite que ele está ajustado para operar (Ruivo et al., 2021; Castro Oliveira et al., 2020; Delpech et al., 2019; Ferrer et al., 2019; Özdamar & Birbil, 1999).

Resgatando as correntes de saída de energia apresentadas na Figura 8, se pode destacar que a corrente de Aspiração da chaminé, perdas térmicas e outras perdas ocorrem indiferente do equipamento estar produzindo ou não. Sendo as correntes de aspiração do resfriamento e as que envolvem o produto proporcionais a produção (Milani et al., 2019; Milani, Montorsi, Stefani, & Venturelli, 2017).

Correlacionando com a proposta da distribuição de custos apresentada por Bornia (2010) pode-se inferir que parte do consumo de energia térmica se assemelha a custos fixos, aqueles que independem do volume de produção, e parte a custos variáveis, variam conforme o volume produzido. Associando a relação do custo de energia com os custos de produção o conceito de custo de escala se mostra favorável para o rendimento de energia. Özdamar & Birbil (1999) apresentaram ganhos nos custos energéticos otimizando a relação demanda e equipamentos em operação aumentando a eficiência do sistema. Logo a planta passou operar com desligamentos programados dos equipamentos e alta ocupação durante os períodos de operação, em contraste com o sistema antigo onde todas as máquinas operam sem plano de paradas, mas com baixas taxas de ocupação.

Avaliando a operação do equipamento por meio de trabalhos de simulação como os de Cargnin (2010) e Milani et al.(2017) pode-se inferir que a demanda térmica dos produtos tornam-se um limitante para a operação. Para se atingir maiores produções com o mesmo equipamento é necessário reduzir o tempo de residência do produto no interior do mesmo. Isso

tem impacto direto no tempo disponível para que ocorram as transformações necessárias no produto. Essa condição pode ser ajustada por meio da elevação da temperatura ao longo da curva de queima o que fornece mais energia para o produto e acelera a cinética do processo.

Avaliando o processo no resfriamento com base nos trabalhos de Ruivo et al.(2021), Wang et al.(2020) e Milani et al. (2019) observa-se que o resfriamento também é um fator limitante para aumentar a produtividade do equipamento uma vez que podem ocorrer aumento de tensões no produto, que causam defeitos no produto acabado.

Assim o aumento da eficiência no equipamento está associado em parte com o ganho de produtividade, à medida que o equipamento é mais bem utilizado. Porém, isso não deve ser levado como único fator para o resultado. Comparando o rendimento dos equipamentos estudados por Utlu & Hepbaşlı(2014) e Ferrer et. al.(2019) o primeiro possui uma capacidade produtiva maior porém comparando os consumos específicos em m³/kg de produto o resultado de ambos é muito próximo.

2.6 CARACTERÍSTICAS DA CORRENTE DE ASPIRAÇÃO DA CHAMINÉ

A chaminé de entrada do forno, ou chaminé de exaustão de fumos, é a responsável por retirar do túnel os gases gerados durante a queima do gás natural juntamente com a parte volátil da peça cerâmica(Venturelli et al., 2021). Analisando os trabalhos de Ferrer et. al.(2019), Utlu & Hepbaşlı (2014) e Venturelli et al.(2021) essa corrente possui temperatura de saída entre 130°C e 238 °C. Quanto a sua vazão mássica nas referências consultadas ficou entre 18.680 kg/h e 47.600 kg/hora, mostrando grande variação entre os valores, trazendo a produção dos respectivos fornos é obtido 7.974 kg/h de produto no primeiro e 42.678 kg/h no segundo. Isso gera uma relação de 2,34 kg de ar aspirado por kg de produto produzido, enquanto a relação fica em 1,11 kg de ar por quilograma de produto no forno 2. Analisando a relação kg de gás por kg de produto produzido são obtidos os valores de 0,0415 kg de gás/kg de produto para o forno menor e 0,0426 kg de gás/kg de produto para o forno 2. A tabela 2 apresenta o resumos dos dados sendo o Forno 1 proveniente do estudo de Ferrer et. al.(2019) e o Forno dois de Utlu & Hepbaşlı (2014).

Tabela 2

Comparação dados das Chaminés de Entrada

Característica	Forno 1	Forno 2
Produção (kg/h)	7.974	42.678

Vazão de aspiração (kg/h)	18.680	47.600
Consumo de Gás (kg/h)	331,2	1820
Temperatura da chaminé (°C)	130	238
Razão vazão de aspiração e produção	2,34	1,11
Consumo específico de gás natural	0,0415	0,426

Fonte: Adaptado de Ferrer et al. (2019) e Utlu & Hepbaşlı (2014)

Analisando os dados pode-se concluir que a relação de eficiência deve estar associada a produção do equipamento. Por ser uma corrente de aspiração a mesma está diretamente atrelada as correntes de entrada que a compõem. (Venturelli et al., 2021). Outra associação que precisa ser analisada é a condição onde a aspiração em excesso pode forçar a entrada de ar frio do meio externo para o equipamento, essa preocupação é observada em diversos trabalhos de simulação de fornos em operação (Milani et al., 2019; Milani, Montorsi, Stefani, Saponelli, et al., 2017).

A questão dessa corrente é sua composição, Jouhara et al.(2021) comenta em seu estudo que caso a corrente de aspiração de fumos fique abaixo de 140 °C parte da sua composição se condensa em forma de ácidos, o que prejudica a estrutura do equipamento ao longo da operação. Compostos esses vindos principalmente de composições residuais de enxofre da queima do gás natural e óxidos voláteis que vêm da volatilização de componentes do produto. Dessa forma essa temperatura pode ser caracterizada como uma restrição a regulagens do sistema (Jouhara et al., 2018; Cargnin, 2010).

Estudos foram realizados para buscar sistemas que permitam capturar parcialmente a energia dessa corrente de modo seguro para a integridade dos equipamentos. Algumas propostas propõem trocadores de calor de cerâmica resistente a corrosão, embora menos eficientes na troca térmica, outras sugestões propõem usar sistemas de controle de temperatura para capturar a energia sem deixar a temperatura entrar na zona crítica de condensação ácida(Delpech et al., 2019).

2.7 CORRENTE DO AR DE COMBUSTÃO

O ar de combustão é a corrente que alimenta o comburente ao processo de queima do gás natural. Ele é injetado de forma distribuída em cada queimador do forno. Em um processo ideal a relação que se espera é que seja injetado apenas a quantidade de ar necessária para que ocorra a reação química, uma vez que o ar não reagido irá carregar energia e aumentar a

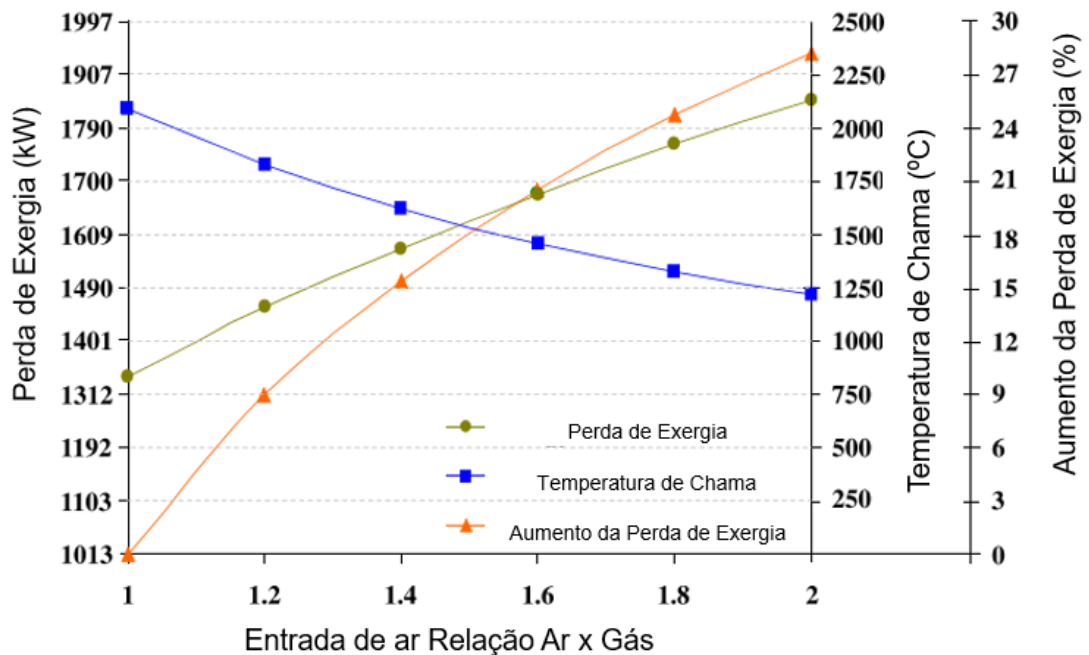
demanda térmica para o sistema (Mezquita et al., 2014; Vieira, 2002). Porém, colocando em contraste as demandas do produto durante o processo de queima apresentadas por Cargnin(2010) é preciso que haja oxigênio livre da atmosfera do equipamento visando que a operação corra de modo adequado. Ferrer et al.(2019) cita que a relação deve ser próxima a 1,1, ou seja 10% a mais de ar do que o necessário para que ocorra a queima estequiométrica do gás. A redução do rendimento de um queimador com a quantidade de ar usada é explicada pela Figura 9, onde a medida que a relação Ar x Gás aumenta, ocorre o resfriamento gradual da chama, o que reduz sua capacidade de aquecer o interior do equipamento e com isso a perda de exergia, que representa a energia útil para o processo. Assim para ter o máximo potencial da reação de combustão é preciso o volume correto de ar.

Na **Figura 9** o eixo X do gráfico representa a relação Ar x Gás, para conceitos do estudo de Ferrer et al.(2019), o mesmo adotado ao longo desse estudo a relação é representada pela relação entre a quantidade de ar utilizada na combustão sobre a quantidade de ar estequiométrica. Assim quanto é apresentada a relação 1 ou 1:1 é descrito que a quantidade de ar foi a demandada pela reação, valores abaixo de 1 representam uma queima com deficiência de O₂, e acima de 1 a reação ocorre com excesso de ar atmosférico.

Valores da relação abaixo de 1, ou seja, com falta de ar para a reação invertem a curva pois como falta um reagente a reação não ocorre de forma completa e, conseqüentemente, a energia liberada para o processo é menor. Além de formar monóxido de carbono como produto de combustão, que é mais poluente que o CO₂ (Milani et al., 2017).

Figura 9

Mudança nas condições de chama com a variação de ar



Fonte: Adaptado de Ferrer et al. (2019)

Castro Oliveira et al.(2020) e Jouhara et al (2018) apresentam propostas para melhorar o rendimento dessa corrente elevando a temperatura da mesma por meio do ar quente que é gerado durante o resfriamento do equipamento. Dessa forma a corrente contribui para aumentar a energia do sistema e, conseqüentemente, reduzir a demanda de combustível do processo.

Essa saída é citada em estudos de balanço de massa e energia como uma opção para reduzir a demanda de combustível do sistema. Uma vez que o ar injetado no equipamento possui maior temperatura ele transporta mais energia para o sistema dessa forma a demanda energética do equipamento reduz e conseqüentemente a demanda por gás natural será reduzida. Ferrer et al. (2019) e Utlu & Hepbaşı (2014). Tomando como base o estudo de Ferrer et al.(2019) e variando apenas a temperatura dor ar de combustão é possível obter uma redução na demanda energética do sistema de 4,65% a cada 10°C graus de temperatura. O que é preciso avaliar é a fonte do ar quente, uma vez que esse precisa ser aquecido antes do processo, a solução mais utilizada é o reaproveitamento dos gases do resfriamento para esse fim, uma vez que são vazões aquecidas que iram ser descartadas. Nesse mesmo estudo a temperatura de saída dos gases de resfriamento é de 152 °C e a entrada do ar de combustão 33°C. Sendo a vazão do ar de resfriamento 6 vezes a vazão do ar de combustão. Logo considerando o aproveitamento

de 70% dessa temperatura para o ar de combustão, a temperatura de entrada passaria de 33°C para 83 °C, o que indica uma redução de 38% na demanda de energia do sistema. Isso representa uma redução de 3 mil kg/dia de gás natural consumido.

É importante observar também as limitações dos queimadores, isso porque o ar aquecido tem uma densidade menor que o ar a temperatura ambiente, logo para manter a mesma vazão em massa haverá aumento de volume o que pode interferir na operação do queimador.

2.8 AVALIAÇÃO DA CORRENTE DE ASPIRAÇÃO DO RESFRIAMENTO

O processo de resfriamento das placas cerâmicas ocorre primariamente com ar atmosférico. Sendo o mesmo podendo ser dividido em dois momentos, a injeção direta de ar, denominada resfriamento rápido e uma utilizando trocadores de calor chamada de resfriamento indireto (Vieira, 2002). Estudo proposto por Venturelli et al.(2021) propõem a utilização de trocadores de calor com água, chamados em inglês de “*heat pipes*” ou tubos de calor como alternativas para o processo, embora ainda em fase experimental.

Analisando trabalhos acerca de resfriamento de fornos Milani et al.(2019) propõe que essa etapa é muito importante para a formação de tensões no material acabado, tensões essas que podem levar a defeitos no produto. Defeitos esses associados a trincas ou a desvios de planaridade (Milani et al., 2019).

Milani et al.(2019) afirma que mantendo um melhor gradiente de temperatura durante o processo de resfriamento a formação de tensões é menor. Esse resultado é obtido buscando operar mais com o resfriamento indireto, pois conforme afirma Vieira (2002) o resfriamento rápido é principal responsável pela geração de tensões na peças.

Ferrer et al. (2019) fez uma avaliação da energia, avaliação do balanço de energia com base na energia útil do processo, do forno e propôs que reduzindo a relação da quantidade de ar por massa de peças produzidas o sistema se torna mais eficiente. Assim haveria uma menor injeção de ar dentro do equipamento, logo para manter a temperatura desejada do produto ele seria exausto a uma temperatura maior o que permite maior aproveitamento em outros processos.

Levando em consideração a cinética de troca térmica entre os dois resfriamentos, o rápido e o indireto, o primeiro possui maior capacidade de troca térmica, com menor quantidade de ar a peça perderá mais energia e, conseqüentemente, o ar residual terá maior temperatura. Isso vêm ao encontro do que propõe Ferrer et. al. (2019) quanto a melhoria no resfriamento. Trazendo a proposta de Mezquita et al.(2014) é possível capturar parte do ar aquecido gerado

no processo de resfriamento rápido e direcionar o mesmo para a entrada do forno por meio da aspiração da chaminé. Dessa forma há um aumento de oxigênio no túnel, necessário para as reações do produto, e assim reduzir a demanda de oxigênio injetada nos queimadores. O ganho dessa ação está na temperatura de entrada do ar uma vez que o resfriamento rápido pode introduzir ar a temperaturas mais elevadas que a entrada de ar dos queimadores, contribuindo assim para reduzir a demanda de combustível.

Logo há duas condições conflitantes, em um lado é observado que o resfriamento mais lento ajuda a evitar trincas no produto, porém impacta na eficiência energética e pelo outro lado o uso de resfriamento direto reduz as vazões de ar dentro do equipamento e eleva a temperatura de recuperação dos mesmos, porém há um risco maior de trincas. (Milani, Montorsi, Stefani, Saponelli, et al., 2017); (Mezquita et al., 2014).

Sendo que nessa avaliação não está sendo considerada a questão de ciclo de queima, uma vez que ocorre a redução dos ciclos de queima para ganhar em produtividade o tempo disponível para o resfriamento reduz e com isso ocorre naturalmente a demanda por maior velocidade de resfriamento onde há maior risco de ocorrer trincas no produto porém o ganho de produção reduz o consumo energético unitário Milani et al.(2019).

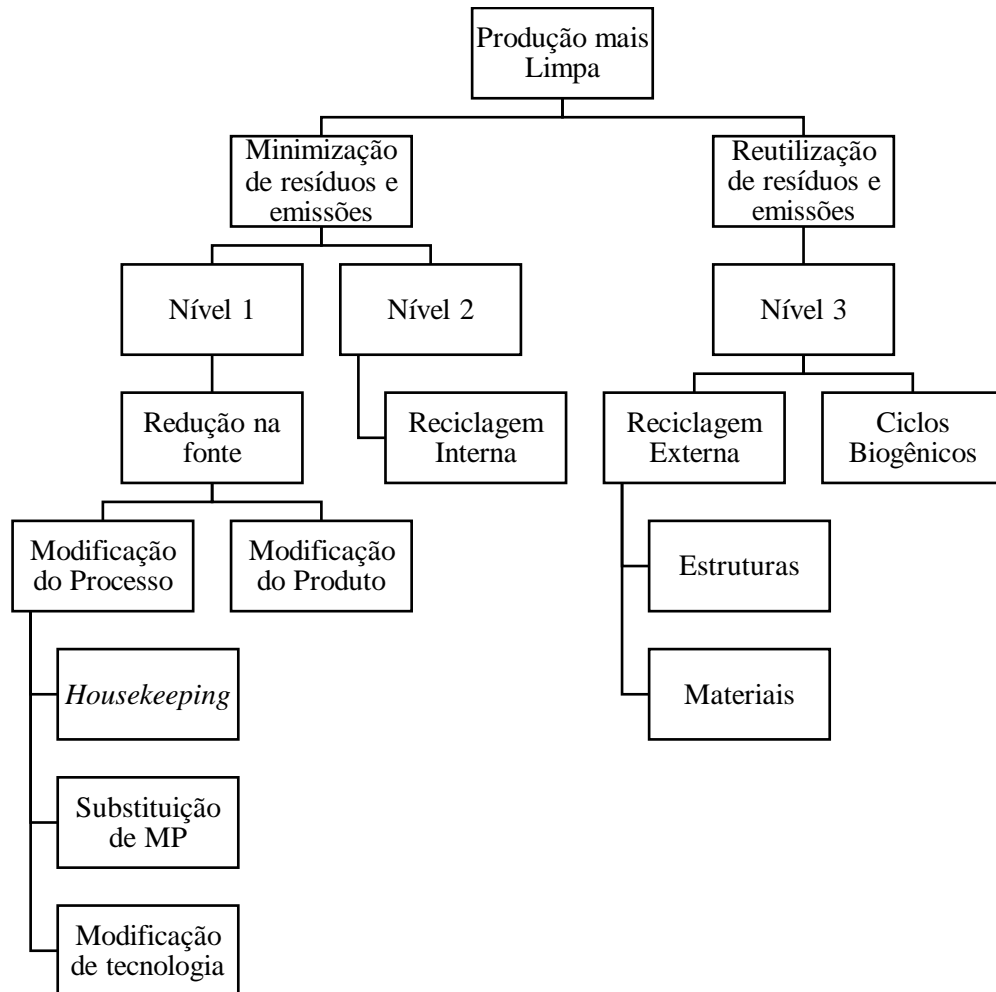
2.9 PRODUÇÃO MAIS LIMPA

A Figura 10 apresenta a matriz das atuações dos projetos em produção mais limpa (P+L) distribuído em três níveis. O objetivo desses ciclos é seguir uma sequência lógica de atuação e com isso obter os melhores resultados do ponto de vista dos três pilares da sustentabilidade. (Fan et al., 2020; Milan et al., 2012).

Ações de nível 1, as quais focam em eliminar a geração de resíduos são as mais procuradas para o processo, pois reduzem o consumo de materiais e com isso apoiam futuros desenvolvimentos dos setores produtivos (Fan et al., 2020; Raza et al., 2021). Avaliando esse nível por meio das lentes do processo de queima o recurso utilizado é o combustível consumido para gerar calor, e as vazões de saída de calor são as perdas do processo(Caglayan et al., 2018; Utlu & Hepbaşlı, 2014).

Figura 10

Esquema do projeto de produção mais limpa



Fonte: Adaptado de Milan & Graziottin, (2012).

As propostas de nível 1 podem ser abertas em processos de *housekeeping* que são entendidas como manutenção do processo e projetos de melhorias contínuas, nesse critério podemos destacar estudos como Ferrer et al(2019), Hussnain et al.(2021) e Özdamar & Birbil(1999). Outra proposta é a substituição de matérias primas, aqui se enquadram propostas como a apresentadas por Castro Oliveira et al.(2020), onde é proposta a redução de espessura de placas cerâmicas. Seguindo a sequência do processo há propostas de mudança de tecnologia, aqui aparecem propostas de eletrificação do processo de queima Madeddu et al (2020), ou o uso de micro-ondas para realização da operação Santos et al(2020).

Seguindo para a linha de trabalho de nível dois há abordagens voltadas para a reciclagem interna, assim no caso de processos energéticos há a aplicação do reaproveitamento do rejeito

de calor, em inglês chamado de *waste heat*. Esse ponto é onde estão concentrados a maior parte dos artigos. Seguindo propostas como Venturelli et al.(2021). Destaque para o detalhe que grande parte dos estudos são voltados para o aproveitamento do calor nos processos que demandam menor quantidade de energia, secadores e *Spray Dryers*.

Estudos de nível 3 com reciclagem externa são apresentadas em artigos como (Branchini et al., 2021; Cuvilla-Suárez et al., 2019) onde há aplicação do calor residual do processo para a geração de energia elétrica e para o uso em tratamento de água, respectivamente.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A presente pesquisa é de caráter descritiva e explicativa de abordagem qualitativa e quantitativa. O levantamento de dados foi realizado em uma empresa cerâmica do sul de Santa Catarina que produz revestimentos do tipo porcelanato e monoporosa, a empresa possui 14 fornos em operação.

3.1 MATERIAIS

Durante o trabalho foi avaliado um forno a rolo que opera em regime de mono queima de placas cerâmicas de porcelanato esmaltado. Esse equipamento foi escolhido por ser o maior forno presente no parque fabril, 126 m de comprimento. Vale salientar que o forno pesquisado possui maiores possibilidades de ajuste em seus parâmetros de operação, devido ao fato de que a capacidade de aquecimento do ar de combustão e capacidade de exaustão na chaminé de fumos é maior.

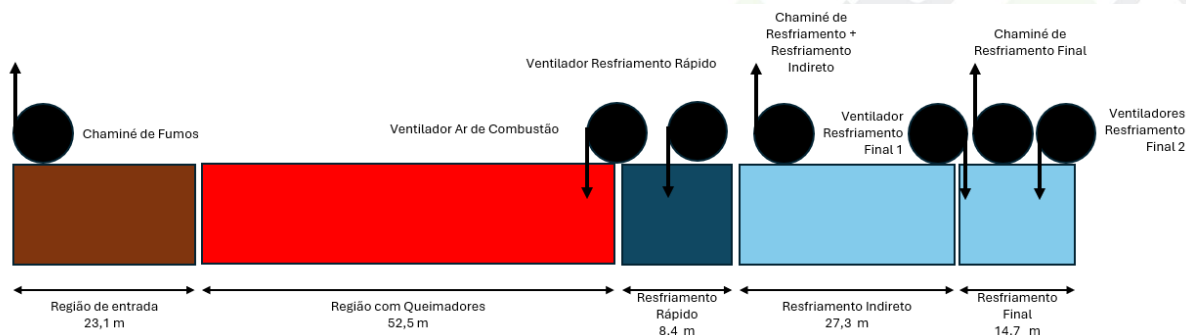
Para a realização das medições da vazão da chaminé de fumos foi utilizado tubo de Pitot. As temperaturas foram medidas com um leitor de temperatura, termopar tipo K. Dados do processo produtivo foram extraídos dos controles de processo da empresa. A análise da composição dos gases foi realizada por meio de um analisador de gases TESTO 310 para determinar as concentrações de CO₂, O₂ e CO. As pressões internas da máquina foram medidas com uma coluna de água eletrônica com precisão de 0,01 mmCA.

3.1.1 Descrição do forno

A Figura 11 apresenta a distribuição dos principais componentes do forno e sua localização.

Figura 11

Localização das principais zonas do forno estudado



Fonte: Autor, 2022

A partir do ponto de entrada do produto fica a chaminé de exaustão de fumos, captou o ar do túnel na região dos queimadores e expulsar do sistema. Próximo ao centro está o ventilador de ar de combustão, responsável por fornecer o ar necessário para os queimadores, logo na sequência dele estão localizados os ventiladores dos resfriamentos rápido, que insuflou ar para o equipamento, e o indireto, no projeto desse forno esse ventilador possui duas funções, ele irá gerar a perda de carga necessária para que ocorra o fluxo de ar no trocador de calor do resfriamento indireto e ao mesmo tempo realizou a exaustão do volume de ar injetado na etapa de resfriamento rápido. A proximidade dos motores permitiu a construção de uma tubulação de comunicação entre eles, onde o a exaustão do resfriamento com a tomada de ar do ventilador do ar de combustão. Assim foi possível recircular o ar utilizado no resfriamento, que é exausto com aproximadamente 180°C nos queimadores, dessa forma alimentando o sistema com ar de combustão aquecido.

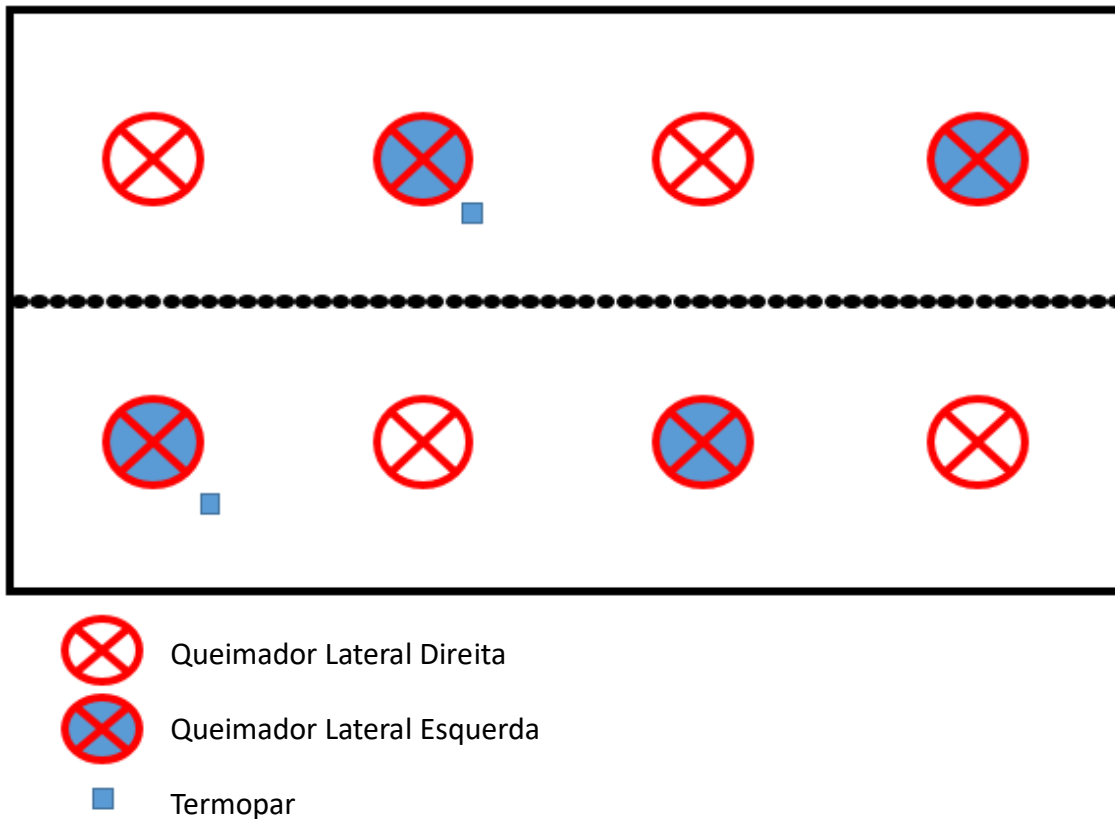
E, ao final do forno estão os ventiladores de resfriamento final, nesse equipamento há um primeiro estágio que insuflou ar na região mais próxima do indireto e depois está instalada uma bateria de ventiladores menores para realizar o final do resfriamento. Junto a esses módulos há a última chaminé do forno que realizou a exaustão do ar insuflado pelo resfriamento final.

O forno estudado é da marca SITI, modelo F1NH com 126 metros de comprimento e 2,45 metros de largura, dividido em 60 módulos de 2,1 metros de comprimento sendo, 36 utilizados para a queima do material e 24 para o resfriamento. Destes 36 módulos dedicados a queima 21 possuem queimadores no plano superior e no inferior, 4 possuem queimadores apenas no plano inferior e 12 deles não possuem queimadores, são aquecidos apenas com o calor residual arrastado pela chaminé de entrada. O forno possui 180 queimadores a gás natural, distribuídos em 24 zonas de controle, onde 13 delas não na região abaixo dos rolos e 11 acima do plano de rolos.

Cada módulo de queima possui 8 queimadores distribuídos 4 acima do plano de rolos e 4 abaixo do plano de rolos. A temperatura superior é controlada de modo independente da temperatura inferior. Quanto a distribuição lateral, são simétricas quanto a quantidade de queimadores. A distribuição dos queimadores dentro do módulo é apresentada na Figura 12. Observa-se que os queimadores não ficam alinhados uns com os outros, sendo sempre posicionados na diagonal um do outro.

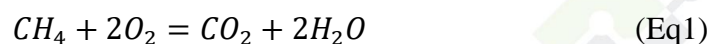
Figura 12

Ilustração de um módulo do forno



Fonte: Autor, 2022

Os queimadores operam com gás natural, composto majoritariamente composto por metano (CH₄). A reação de combustão do metano é apresentada na Equação.1, essa reação libera 891 kJ de energia por mol de combustível.



Os queimadores são de dois modelos. O primeiro é um queimador modelo SITI, modificado internamente na empresa. Estão instaladas 140 peças desse modelo. O segundo é um modelo da marca SACMI PL7 – PRO, originalmente projetado para gás GLP, porém está sendo usado para queima de GN, o forno possui 40 unidades desse modelo em operação. Cada zona de controle de temperatura possui apenas um modelo de queimador instalado, evitando mistura de modelos dentro do mesmo sistema local de alimentação de gás natural. Esse procedimento é adotado pois as aberturas para a saída do combustível são diferentes e com isso

iria ocorrer caminhos preferenciais do gás entre os diferentes queimadores, o que causaria diferenças de temperaturas entre as laterais do equipamento.

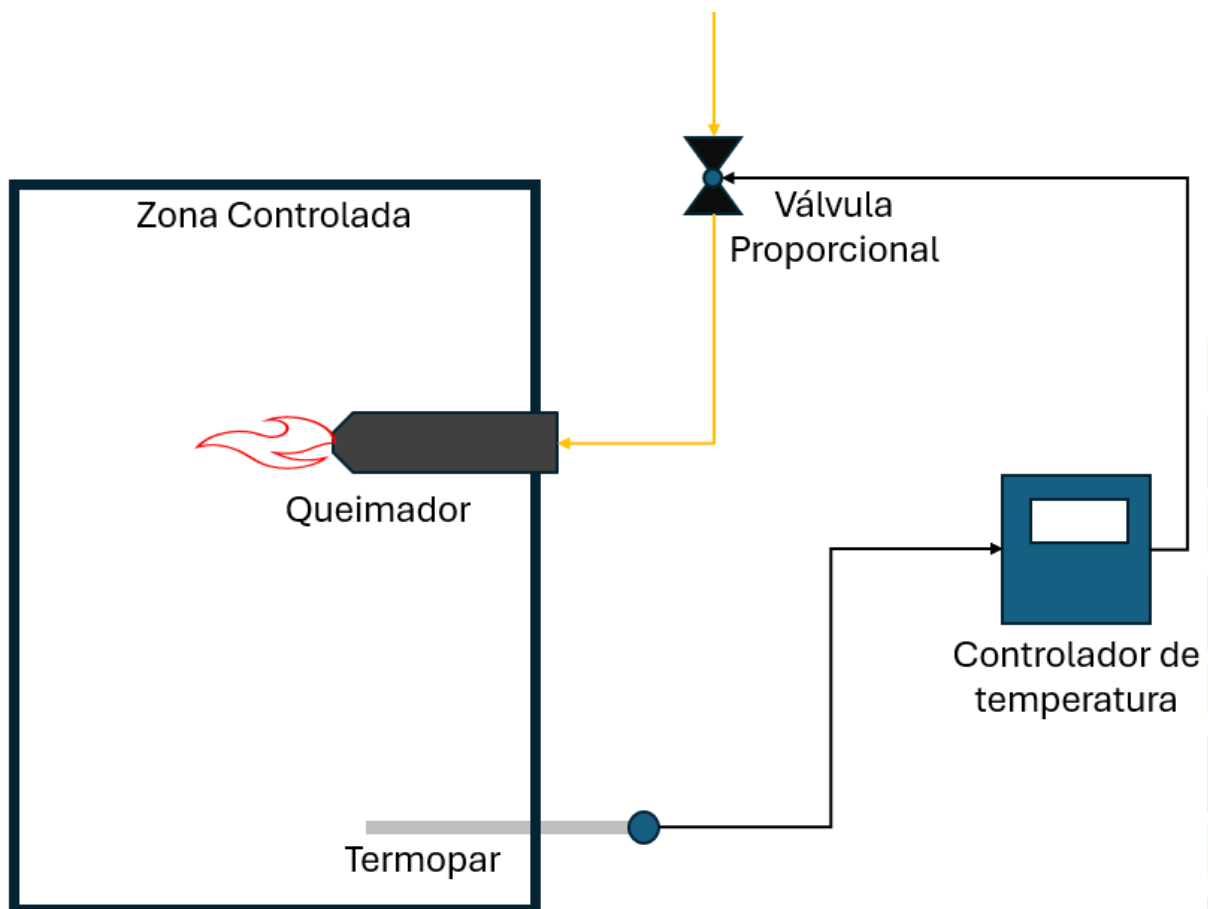
A alimentação do gás natural no equipamento ocorre por meio de tubulações dedicadas ao forno que distribuem o gás com uma pressão de 220 mmca. O ar de combustão é distribuído no sistema por outra tubulação posicionada acima e abaixo do forno. Cada queimador possui uma regulagem de vazão de ar combustão individualizada.

3.1.1.1. Controle de temperatura do forno.

O sistema de controle do forno é projetado para manter a temperatura das regiões controladas dentro dos parâmetros de processo. Para isso ele regula a vazão de gás natural através de válvulas proporcionais elétricas. A Figura 13 apresenta os componentes do sistema de controle de temperatura

Figura 13

Esquema de operação do sistema de controle de temperatura



Fonte: Autor, 2022

O termopar é o elemento responsável por realizar a medição da temperatura, cada zona de controle possui um medidor e considera-se que essa temperatura é constante ao longo da região, principalmente no sentido longitudinal de avanço. O sinal do termopar é transmitido até um controlador de processo que converte o sinal de mV para o valor de temperatura em °C e, posteriormente, compara com o valor determinado (*setpoint*) para aquela zona de controle. O controlador opera com um sistema de controle de processo PID, progressivo, integrativo e derivativo, assim ele compara o valor obtido com a leitura do termopar com o *setpoint* definido e por meio de cálculos de integração e derivação determina qual deve ser o ajuste na vazão de gás para reduzir a diferença entre o valor medido e o *setpoint*. Essa informação é convertida em um sinal elétrico que é enviada para a válvula proporcional instalada na rede de gás, a qual irá atuar conforme o comando recebido. Essa válvula é do tipo proporcional, ou seja, ela permite regular com precisão a vazão de gás desejada para o sistema. Ela é regulada com dois pontos limites, o ponto de máxima, onde ela está com abertura máxima, nesse ponto os queimadores estão com o máximo de vazão fornecida pela rede de gás do equipamento, e uma abertura mínima, esse é o ponto com menor vazão de gás que mantém os queimadores acessos. Para garantir a estabilidade do forno os queimadores não podem apagar ao durante a operação, apenas oscilar entre as vazões mínima e máxima.

Cada válvula controla a alimentação de 4 ou 8 queimadores, dependendo do tamanho da zona controlada. Sendo que dentro do mesmo sistema a distribuição de gás entre os queimadores é igual.

O equipamento produz placas de porcelanato esmaltado no formato 91x91 com 11 mm de espessura. A capacidade nominal de operação é de 6.700 m² por dia o que representa 6.980 kg/hora de material processado. A alimentação do produto ocorre de maneira constante formando filas com duas peças para entrar no forno.

3.1.1.2. Curva de Queima

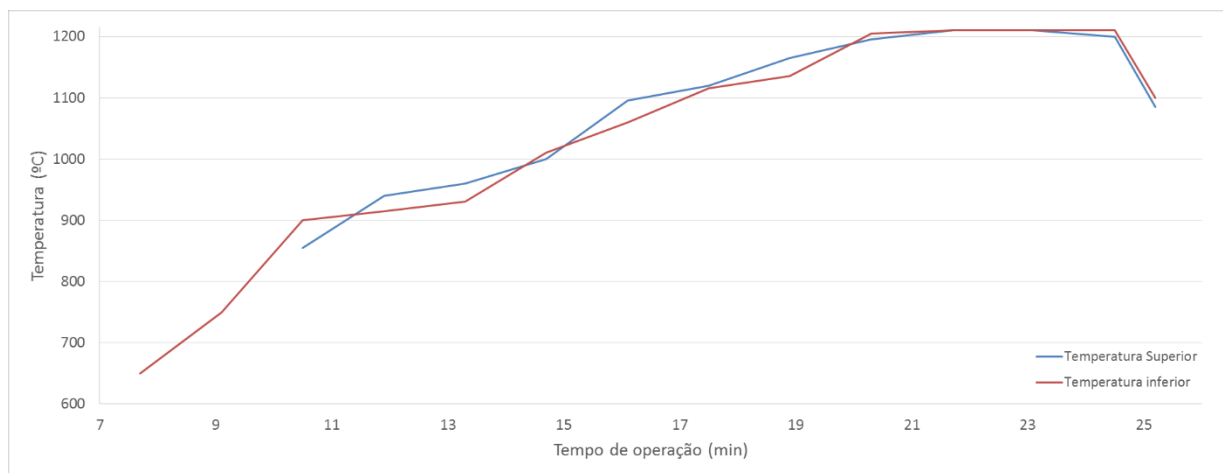
Para realizar o processo de queima o forno possui uma sequência de temperaturas que o produto irá passar para que as reações físico-químicas do processo ocorram de modo adequado.

O processo se inicia com o aquecimento do produto, iniciando apenas com a temperatura residual arrastada para a entrada por meio da chaminé de entrada e posteriormente por meio de queimadores. Esse aquecimento avança até o produto chegar a temperatura máxima, chamada de patamar, a qual ele fica exposto por um período e depois começa a etapa de resfriamento do

produto. O forno estudado possui temperatura máxima de processamento de 1220°C no patamar de queima. Na Figura 14 está apresentada a curva de queima do forno distribuída em função do tempo de ciclo. Essas temperaturas indicam a temperatura interna do equipamento e não a temperatura do produto. Segundo Cargnin(2010) durante o processo de aquecimento o produto cerâmico possui temperatura inferior a parte interna do forno, se igualando durante o patamar de queima. Durante o resfriamento a condição se inverte sendo a temperatura registrada no termopar menor do que a temperatura do produto.

Figura 14

Curva de queima



Fonte: Autor, 2022

O aquecimento por queimadores é iniciado apenas pela região inferior aos rolos, condição que ocorre por 3 módulos, na sequência começa a ocorrer o aquecimento na parte superior. Observa-se uma preferência por temperaturas na parte superior mais elevadas, que tendem a se igualar a medida que se aproxima o patamar de queima. Essa opção é utilizada para ajudar a preparar melhor a curvatura do produto final compensando diferenças nas dilatações térmicas do vidro e da massa cerâmica. O tempo de patamar, ou seja, o tempo que o produto fica exposto a temperatura máxima é de 4,2 minutos, ou 6 módulos de forno. Logo após o patamar há uma rampa intermediária destinada para preparar o material para a etapa de resfriamento.

A etapa de resfriamento possui 4 módulos dedicados ao resfriamento rápido, injeção de ar direta sobre o produto, essa etapa visa resfriar o produto até próximo a temperatura da transformação alotrópica do quartzo, 573°C, onde a peça sofre uma alteração de volume. Caso a transformação ocorra de modo rápido pode ocorrer a formação de trincas no produto ou condições anormais de curvaturas do material. Depois o forno possui 14 módulos para o

resfriamento indireto, resfriamento por meio de trocadores de calor localizados na parte superior da parte interna do equipamento. Esses módulos devem resfriar o produto para temperaturas abaixo de 573 °C, conduzindo os mesmos pela transição alotrópica sem gerar trincas na placa cerâmica. Importante reforçar que a temperatura total da peça precisa estar abaixo da temperatura crítica, isso é importante pois há gradientes de temperatura entre o interior e o exterior do produto, sendo a parte interna mais aquecida.

Por fim os últimos 6 módulos são o resfriamento final, onde a troca térmica volta a ser realizada por meio da injeção de ar direta sob a peça. Ao fim do processo o produto sai do forno a uma temperatura de 150 °C para seguir para as próximas etapas do processo. Ao contrário das zonas de queima que controlam a temperatura por meio da variação da vazão de gás natural, nos resfriamentos o controle de temperatura é realizado por meio da variação da vazão de ar, seja ela injetada como nos resfriamentos rápido e final, seja ela pela vazão interna no trocador de calor. Embora o controle de temperatura seja realizado por meio da modulação da vazão de ar o princípio de funcionamento é o mesmo do controle de temperatura na região de queima, onde é utilizado um termopar para realizar a medição da temperatura, um controlador para avaliar a medição com o *setpoint* e uma válvula proporcional para ajustar a vazão conforme o indicado pelo controlador.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram avaliadas as variáveis das correntes de entrada e saída críticas para o rendimento energético do equipamento, bem como os impactos sobre o produto processado, baseado nos dados de estudos de Ferrer et. al. (2019) e Utlu & Hepbaşlı (2014). Foram selecionadas três variáveis, com base na literatura, que impactam no resultado de rendimento térmico dos fornos cerâmicos. As variáveis críticas selecionadas e suas respectivas unidades de medição para o estudo foram:

- Vazão de exaustão dos fumos (m³/s) (Ferrer et al., 2019; Milani, Montorsi, Stefani, & Venturelli, 2017);
- Vazão do ar de combustão (kg/s) (Ferrer et al., 2019; Milani, Montorsi, Stefani, Saponelli, et al., 2017);
- Temperatura do ar de combustão (°C) (Cavazzuti et al., 2013; Mezquita et al., 2014).

3.2.1 Aplicação do planejamento experimental nas variáveis críticas

O primeiro passo da avaliação foi verificar se há influência das variáveis definidas no consumo de gás do equipamento. Assim serão testadas diferentes condições de operação alterando-se apenas as três variáveis definidas.

3.2.1.1 Determinação da vazão de gás

A medição da vazão de gás pode ser feita de duas formas, a primeira por meio da leitura do medidor de fluxo instalado na entrada da tubulação de gás, essa leitura irá indicar o consumo geral do equipamento. Essa informação é importante para avaliar o desempenho do equipamento como um todo.

A segunda forma é a medição individual por queimador. Nessa condição é avaliada a pressão local para verificar se a relação ar x gás do queimador está adequada. Essa medição também é usada para calibrar a abertura das válvulas proporcionais que atuam no sistema de controle de temperatura. Como o equipamento não possui um medido de fluxo em cada queimador a variável medida é a pressão de gás no queimador.

Para determinar a relação entre a pressão e vazão de gás nos queimadores foi instalado um medidor de vazão de gás antes da entrada do queimador e foi variada a pressão interna do gás entre 20 mmca e 220 mmca e registrada a vazão de gás em m^3/min . Durante o teste foram coletados os dados de temperatura do gás para converter a vazão para Nm^3/h e assim poder correlacionar a pressão interna do gás com a resposta da vazão em Nm^3/h . A conversão para as condições normais de temperatura e pressão foram usadas para padronizar a condição das correntes gasosas, uma vez que com a variação destas variáveis o volume do gás altera, assim não sendo possível realizar comparações entre diferentes condições.

3.2.1.2 Determinação da vazão do ar de combustão

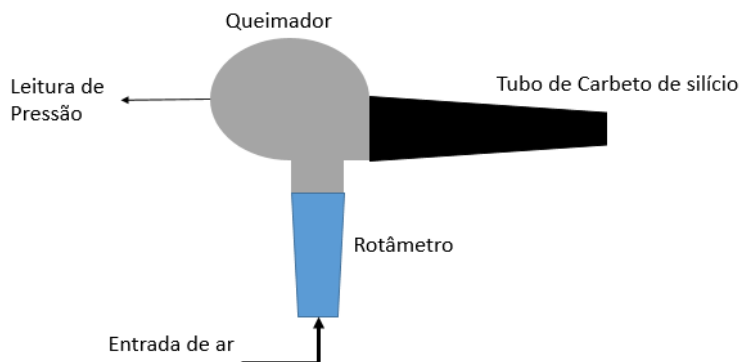
A vazão do ar combustão pode ser medida por meio do fluxo de ar em kg/s que é enviado do ventilador para o forno. Milani, Montorsi, Stefani, Saponelli, et al. (2017) apontaram que é possível haver a quantidade suficiente de ar entrando no equipamento, porém a distribuição ao longo do forno ser ineficiente gerando zonas com excesso de ar e zonas com falta de ar. Assim a medição da vazão de ar foi realizada diretamente nos queimadores. A construção dos queimadores não permite medir diretamente a vazão de ar que está entrando nos mesmos uma vez que não há espaço na tubulação para a instalação de medidores de fluxo. Assim foi proposto medir a pressão do ar dentro do queimador e por meio dela inferir a vazão de ar.

A partir da medição individual foi assegurado que a distribuição do ar fosse uniforme ao longo dos queimadores. A conversão da pressão medida para vazão foi feita elaborando curvas de relação entre pressão interna do queimador e vazão de ar gerada.

Para a avaliação dessa relação foi construída uma bancada teste onde foi instalado um rotâmetro abaixo do queimador junto com um manômetro digital para medir as pressões. A Figura 15 apresenta o esquema do sistema. A vazão de ar variou entre 20 e 36 m³/h e as pressões resultantes foram registradas. Cada modelo de tubo queimador apresenta uma relação distinta devido a construção de seu sistema de distribuição de ar, sendo assim, foram feitos testes com cada um de modo individual.

Figura 15

Representação da bancada teste



Fonte: Autor, 2022

Por meio delas foram elaborados gráficos de vazão x pressão de ar. Com esses dados calculados o valor de vazão de ar desejada para o experimento foi convertido de vazão geral para pressão de ar nos queimadores.

Após identificar os valores da relação de pressão e vazão, foram definidas condições de medição e realizada a variação da temperatura do ar para identificar o efeito da mesma sobre essa relação e seu impacto na oferta de oxigênio para a combustão.

3.2.1.3 Determinação da temperatura do ar na relação pressão e vazão

Com a variação da temperatura o ar atmosférico apresenta variações de densidade, isso pode impactar na relação pressão do queimador x vazão identificada. Para verificar esse efeito foram realizados testes de vazão e pressão em diferentes temperaturas. Com base nesses dados foi identificada a influência da temperatura na relação pressão e vazão de ar.

3.2.1.4 Variação da relação Pressão e Vazão em diferentes queimadores

O conjunto queimador e tubo de carbeto de silício apresenta diferentes condições de restrição a passagem do ar, devido aos diferentes formatos de bicos utilizados para distribuir o calor no interior do forno. Com isso a relação pressão interna do queimador e vazão de ar é alterada. Considerando que em um mesmo forno é comum a presença de diferentes tubos de carbeto de silício para melhorar a distribuição de calor é importante conhecer as diferenças entre eles. Para obter essa diferença foram realizados testes pressão x vazão comparando as condições encontradas em cada conjunto. A partir delas foi proposta uma relação entre as diferentes configurações.

3.2.1.5 Controle da vazão de ar no forno

Para controlar a quantidade de ar de combustão utilizado durante os testes foi definida uma pressão de ar nos queimadores e aplicada em todo equipamento. Dessa forma a alimentação de ar durante os testes foi homogênea ao longo do equipamento.

3.2.1.6 Controle de temperatura do ar de combustão

A temperatura do ar de combustão foi controlada por meio de termômetros de bulbo de mercúrio instalados na tubulação principal. Seu ajuste é realizado com base na abertura e fechamento de válvulas de recuperação de calor instaladas na chaminé de aspiração do ar do resfriamento. Quanto maior a quantidade de ar recuperado maior é a temperatura do ar de combustão. A cada ajuste na temperatura do ar de combustão ocorre a variação densidade do ar e conseqüentemente a sua vazão mássica, conforme apresentado no item 3.2.1.3, assim a cada ajuste de temperatura a pressão do ar de combustão deve que ser verificada para assegurar o valor desejado.

3.2.1.7 Controle de aspiração da chaminé

Aspiração da chaminé de fumos é o fluxo de ar removido do equipamento a partir da entrada do forno, medido por meio de um tubo pitot para obter a vazão em m^3/s . Sua regulagem ocorre por meio do ajuste da rotação do motor que movimentava o ventilador a partir de seu inversor de frequência.

Para obter a relação foi realizada a medição da vazão da chaminé em diferentes condições de rotação para construir a curva de relação vazão X rotação. Dessa forma a variável controlada passa de vazão da chaminé para rotação do inversor.

3.2.1.8 Realização do planejamento experimental

Como variável de resposta foi obtido o consumo específico de combustível com base no volume de gás consumido por hora (Nm^3/h). Após cada ajuste de parâmetros na máquina foi aguardado um período de duas horas para garantir que a máquina estivesse em regime estacionário. Após isso, foi acompanhado o fluxo de entrada de produto por 2 horas, contando a quantidade de peças que entrou no equipamento e sua massa. Durante esse período foi registrado o consumo de gás por meio de um rotâmetro instalado na entrada da tubulação de alimentação de gás natural

Para otimizar a realização dos experimentos foi realizado um delineamento composto central rotacional (DCCR) 2^3 com três pontos centrais, totalizando 17 ensaios, conforme a Tabela 3.

No experimento as variáveis determinadas como críticas para o rendimento energético foram traduzidas para parâmetros que são de fácil medição e controle ao longo da realização dos experimentos. Assim foram definidas as seguintes variáveis de controle:

Vazão da chaminé (Nm^3/h) \rightarrow Rotação da Chaminé (RPM)

Vazão do ar de Combustão (Nm^3/h) \rightarrow Pressão de ar dos queimadores (mmca)

Temperatura do ar de combustão ($^{\circ}\text{C}$) \rightarrow mantida a mesma variável.

Tabela 3:

Planejamento fatorial 2^3 , tipo estrela com ponto central (DCCR).

Ensaio	Variáveis Codificadas			Variáveis Reais		
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Vazão Ar Combustão (Nm^3/h)	Vazão Chaminé (Nm^3/h)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Pressão de ar no queimador (mmca)	Rotação da Chaminé (RPM)
1	-1	-1	-1	90	15	1400
2	+1	-1	-1	150	15	1400
3	-1	+1	-1	90	21	1400
4	+1	+1	-1	150	21	1400
5	-1	-1	+1	90	15	1520
6	+1	-1	+1	150	15	1520
7	-1	+1	+1	90	21	1520
8	+1	+1	+1	150	21	1520
9	0	0	-1,68	120	18	1360
10	0	0	+1,68	120	18	1560
11	0	-1,68	0	120	13	1460
12	0	+1,68	0	120	23	1460
13	-1,68	0	0	70	18	1460
14	+1,68	0	0	170	18	1460
15	0	0	0	120	18	1460
16	0	0	0	120	18	1460
17	0	0	0	120	18	1460

Os códigos (-1,68), (-1), (0), (+1) e (+1,68) indicam o nível de cada variável

Fonte: Autor, 2022

Para validar o delineamento composto central e identificar o ponto com menor consumo de combustível foi utilizado o *software Statistica 8*.

3.2.1.9 Determinação dos valores das variáveis críticas para a construção do planejamento experimental

Cada variável crítica seguiu critérios próprios para a sua definição levando em consideração as limitações do equipamento juntamente com os dados bibliográficos levantados.

Para Temperatura do ar de combustão foram definidos como valores de -1,68 e +1,68 os limites inferiores e superiores que era possível atingir no ar de combustão. Os pontos intermediários foram calculados por extrapolação desses valores

Para a pressão de ar dos queimadores foi definido com base nos resultados das medições da relação ar e gás nos queimadores. Assim o ponto -1,68 representa, 18 mmca, é o ponto onde a vazão de ar fica levemente abaixo da estequiométrica e o ponto +1,68 representa o ponto com relação de ar x gás acima de 1.4, todos os cálculos foram considerados a maior temperatura de ar, condição essa que se espera que a demanda de pressão seja maior. Os pontos intermediários foram calculados por extrapolação desses valores

Para a rotação da chaminé foi definido como valor de -1,68 o menor valor que o equipamento pode operar sem gerar alarme de exaustão e o ponto de +1,68 foi definido na maior rotação recomendada pelo setor de manutenção. Os pontos intermediários foram calculados por extrapolação desses valores

3.2.2 Acompanhamento da Estabilidade do produto

Para avaliar o impacto das condições de operação no produto foram elencados três parâmetros de controle de processo monitorados na empresa:

- Absorção de água
- Tamanho do produto
- Curvatura lateral da peça

Todas as variáveis foram acompanhadas conforme a ABNT 13818 que orienta sobre a fabricação de revestimentos cerâmicos.

3.2.3 Teste de longa duração

Com a melhor condição identificada na aplicação do DCCR foi realizado um teste de longa duração, as condições de operação foram aplicadas ao forno e seu desempenho energético foi acompanhado ao longo de 7 dias de operação. Esse resultado foi comparado com a condição inicial do equipamento para verificar a economia de combustível obtida.

Inicialmente o equipamento foi ajustado conforme a sua condição original de operação quanto as variáveis críticas estudadas. As demais condições de operação foram mantidas constantes. Ao longo dos dias foi monitorado o consumo de gás do equipamento, a produção realizada e a estabilidade do produto.

Após o período de acompanhamento o equipamento foi configurado com base na condição mais eficiente identificada do estudo. Durante o período de avaliação foi realizado o mesmo controle realizado na etapa um do teste.

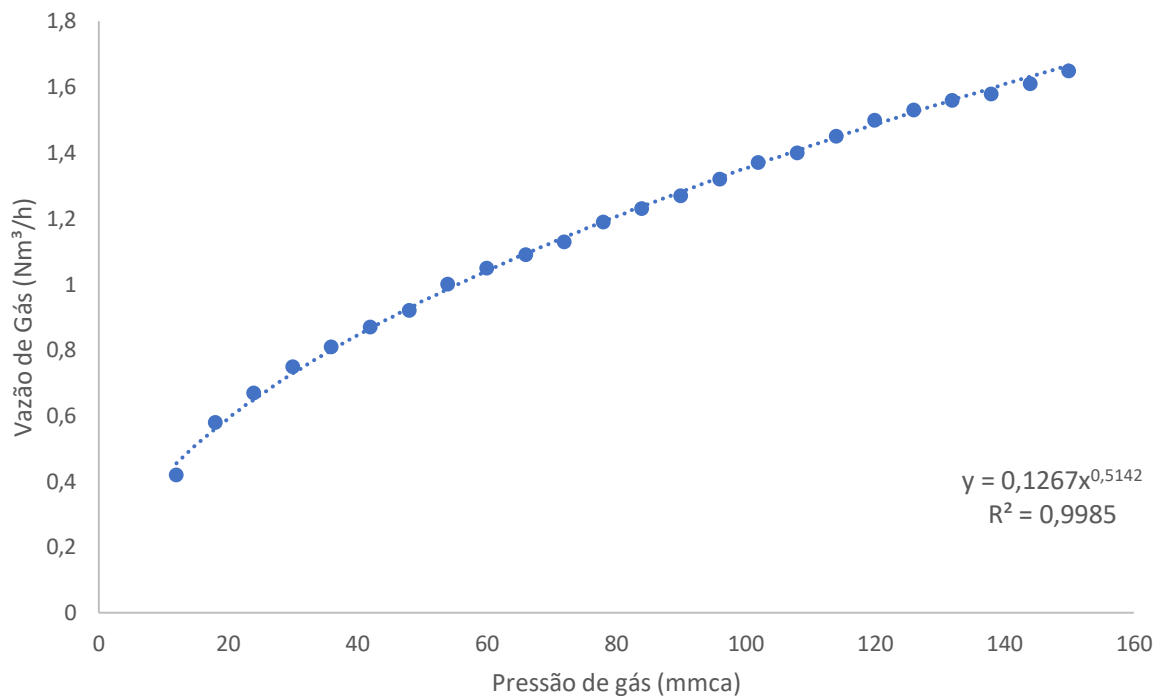
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO E VAZÃO DE AR E GÁS NOS QUEIMADORES

A Figura 16 mostra a correlação entre o fluxo de ar dos queimadores e a pressão interna do equipamento. Compreender essa relação é importante para o controle do equipamento uma vez que nos queimadores estudados não há um sistema de medição direto de vazão de ar e gás nos queimadores, assim foi preciso inferir a vazão por meio de tomadas de pressão presentes no equipamento. Sendo um ponto destinado a medir a pressão do ar de combustão e outra destinada a medir a pressão do gás natural.

Figura 16

Relação entre pressão e vazão dos gás no queimador



Fonte: Dados da pesquisa, 2022

Foi observado que a relação não segue uma tendência linear, a medida que a pressão de gás se eleva o aumento da vazão tende a reduzir chegando a faixas que tendem a se estabilizar. Isso é observado na figura 11, onde para valores de pressão na faixa de 20 mmca o aumento da vazão é mais significativo quando comparado com as variações que ocorrem acima de 100 mmca. Foi plotada uma linha de tendência exponencial onde foi possível identificar uma relação que representa a relação pressão interna do queimador e sua vazão. O R^2 obtido nessa

equação foi de 0,9985 o que indica que a equação é aderente aos resultados obtidos experimentalmente.

Juntamente com a relação de pressão e vazão do gás foi realizado o estudo de pressão e vazão no ar de combustão dos queimadores. A Figura 17 apresenta a relação de vazão e pressão para os diferentes tubos de carbetto de silício utilizados no forno em estudo.

Com a comparação dos queimadores foi observada que a medida que aumenta a restrição de saída ocorre um aumento da relação Pressão sobre vazão, conforme apresentado na Figura 17. Essa relação é esperada uma vez que o ar teve maior dificuldade de passar pela abertura de saída.

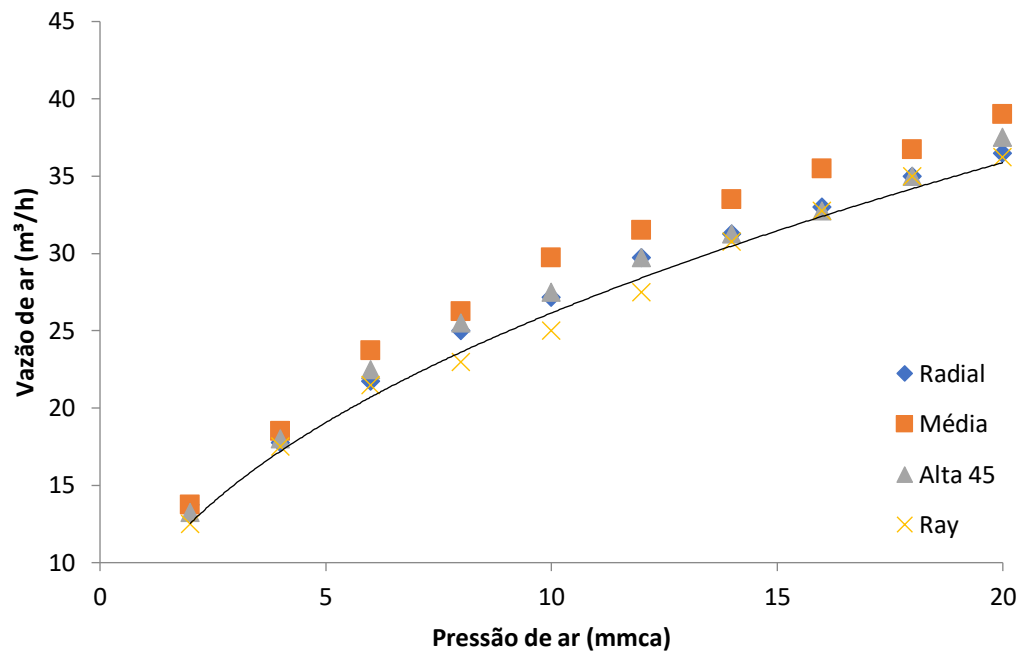
O queimador de média possui uma maior abertura de saída, 60 mm de diâmetro, em comparação com o queimador de alta 45 que possui 45 mm de diâmetro de saída. Os queimadores Ray são queimadores especiais, possuem 6 saídas de 15 mm de diâmetros.

Essa relação apresentou mudança conforme o modelo de queimador. Observando o sistema construtivo dos queimadores no modelo 1, queimador da marca SITI, a tomada de pressão é no corpo principal, local com maior volume, os valores de pressão são menores para a mesma vazão. No modelo 2, SACMI, a tomada de pressão é na tubulação de entrada do queimador, um local mais restrito. Conforme os resultados na Figura 18. Observa-se que a medição no queimador 2 possui uma curva mais inclinada, assim é preciso alterar mais a pressão para ajustar a vazão. Essa condição permite um ajuste mais preciso da vazão de ar desejada.

Outra diferença observada foi que o modelo 1 apresentou maior variação em diferentes configurações enquanto o modelo 2 se mostrou mais estável. Com essa relação de pressões é possível determinar que para facilidade de operação o modelo 2 se torna mais seguro, visto que valores mais próximos facilitam a padronização e o controle.

Figura 17

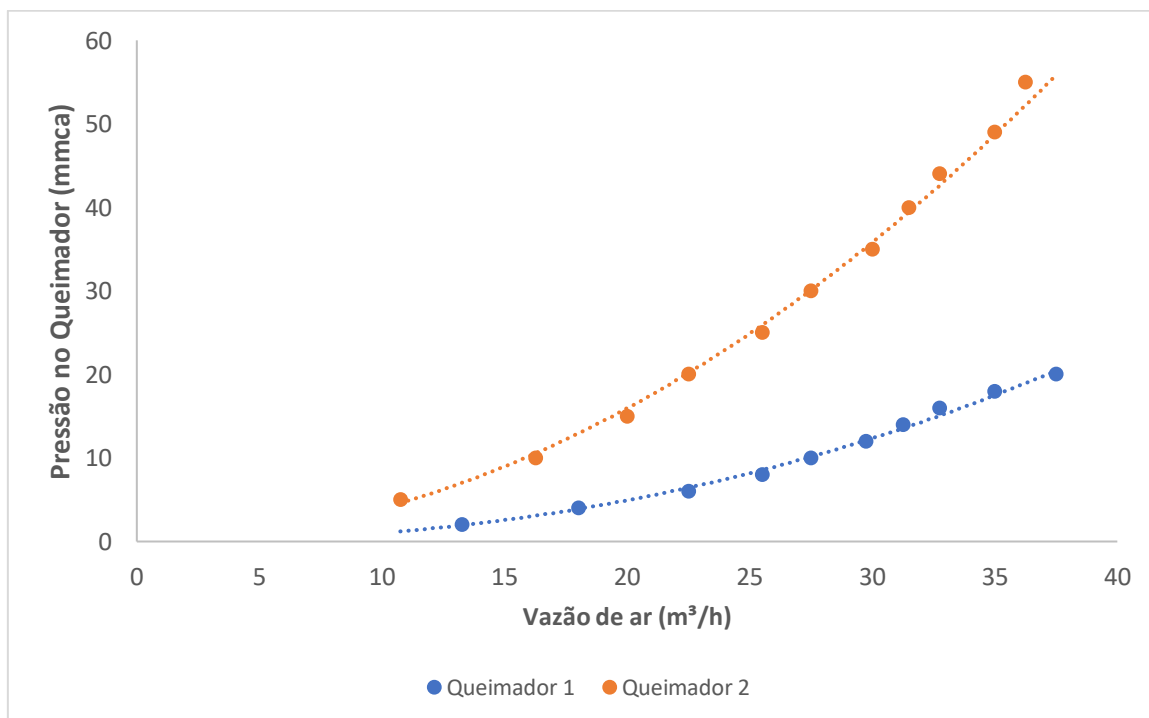
Relação entre pressão e vazão dos ar no queimador



Fonte: Dados da pesquisa, 2022

Figura 18

Comparação das pressões internas dos diferentes queimadores variando a vazão de ar



A relação apresentada no ar segue a mesma tendência observada no gás, a medida que a pressão de ar aumenta ocorre a tendência de estabilizar a vazão de ar que passa pelo queimador. Assim foi aplicada a mesma proposta de plotagem de linhas de tendência exponenciais que apresentaram uma boa correlação com os dados experimentais.

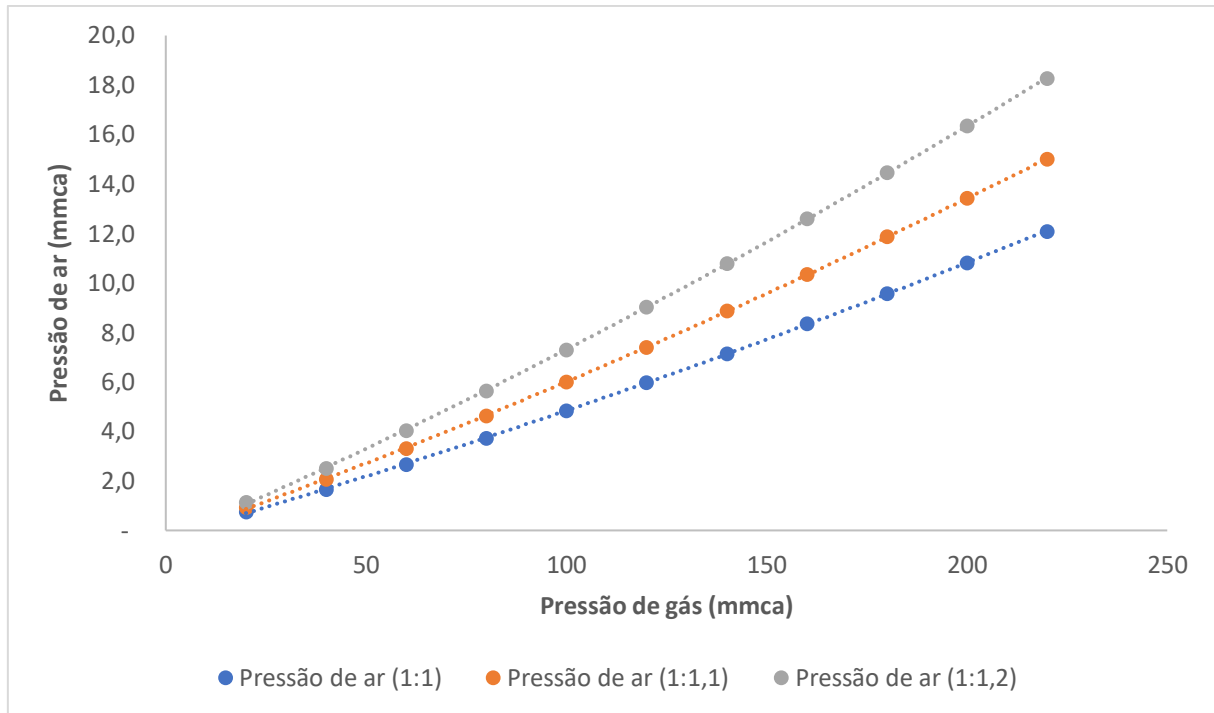
Foi observado que queimadores com maior abertura na saída, tipo média, diâmetro de saída de 60 mm, possuem maior vazão para uma mesma pressão, enquanto queimadores do tipo Ray que possuem maior restrição na saída, 5 saídas com 10 mm, essa relação cai. Isso aponta para a importância de controlar esse parâmetro de modo individualizado para cada modelo de tubo utilizado.

Correlacionando os dois gráficos com a equação estequiométrica da combustão do gás natural, aqui considerado como apenas metano foi obtida a relação entre a pressão de ar e de gás, o resultado está apresentado na Figura 19 com diferentes relações de ar e gás. Para essa avaliação foi considerado o gás como variável independente e o ar como variável dependente. Essa decisão foi tomada com base nos procedimentos de operação do equipamento que indicam que é preciso ajustar a vazão de ar conforme a demanda de gás da região do forno, entendendo aqui região do forno como zona de controle.

A relação 1:1 é a relação estequiométrica onde a quantidade de oxigênio é a necessária para realizar a combustão sem sobras de ar. A relação 1:1,1 possui 10% de sobra de oxigênio pela estequiometria, essa condição é a recomendada por Ferrer et. al. (2019) pois o produto cerâmico necessita de oxigênio para realizar parte de suas reações químicas durante a operação de queima. A relação 1:1,2 é uma condição de excesso de 20% de ar considerando um cenário que pela literatura estaria com consumo de gás elevado.

Figura 19

Relação entre as pressões de ar e gás nos queimadores



Fonte: Dados da pesquisa, 2022

Com os resultados da Figura 19 foi observado que a relação não ocorre de forma linear embora a relação estequiométrica para a reação química seja constante. Essa condição é explicada pois com a variação das pressões no interior do queimador, seja no gás natural, seja no ar de combustão ocorre a variação da sua densidade e a variação de seu volume o que causa uma mudança na relação pressão e vazão, conforme evidenciado nas Figuras 11 e 12. Assim a relação não permanecesse constante com o aumento da pressão de gás.

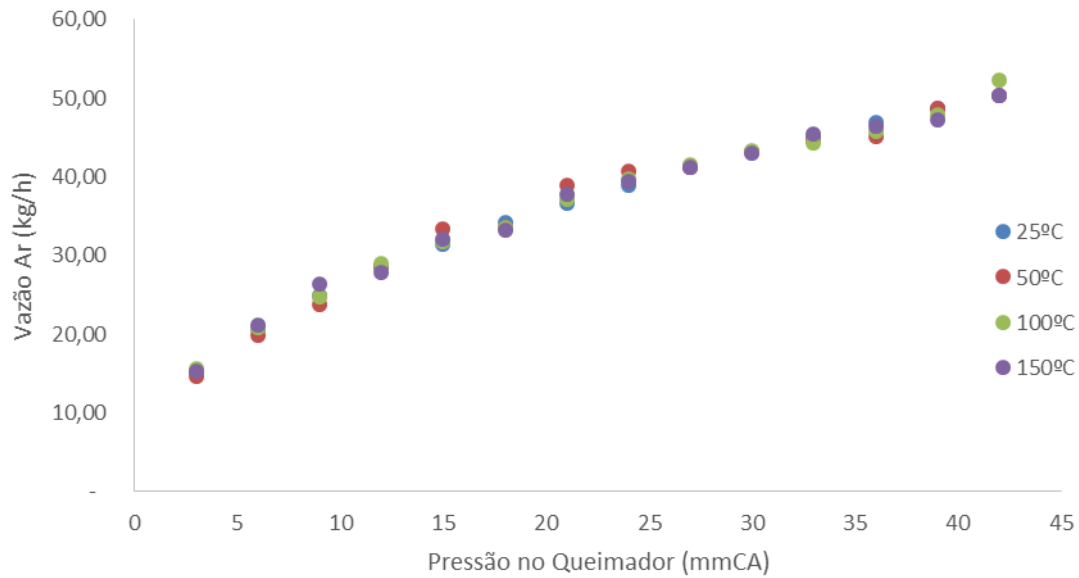
Esses resultados foram obtidos com o ar em temperatura ambiente, 27°C durante os testes, porém quando utilizados no forno o ar será aquecido e com isso a relação entre pressão no queimador e quantidade de oxigênio disponível será menor, o que impacta no consumo de combustível da máquina.

4.1.1 Avaliação do Impacto da variação da temperatura do ar

Foi avaliada a relação entre a pressão no queimador e a vazão em diferentes temperaturas de ar. Conforme observado na Figura 20 a vazão volumétrica do ar pode ser considerada a mesma, independente da temperatura.

Figura 20

Variação da vazão volumétrica de ar em função da pressão

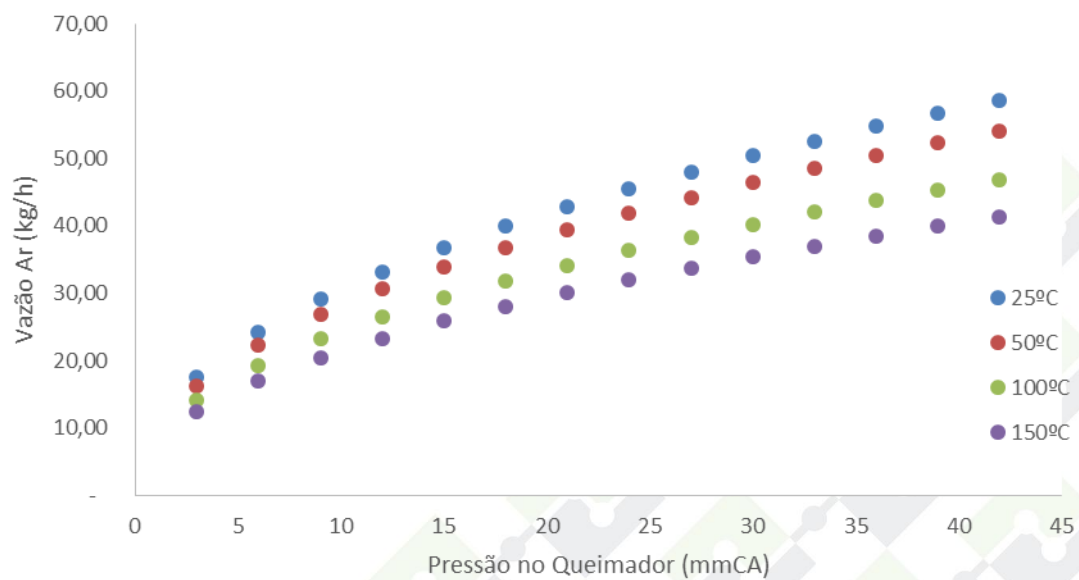


Fonte: Dados da pesquisa, 2022

Convertendo a vazão mássica por vazão volumétrica se observa uma queda na relação entre vazão e pressão, conforme mostra a Figura 21.

Figura 21

Variação da vazão mássica de ar em função da pressão

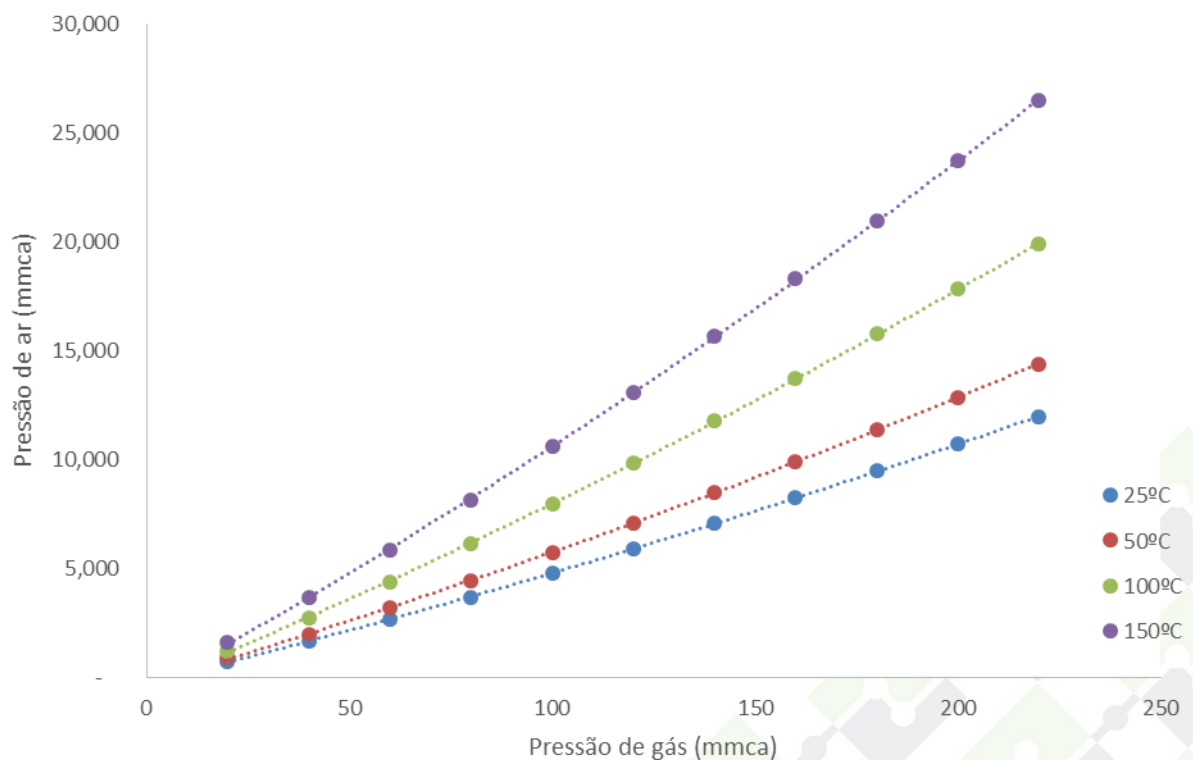


Fonte: Autor, 2022

Isso se justifica pois, a medida que se eleva a temperatura a densidade do ar cai, passando de $1,166 \text{ kg/m}^3$ na temperatura ambiente para $0,821 \text{ kg/m}^3$ a temperatura de 150°C . Isso significa que a medida que o ar do forno é aquecido com o reaproveitamento de calor a pressão de ar nos queimadores deve ser aumentada a fim de manter a relação estequiométrica definida para o equipamento. Isso impacta a relação pressão de gás e pressão de ar, apresentada na Figura 22. Com essa informação foi possível definir que para que ocorra o aquecimento do ar de combustão sem que haja impactos na operação do equipamento é importante realizar o gerenciamento conjunto entre temperatura do ar e sua pressão nos queimadores, dessa forma preservando a relação estequiométrica definida para a operação.

Figura 22

Relação estequiométrica das pressões de ar e gás em diferentes temperaturas



Fonte: Autor, 2022

A Figura 22 apresenta a relação ar x gás 1:1 de um queimador com saída de 45 mm em diferentes temperaturas. Cada linha representa a relação estequiométrica 1:1 em diferentes temperaturas de ar combustão. O resultado apresenta uma elevação na angulação da curva para elevadas pressões de gás, isso se correlaciona com a limitação do aumento de vazão observado

na Figura 16 e na Figura 17 aonde a partir de certas pressões a elevação da vazão do ar reduz, tendendo a estabilização. Extrapolando os dados obtidos para temperaturas de ar mais elevados é esperado que se o ar for aquecido em excesso não haverá pressão de ar suficiente para garantir a vazão mássica necessária para manter a relação estequiométrica definida. Essa condição ocorre pela queda na densidade do ar associada a condição observada na Figura 13 que mostra que a vazão volumétrica do queimador é constante com a variação de temperatura. Esses dados indicam que é preciso conhecer o limite de pressão que o ar pode ser entregue ao queimador para poder definir o limite de temperatura de aquecimento do ar que o equipamento pode operar.

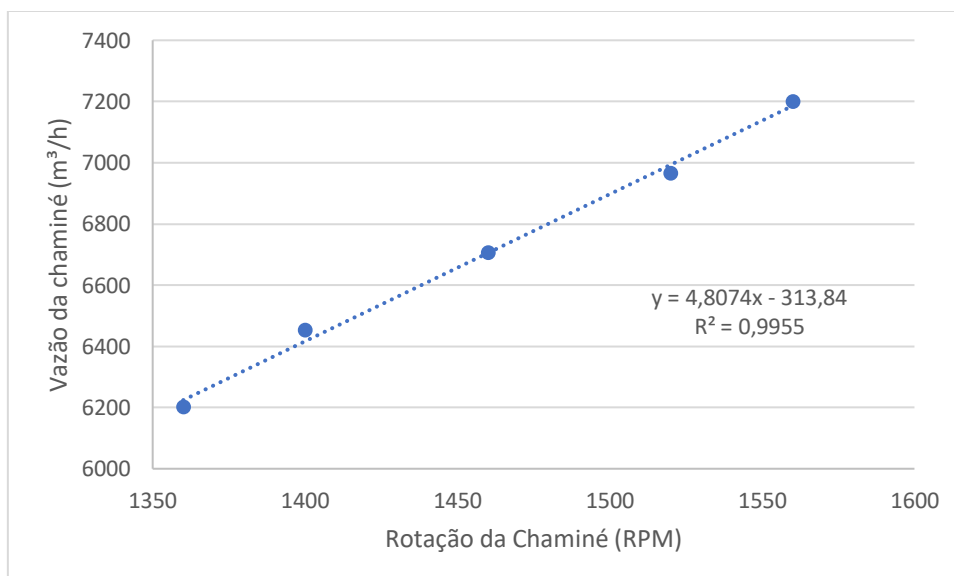
4.1.4. Relação entre a vazão da chaminé e a rotação do motor

Para realizar o controle da vazão da chaminé a variável precisou ser convertida para a rotação no inversor de frequência. Essa mudança permitiu um controle mais dinâmico da variável e tornou ela próxima dos controles diários dos técnicos de operação. Para tanto foram realizadas uma série de medições com tubo de Pitot variando a rotação da chaminé com a intenção de identificar uma curva característica de variação da vazão em m³/h com a rotação em RPM. A Figura 23 apresenta essa relação. Foi observado que a variação é aproximadamente linear, isso está de acordo com a proposta apresentada por Cremasco (2021) em seu livro de operações unitárias onde é apresentada a relação entre diferentes rotações da chaminé conforme a Equação 2:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (\text{Eq2})$$

Figura 23

Relação da rotação chaminé com a sua vazão



Fonte: Autor, 2022

Assim para os testes do DCCR foi utilizada a relação apresenta da Figura 23.

4.2 AVALIAÇÃO DO PLANEJAMENTO DCCR

Foi realizada a avaliação dos dados coletados no planejamento DCCR através do Software Estatística 8^o. Para avaliar o consumo de gás foi utilizado o modelo linear/quadrático do programa considerando como estatisticamente significativo apenas os efeitos com Alpha maior que 0,05.

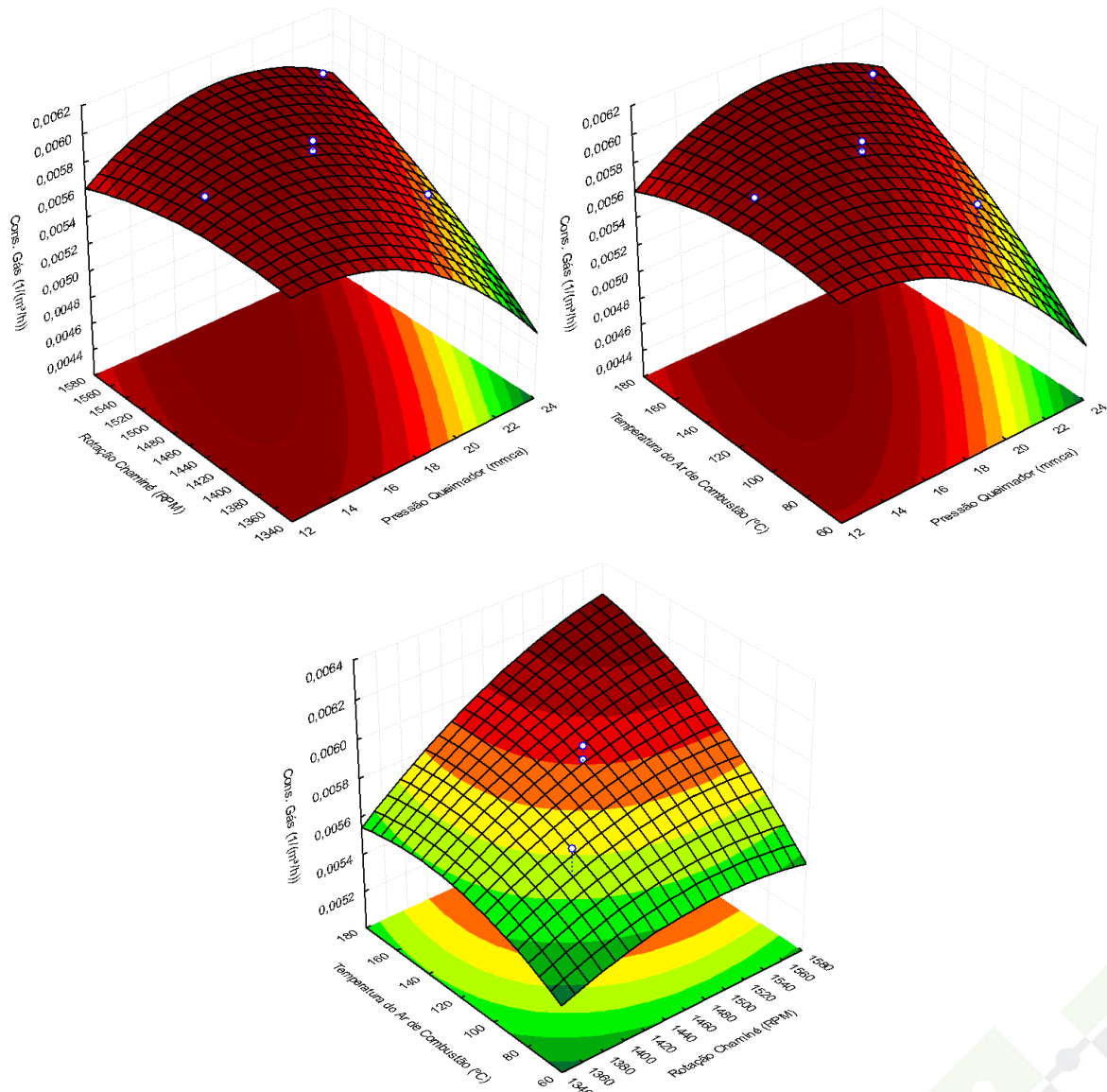
A partir da análise dos dados foi identificado que as três variáveis críticas são relevantes no consumo de gás do equipamento. Sendo que cada uma apresentou seu grau de significância, ou seja, o quanto elas têm potencial de interferir no consumo de combustível do equipamento. Foi obtida a seguinte ordem de significância para as variáveis:

- Pressão de ar dos queimadores;
- Temperatura do ar de Combustão; e
- Rotação da chaminé.

Na Figura 24 são apresentadas as superfícies de resposta obtidas com a interação das variáveis críticas com o consumo de gás (invertido): (a) Pressão de ar dos queimadores x Temperatura do ar de Combustão; (b) Pressão de ar dos queimadores x Rotação da Chaminé; e (c) Temperatura do ar de combustão x Rotação da Chaminé.

Figura 24

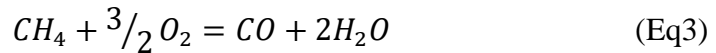
Superfícies de resposta do consumo de gás em função das variáveis críticas



Fonte: Autor, 2023

Avaliando a Figura 24 (a) observa-se que a medida que a pressão de ar aumenta o consumo de combustível se eleva. Isso é explicado em estudos de Ferrer et. al (2019) e Ruivo et. al. (2021). Uma vez que a pressão de ar está diretamente ligada a sua vazão conforme apresentado na Figura 21 que relaciona o fluxo de ar em Nm³/h com as variáveis de pressão de ar e temperatura. Observa-se que nos pontos de piora do consumo há excesso de ar. Isso ocorre pois o ar utilizado é o ar atmosférico que em sua maioria o Nitrogênio é inerte no processo de combustão. O nitrogênio não fornece energia de reação química para o sistema, ele é aquecido até a temperatura interna do equipamento e depois foi retirado pela chaminé de entrada arrastando a energia usada em seu aquecimento.

Quantidades muito reduzidas de ar impactam em combustão incompletas e com isso parte da energia potencial contida no gás natural não é convertida em calor. A reação incompleta do metano é apresentada na Equação 3:



Segundo dados termodinâmicos de Smith et al. (2019) a reação de formação de 1 mol de CO gera 282.984 j/mol a menos que a reação completa que converter todo o carbono para CO₂.

Avaliando o impacto da temperatura do ar de combustão foi evidenciado que temperaturas mais elevadas contribuem para a redução do consumo de gás natural. Essa relação é explicada pois o ar aquecido transporta energia para dentro do sistema, reduzindo a demanda da energia de reação do gás natural e consequentemente limita o uso para manter a temperatura. Essa relação é amplamente sugerida em estudos de reaproveitamento de calor conforme apresentado por Jouhara et. al. (2018) e Castro Oliveira et. al (2020). Em sua pesquisa Ferrer et. al (2019) apresenta que 96,39 % da energia de entrada do equipamento estudado provêm do gás natural, considerando o ar de combustão entrando a 30°C. Para compreender essa relação é preciso avaliar a forma de operação do controle de temperatura do equipamento. O forno monitora a temperatura da câmara de combustão, ou do túnel em determinado ponto e ajusta a vazão de gás para manter essa temperatura no padrão. Quando aumentamos a energia de entrada por meio do uso de correntes aquecidas a demanda por energia proveniente da reação química reduz e o sistema ajusta a vazão de gás a menor para manter o equilíbrio.

Calculando o ganho de energia caso esse ar fosse elevado para 120°C, ponto central da temperatura nesse estudo, a demanda reduziria 4,2%, o que representa uma redução no consumo de combustível de 529 Nm³/dia. Para o equipamento avaliado a vazão de ar de combustão desse estudo a cada 32°Cs na temperatura da corrente é esperada a redução de 1% da demanda de gás natural, considerando a relação ar x gás de 1:1.

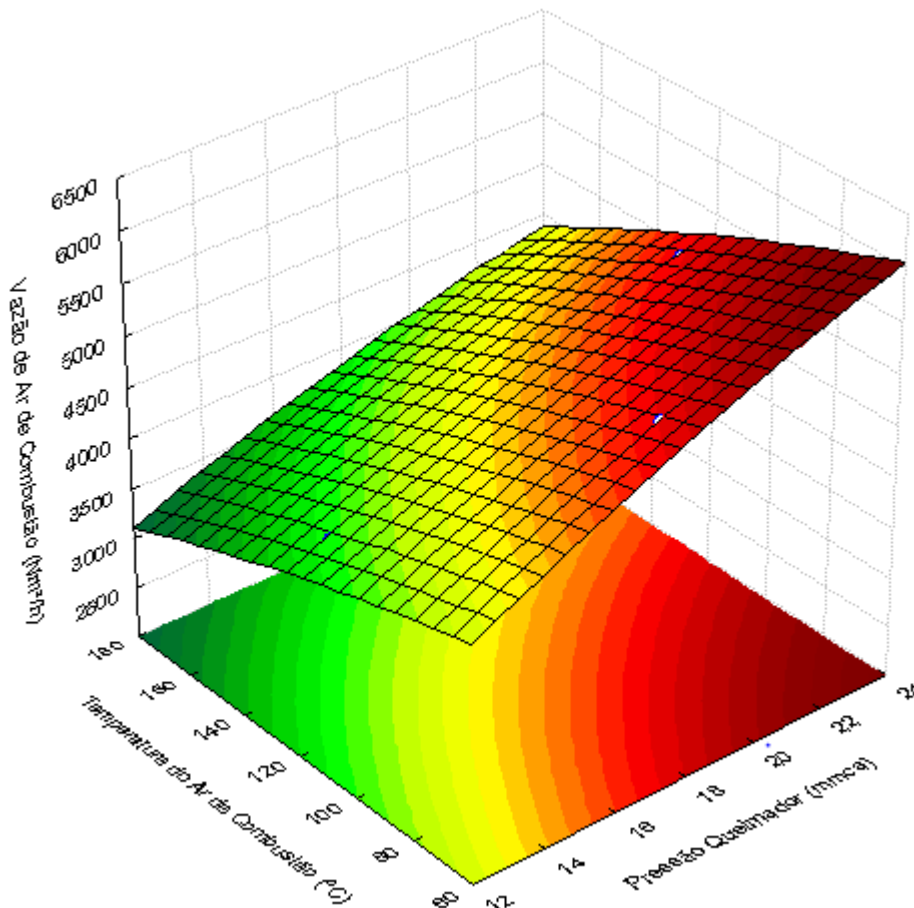
Comparando o consumo de gás nos pontos de onde foram testadas as temperaturas 70°C e 170°C, rodadas 13 e 14 do experimento foi observada uma variação para menos de 6,15% no consumo de gás com o aumento da temperatura, essa variação foi acima do esperado a partir do cálculo anterior, esse impacto está associado ao fato que os cálculos foram realizados com base em uma vazão mássica de ar constante, enquanto os testes foram realizados em vazão volumétrica constante, assim a medida que o ar é aquecido perde vazão mássica e houve um

ganho maior que o esperado. Observando a Figura 24 (b) fica evidente uma zona onde o consumo começa a elevar mesmo com temperaturas de ar elevada.

A Figura 18 mostra a variação mássica de ar na relação vazão de ar de combustão x temperatura do ar de combustão x pressão do queimador.

Figura 25

Variação vazão mássica de ar



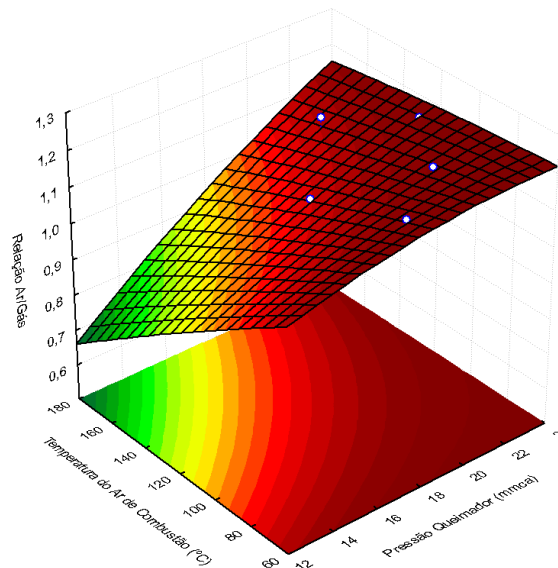
Fonte: Autor, 2023

Essa região possui a característica de menor vazão mássica de ar, conforme mostrou a Figura 25, isso ocorre pois os queimadores estão com baixa pressão de ar e a densidade do ar está baixa devido a temperatura, saindo de 1,012 kg/m³ quando está operando com 70 °C para 0,821 kg/m³ quando está com 150 °C. Isso impacta diretamente na relação ar x gás para a combustão.

A Figura 26 apresenta a relação das variáveis de pressão de ar dos queimadores com a temperatura do ar de combustão na variável de resposta relação ar x gás.

Figura 26

Varição da relação ar x gás em função da pressão de ar e temperatura do ar



Fonte: Autor, 2023

Observa-se que as áreas das duas figuras não apresentam o mesmo perfil, isso ocorre, pois, a vazão de ar é dependente apenas das variáveis pressão dos queimadores e temperatura, enquanto a relação ar x gás carrega consigo todos os efeitos que interferem no consumo de combustível. É possível observar também que a medida que a temperatura do ar sobe a relação ar x gás diminui chegando a valores abaixo de 1,0. Abaixo desse ponto o sistema não injeta ar suficiente nos queimadores para que ocorra a queima completa do gás natural e com isso ocorra o aumento do volume de CO gerado e queda da liberação de energia pela reação de combustão

Observa-se que a região de melhor consumo está associada a relação ar x gás próxima de 1,0. Avaliando termicamente a condição de operação nesse ponto é onde é obtida a melhor relação de gás x energia produzida, conforme apresentado por Ferrer et. al (2019). Porém o mesmo estudo sugere que é preciso operar com excesso de ar na ordem de 10%, relação ar x gás de 1,1 visando uma melhor operação do equipamento. Essa explicação está ligada com as reações físico-químicas apresentadas na Tabela 1 e nos estudos de oxidação de material que apontam que o material cerâmico precisa de oxigênio para realizar as transformações necessárias. Os impactos no produto serão avaliados na sessão 4.4 Avaliação da estabilidade do produto.

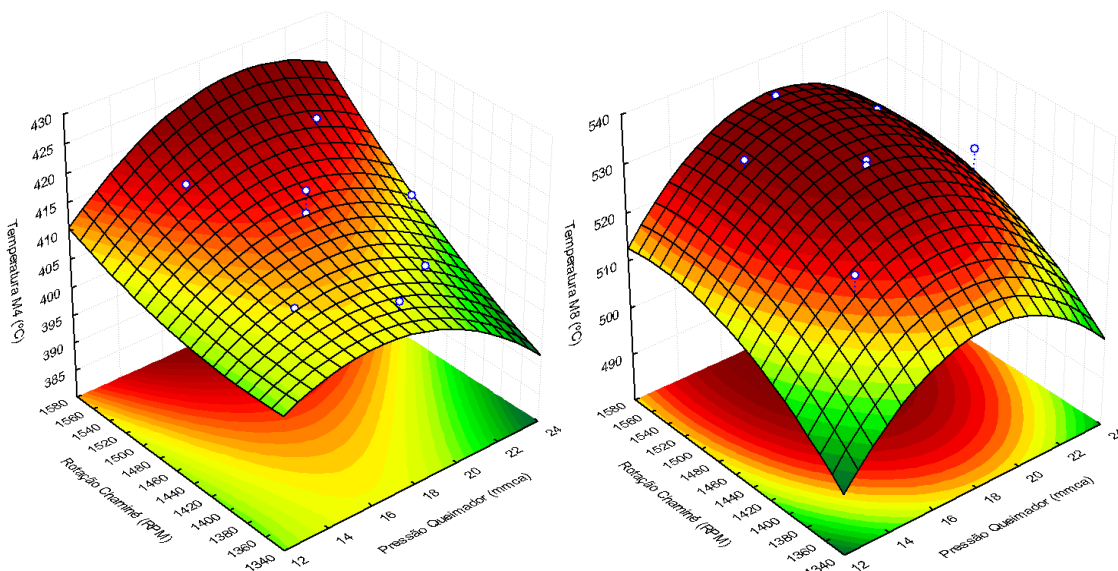
Ficou claro que a partir do ponto que a condição de operação se afasta do 1,0 a demanda por gás natural tende a se elevar, independente se para mais ar ou menos ar no processo. Avaliando a Figura 24 (b) percebe-se a mesma tendência quanto a pressão de ar, que verificando a relação ar x gás através da Figura 26 o valor de 1,0 está no entorno da pressão de 16 mmca de ar, coincidindo com o ponto de melhor condição de operação.

Os melhores resultados de consumo de gás, Figura 24 (a) e Figura 24 (c) aconteceram durante a elevação da rotação da chaminé. Esse efeito foi mais significativo principalmente para maiores vazões de ar. Esse resultado se mostra contrário ao esperado, uma vez que estudos de balanço de massa e energia em fornos cerâmicos indicaram que a corrente de exaustão de fumo é uma das maiores perdas de energia do sistema Ferrer et. al (2019) e Utlu & Hepbaşlı (2014) e o aumento da rotação da chaminé eleva a vazão dessa corrente, consequentemente a sua vazão de energia perdida.

Analisando o perfil de temperatura dos módulos de entrada, Figura 27 (a) e (b), onde (a) representa o ponto de medição que está a 8,4 m da chaminé e (b) está a 16,8m da chaminé, foi percebido que a temperatura nessa região se leva com o maior exaustão, isso ocorre pois os gases quentes das zonas seguintes são trazidos para a entrada do forno

Figura 27

Variação da temperatura da entrada do forno em função da pressão de ar e da rotação da chaminé



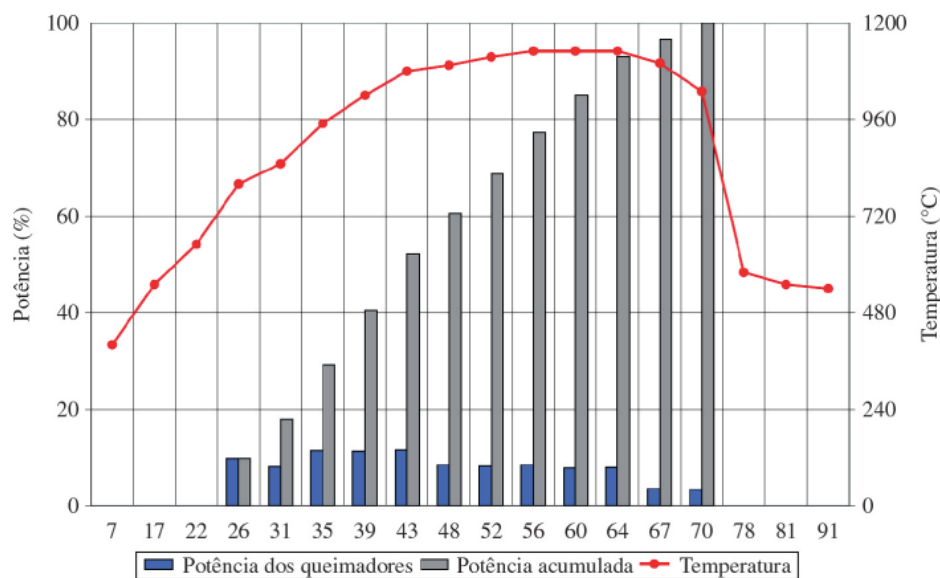
Fonte: Autor, 2023

Devido o perfil crescente da curva de queima esses gases são mais quentes que a região que estão adentrando contribuindo assim para elevar a temperatura e reduzir a demanda por energia térmica proveniente do gás natural. Isso auxilia as regiões de entrada do forno uma vez que nas fases iniciais do processo a demanda térmica é maior conforme apresentado na Figura 28, pois o produto está a uma temperatura distante em relação a temperatura prevista para a região do equipamento. térmica.

A Figura 28 apresenta a condição normal de operação do sistema de aquecimento de um forno a rolo industrial. A linha vermelha representa a curva de queima definida para o processo, nela observa-se o aquecimento gradual até atingir o patamar de queima, módulo 56, e depois a queda de temperatura no resfriamento, módulo 70. As barras azuis representam a potência térmica em percentual da região controlada. Assim os primeiros módulos apresentam maior demanda de energia. Essa relação é explicada pela demanda térmica para o aquecimento do produto conforme apresentado por Cargnin (2010) juntamente com as reações químicas que ocorrem nessa etapa do processo, conforme apresentado na Tabela 1. A medida que o processo avança a demanda térmica fica menor chegando ao menor ponto no final do patamar de queima. A medida que o processo avança a diferença de temperatura diminui conforme apresentado por Cargnin (2010) e conseqüentemente a demanda por energia térmica, mesmo em temperaturas mais elevadas. Assim o aumento da rotação da chaminé irá arrastar para a entrada gases com temperaturas elevadas de uma região com menor demanda térmica para regiões com maior demanda

Figura 28

Potência térmica dos queimadores



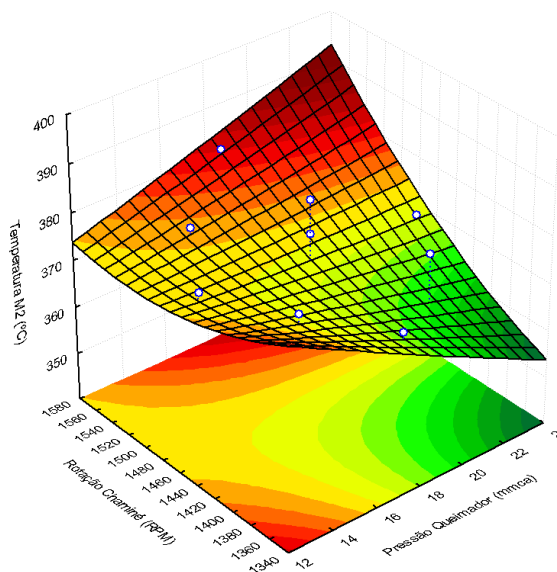
Fonte: Monfot et. al, 2013

Observa-se que a variação da rotação apresentou um impacto pequeno na temperatura do módulo 2, variando entre 370°C e 384°C conforme a Figura 29, que apresenta a resposta da temperatura no módulo 2 com a variação das variáveis Pressão de ar dos queimadores e Rotação da chaminé.

Essa variação só foi significativa próximo a captação da chaminé, apenas em rotações muito elevadas quando associadas a excesso de ar de combustão, regiões com relação ar x gás acima de 1,0, o que indica que o calor trazido da zona de queima foi absorvido pelo processo e com isso não representou um aumento de energia na corrente de saída.

Figura 29

Variação da temperatura do Módulo 2 em função da vazão de ar e da temperatura do ar de combustão

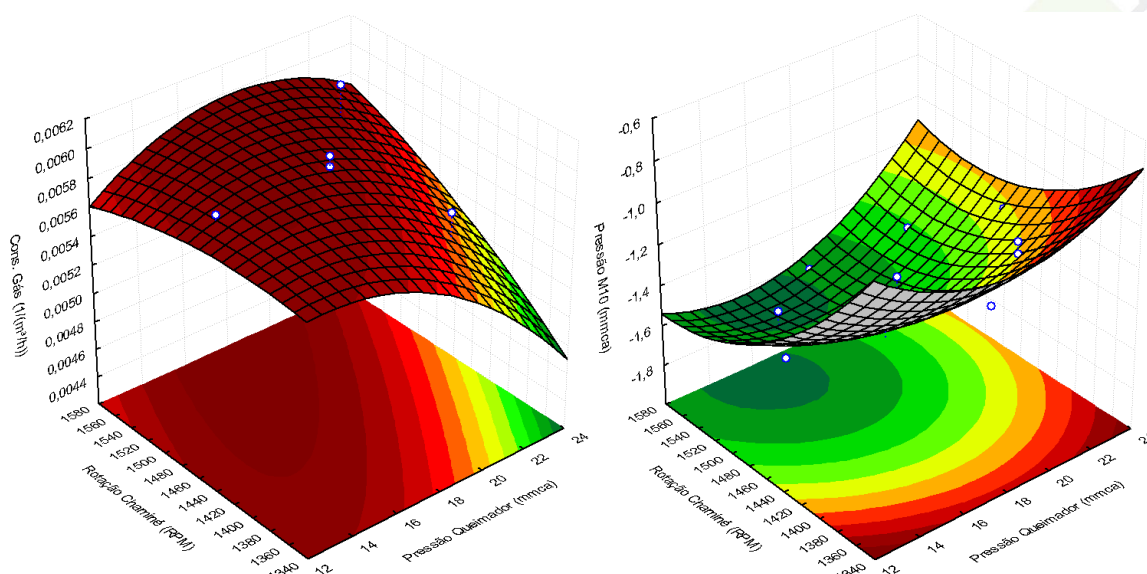


Fonte: Autor, 2023

Comparando as superfícies de resposta da pressão interna no ponto M10 e o consumo de gás em função das variáveis pressão de ar nos queimadores e rotação da chaminé, Figura 30 (a) apresentando a variação do consumo de gás (inverso) em função das variáveis Pressão de ar dos queimadores e Rotação da Chaminé e (b) variação da pressão interna do equipamento. Observa-se que o ponto de menor pressão coincide com o ponto de menor consumo de gás indicando que pressões mais baixas nesse ponto auxiliam para reduzir a demanda de gás natural no equipamento.

Figura 30

Comparação dos resultados do consumo de gás com a pressão interna do forno



Fonte: Autor, 2023

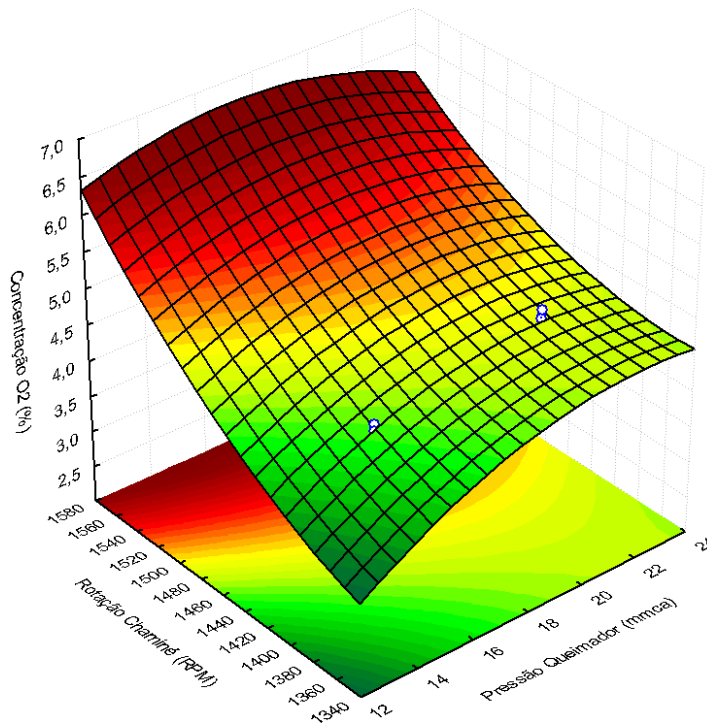
Essa condição está associada ao arraste da temperatura para a região de entrada do equipamento, conforme avaliado na análise das temperaturas de entrada. De fato, a pressão interna está associada a pressão de ar nos queimadores, e conseqüentemente a sua vazão de ar que eleva a pressão e a vazão arrastada pela chaminé de entrada, onde quanto maior a exaustão menor será a pressão interna do equipamento. Assim pressões internas menores apresentam melhores resultados em consumo de combustível.

4.3 AVALIAÇÃO DA ATMOSFERA INTERNA DO EQUIPAMENTO

Ao longo dos testes foi monitorada a atmosfera interna do equipamento na região próxima a chaminé de fumos, essa que é responsável por retirar do equipamento os gases gerados no processo de combustão e gases eliminados pelo produto durante seu tratamento térmico. Foi escolhido o módulo 2 do equipamento, local mais próximo a chaminé com possibilidade de medição, como ponto de medição, sua temperatura variou a temperatura entre 355 °C e 385 °C, onde segundo os dados da Tabela 1 não ocorrem reações que liberam ou consomem os gases avaliados, O₂, CO e CO₂. A Figura 31 apresenta a variação da concentração de Oxigênio dentro do forno.

Figura 31

Variação da Concentração de O₂



Fonte: Autor, 2023

Observa-se que a concentração de oxigênio variou entre 4,31% e 6,22%. Esses valores se apresentaram acima do esperado uma vez que a quantidade de O₂ injetada pelos queimadores não permitiria essa sobra. O ponto com maior excesso de oxigênio do estudo possui 120% de ar injetado no equipamento o que resultaria em uma sobra de ar de 3,22%, valor inferior ao de 4,31% que foi o menor valor obtido. Essa comparação foi realizada sem considerar o uso de O₂ pelo produto produzido o qual possui reações de oxidação de materiais orgânicos e óxidos presentes em sua composição conforme apresentado por Cargnin (2010).

Outra característica observada foi que a presença de oxigênio foi influenciada pela rotação da chaminé. Isso indica que a exaustão está realizando o arraste de gases de fora da região de combustão até a entrada do forno. Milani et. al (2017) avaliou em suas simulações que é possível realizar a captação do ar utilizado no resfriamento direto e direcionar ele para auxiliar na região de combustão.

Essa proposta se mostrou mais vantajosa do ponto de vista energético pois o ar que seria injetado através dos queimadores a uma temperatura na faixa de até 200 °C passa a ser injetado diretamente pelo túnel com temperaturas que podem chegar a mais de 400 °C. Assim é possível

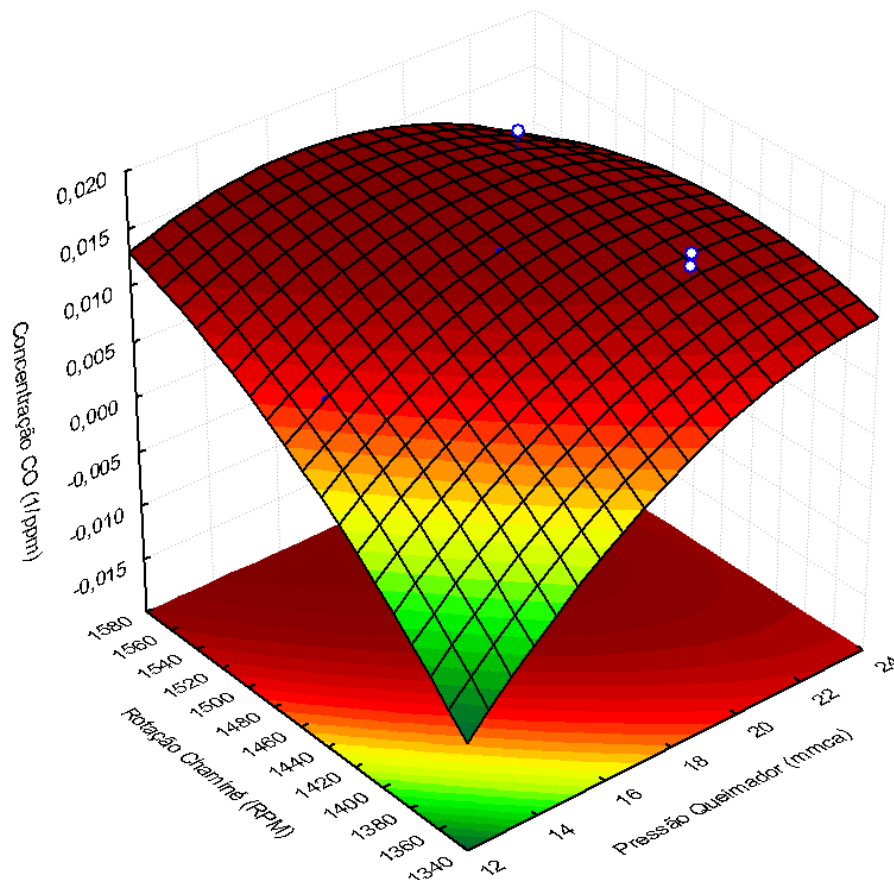
manter a vazão mássica de ar atmosférico no sistema que irá contribuir com mais energia. Essa característica é observada no estudo uma vez que na Figura 24 (a) o melhor ponto de consumo de gás está com a rotação mais elevada da chaminé e a relação ar x gás está próxima da estequiométrica.

Esse valor pode ser elevado por meio de regulagens no resfriamento do forno para permitir que o ar fique com temperatura de saída mais elevada. Essa sugestão é citada por Ferrer et. al.(2019) onde é apontado que elevando a temperatura de resfriamento é possível reduzir a perda de exergia do sistema e com isso elevar a eficiência. Esses ajustes irão interferir no ciclo de resfriamento do produto o que precisa ser acompanhado para evitar a formação de trincas conforme apontado por Vieira (2002) e Milani et. al. (2019).

A Figura 32 mostra variação de CO, eixo invertido, em função da pressão de ar nos queimadores e da rotação da chaminé.

Figura 32

Variação do Percentual de CO em função das variáveis críticas



Fonte: Autor, 2023

Observou-se que na região onde há pouco ar sendo injetado pelos queimadores ocorre elevação das concentrações de CO indicando que falta oxigênio para que fossem realizadas as reações de combustão. Isso representa perda de eficiência energética pois a conversão de CO em CO₂ é uma reação isotérmica que libera 2492 kcal/kg de CO consumido (Smith et al., 2019).

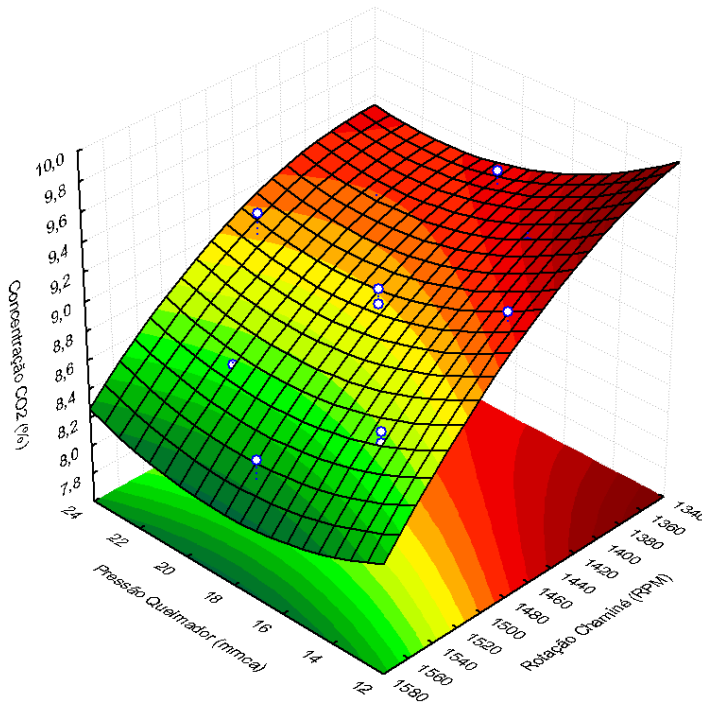
Essa característica ocorre para condições de baixa rotação da chaminé, a medida que a rotação se eleva a concentração de CO diminui, esse fato tem relação com a elevação da quantidade de oxigênio disponível no sistema proveniente do resfriamento direto, com isso o CO consegue reagir para CO₂ condição essa que tem correlação com a queda do consumo observada na Figura 24 (a).

Porém a medida que se eleva a pressão de ar e a rotação aos limites superiores do estudo se observa a inversão da curva onde há o aumento da concentração de CO. Observa-se aqui o aumento da demanda de gás natural para compensar a queda de temperatura do forno causada pelo aumento de ar no sistema além do necessário para o processo, essa condição exige que os queimadores trabalhem com vazões mais elevadas de gás o que dificulta a realização de uma mistura adequada de ar e gás, o que, conseqüentemente, causa a elevação da concentração de CO.

A Figura 33 apresenta o percentual de CO₂ em função das variáveis de pressão de ar nos queimadores e rotação da chaminé.

Figura 33

Variação de CO₂ em função das Variáveis Rotação da Chaminé e Pressão de ar dos queimadores



Fonte: Autor, 2023

Na relação com a variação da pressão de ar dos queimadores observa-se um ponto mínimo na região de 18 mm de ar, região essa onde nas condições de temperatura do ar de combustão de 120°C, condição da Figura 24, a relação ar x gás está em 1:1, operando na condição estequiométrica. Essa condição apresentou a menor demanda de combustível para a operação do equipamento.

O destaque para a variação do percentual de CO₂ está na rotação da chaminé. Rotações da chaminé elevadas mostraram uma queda elevada no percentual de dióxido de carbono, porém essa queda não veio acompanhada de uma queda proporcional de consumo de combustível, conforme visto na Figura 24. Essa variação está associada a diluição do gás devido ao aumento do fluxo de exaustão do equipamento onde, conforme avaliado anteriormente, arrasta parte do volume de ar do resfriamento para a região de queima e posteriormente esse volume é expelido através da chaminé de entrada do forno.

Considerando uma atmosfera interna que possuísse apenas o produto da combustão completa e com relação Ar x Gás de 1 a expectativa era a presença de CO₂ na ordem de 10,3% e para um cenário com relação ar gás de 1,2 esse valor seria de 9,4%. No estudo o maior valor obtido foi de 9,38%, já considerando a liberação de CO₂, considerando nesse número a

liberação do gás proveniente das reações do produto. Logo os valores obtidos ficaram abaixo do esperado, o que indica a entrada de outros gases que não são provenientes do processo de combustão

Assim não é possível obter uma relação direta entre os níveis de CO₂ na atmosfera do equipamento com o consumo de gás uma vez que sua variação se apresenta mais dependente da proporção de origem do fluxo gasoso, zona de queima ou resfriamento, do que da injeção de gás natural no sistema.

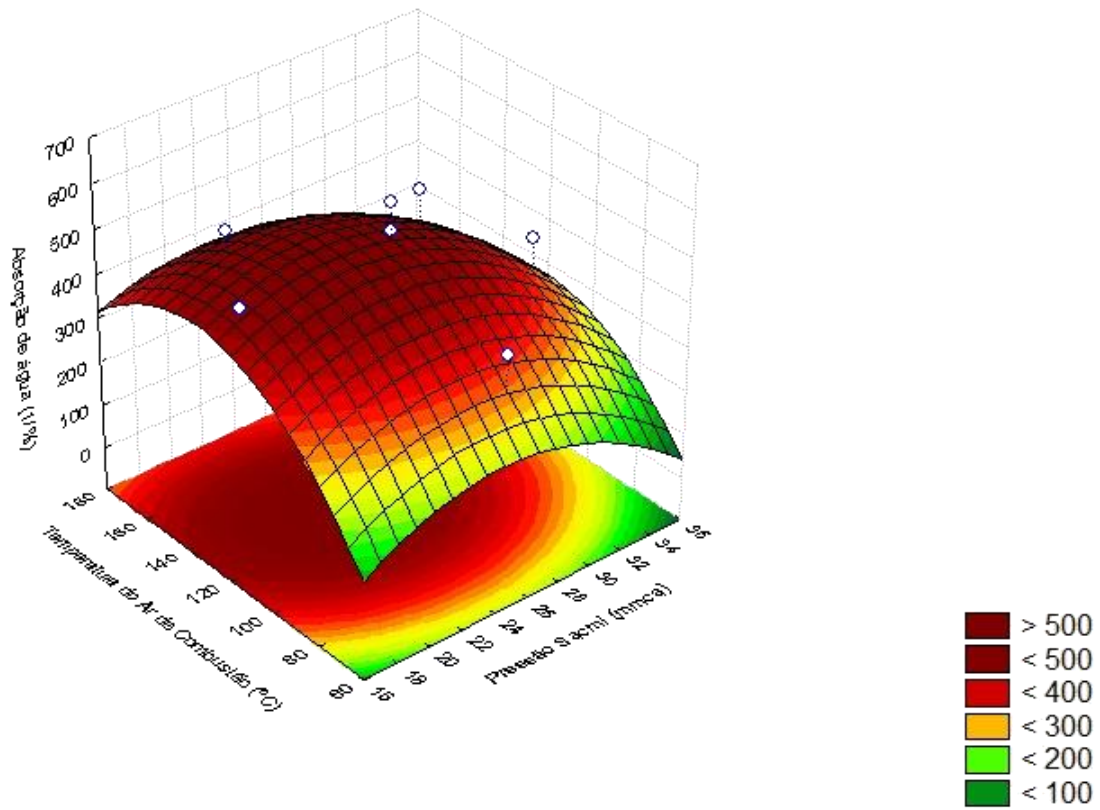
Avaliando os resultados pode-se observar que para um melhor rendimento no consumo de gás do equipamento a quantidade de CO deve ser a menor possível pois essa condição representa maior aproveitamento de energia do gás utilizado. A vazão de O₂ mais elevada coincide com melhores consumos, porém essa deve estar associada a melhor vazão mássica de ar de combustão, relação ar x gás de 1:1, ou seja a elevação do oxigênio deve ser uma resposta do sistema ao aproveitamento do ar do resfriamento através do túnel, sem elevar a injeção nos queimadores.

4.4 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO PRODUTO

Em cada condição de operação testada foram levantadas as variações ocorridas no produto final com base nas características técnicas definidas por norma. A primeira variável avaliada foi a absorção de água que é a característica base para o produto ser classificado como porcelanato. Os resultados estão apresentados na Figura 34.

Figura 34

Variação da Absorção de Água com a Pressão de ar dos queimadores e a Temperatura de ar de Combustão



Fonte: Autor, 2023

Foi observado que todas as condições de operação testadas atenderam os requisitos da norma. Destaque para as condições centrais onde o valor de absorção de água ficou abaixo de 0,2%, isso sugere que nessa configuração seria possível reduzir temperaturas ao longo da curva de queima, o que irá ajudar no consumo de combustível. Construindo a Superfície de resposta da absorção de água em função das variáveis críticas, Figura 34 percebe-se uma relação entre ela e a temperatura dos módulos de entrada, Figura 27 (b)

Com relação a variação de tamanho entre as peças, essa variável não é requisito de norma para o produto estudado uma vez que o revestimento passará pelo processo de retífica, onde ele passará por um desgaste lateral que irá corrigir eventuais variações dimensionais. Porém esse parâmetro é um bom indicador quanto a estabilidade de queima do equipamento. Verificando a significância das variações foi percebido que a modificação das variáveis críticas não tem influência nessa característica do produto.

Quanto a condição de curvatura lateral das peças, indicador de planaridade do produto foi observado que não houve impacto significativo nessa variável. Assim as diferentes condições de operação testadas não prejudicam essa característica do produto.

4.5 INDICADORES DE DESEMPENHO

Ao longo da avaliação dos resultados foram observadas condições de operação que indicaram melhores resultados na eficiência energética dos equipamento. Essas condições podem ser divididas em dois seguimentos: o primeiro associado a variáveis controladas pela operação, ou seja, variáveis ajustadas no equipamento. O segundo representa variáveis de resposta, são as variáveis que dependentes do estudo, elas não são controladas diretamente pela operação, mas sim consequências das demais.

4.5.1 Variáveis controladas

A principal variável controlada no estudo que possui potencial para interferir no consumo de combustível no forno é a vazão de ar nos queimadores. Essa variável no estudo foi convertida em pressão de ar no corpo do queimador. A avaliação do DCCR apresentou que os melhores resultados de consumo de gás foram obtidos com a relação Ar x Gás de 1:1, sendo que para condições de operação que se afastam dessa margem a demanda por combustível se eleva. Logo essa variável se apresenta como um bom indicador para ver se o equipamento está operando dentro da condição adequada. Para tanto é possível utilizar um sistema gráfico semelhante a Figura 22.

Importante ressaltar que durante os testes do estudo o ar foi distribuído igualmente entre os queimadores, porém correlacionando os dados da Figura 28 com medições de pressões de gás realizadas no equipamento foi observado que a pressão de gás nos queimadores próximos ao final da zona de queima é menor vazão de gás, assim sua demanda de ar também reduz. Fica como sugestão para estudos futuros estudar o impacto da distribuição de ar ao longo do forno na eficiência energética.

Sobre a temperatura do ar de Combustão quanto maior a temperatura menor a demanda de combustível da máquina. Porém a mesma precisa ser estável uma vez que a temperatura do ar interfere na sua densidade que atua diretamente na vazão mássica da corrente. Isso pode causar instabilidade na operação do equipamento uma vez que não será possível controlar a

quantidade de comburente no sistema. A solução para essa condição é aplicar um sistema de monitoramento automático da temperatura, onde o próprio equipamento irá se ajustar.

4.5.2 Variáveis de Resposta

Foi observado ao longo do estudo que ter temperaturas mais elevadas antes do início dos queimadores está relacionada a menores consumos de combustível. Isso se justifica pois o calor excedente das zonas mais quentes está sendo trazido para a entrada do forno e aumentando a energia térmica do local, e com isso, a energia necessária da combustão reduz. No equipamento estudado essa região fica a 21 m da entrada do forno, sendo que durante os testes sua temperatura variou de 550°C a 572°C.

A pressão interna do equipamento na região próxima a chaminé se mostrou um indicador de eficiência. Quanto menor a pressão nesse ponto menor o consumo de combustível. Esse parâmetro pode ser avaliado como a capacidade de aspiração do ar das zonas mais quentes para as mais frias e assim auxiliar na demanda térmica delas.

4.6 TESTE DE LONGA DURAÇÃO

Com base nos resultados da pesquisa foi selecionada uma configuração do equipamento para ser acompanhado ao longo de 7 dias de produção. A Tabela 4, apresenta comparação entre as condições anteriores de operação do forno com a proposta do estudo para as variáveis críticas estudadas.

Tabela 4

Comparação das Condições de Operação

Variável	Condição Original	Condição Proposta
Pressão de ar nos queimadores (mmca)	26	20
Temperatura do ar de combustão (°C)	145	160
Rotação da chaminé (RPM)	1460	1580

Fonte: Autor, 2023

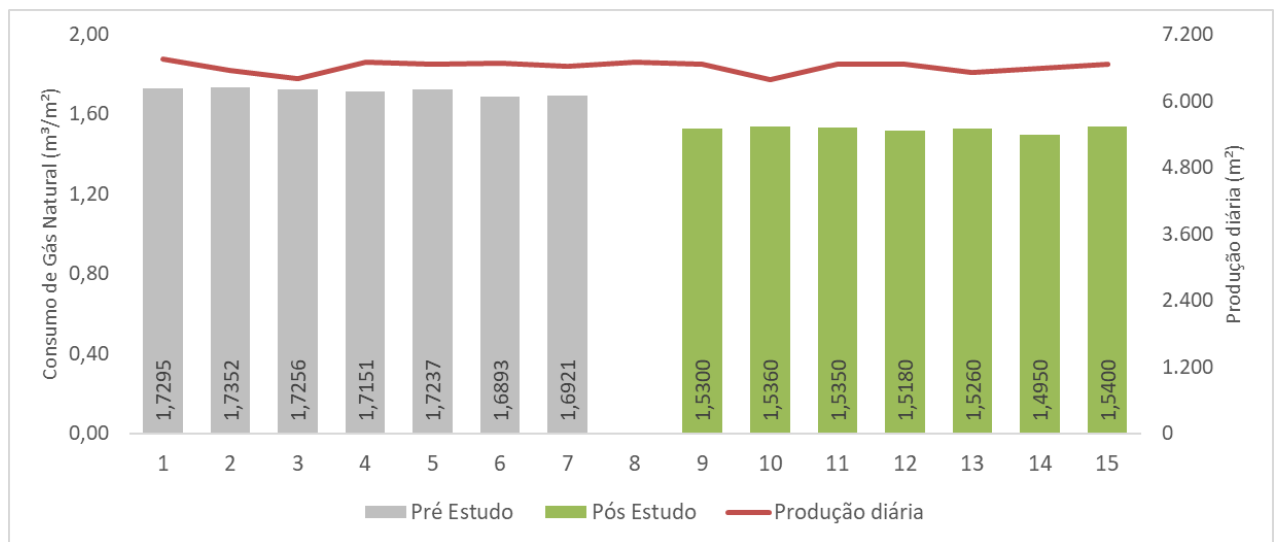
Ao longo do período acompanhado a curva de queima sofreu ajustes para compensar variações de processo devido a oscilações de matérias primas. A produção diária não teve

grandes variações ao longo dos dias, salvo por pequenas paradas devido a problemas na máquina que alimenta o forno.

A Figura 35, apresenta a comparação do consumo de combustível das duas condições de operação, os primeiros sete dias representam a condição inicial de operação e os sete dias seguintes a condição obtida com a aplicação do estudo. Sendo as barras o consumo específico de combustível em Nm^3 de gás/ m^2 de produto processado. E a linha representa a produção do dia em m^2 de produto por dia. O dia 8 não foi considerado como medição pois nesse dia foram realizadas as alterações no forno para passar da condição anterior para a condição nova.

Figura 35

Resultado do teste de longa duração



Fonte: Autor, 2023

Comparando os dois períodos foi identificada a redução de 11% no consumo de combustível do forno estudado. Onde o forno possuía um consumo específico de $1,7158 \text{ Nm}^3/\text{m}^2$ e passou a consumir $1,527 \text{ Nm}^3/\text{m}^2$. Esse valor foi próximo do obtido com a aplicação do DCCR onde a redução estimada foi de 12,9%. Essa variação está associada a regulagens que foram necessárias ao longo dos dias devido a variação das condições de matéria prima onde foi necessário modificar pontos da curva de queima o que impacta diretamente na condição de consumo de gás.

4.7 APLICABILIDADE DO ESTUDO

A avaliação realizada é caracterizada como estudo de caso. Assim os valores de referência dos resultados obtidos são específicos para o equipamento estudado, podendo apenas ser estimados para equipamentos semelhantes.

Avaliando a metodologia e a sua aderência com outros estudos de eficiência energética em fornos cerâmicos é possível realizar esse planejamento em diferentes fornos, sendo cada qual com suas respectivas faixas de operação das variáveis críticas e obter as melhores condições de operação para os equipamentos.

Todas as variáveis críticas avaliadas no estudo foram relevantes para o consumo de combustível. Como a dinâmica de operação dos diferentes fornos é a semelhante é possível aplicar a avaliação das mesmas variáveis para qualquer forno para analisar o melhor ponto de operação.

Outro ponto a ser considerado é que durante os testes não houve impacto significativo nas características do produto. Assim essas regulagens podem ser realizadas sem causar impactos na qualidade dos revestimentos.

Quando a aplicação em outros equipamentos térmicos da cerâmica a metodologia pode ser aplicada, porém, é preciso avaliar quais as variáveis mais relevantes para o equipamento que foi estudado, como por exemplo os secadores de peças, onde o reciclo de ar é uma variável que impacta diretamente o rendimento térmico da máquina.

A tradução das variáveis críticas para variáveis de processo permitiu uma difusão eficiente dos achados da pesquisa. Uma vez que os controles estão no dia a dia da operação o entendimento fica simplificado e conseqüentemente a manutenção de condições eficientes é simplificada. Apresentar conceitos de vazões mássicas de gases ou vazão de aspiração da chaminé são de difícil associação com o cotidiano da operação, a partir da tradução desses termos em pressão de ar nos queimadores e abertura da chaminé foi possível perceber uma melhora no entendimento do projeto e em como realizar a manutenção da condição ótima.

Avaliando a aplicação do estudo no setor a metodologia proposta no trabalho pode ser aplicada em todos os fornos do setor, desde que sejam feitos os ajustes nos limites das variáveis críticas, uma vez que cada equipamento possui sua região de operação. Por meio dessa aplicação será possível contribuir para a redução do consumo de combustível nos fornos a rolo e, conseqüentemente, contribuir para reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Assim a aplicação do estudo irá impactar diretamente na redução de custos operacionais com a economia no consumo de gás natural e ao mesmo tempo o menor consumo de gás irá reduzir as emissões

geradas, dessa forma contribuindo para uma condição ambiental melhor no entorno das empresas. Sendo hoje o forno a rolo o equipamento mais difundido no processo de revestimentos cerâmicos a pesquisa pode alcançar diferentes polos produtores em diferentes países, e incentivando novas formas de avaliação dos equipamentos buscando elevar o conhecimento sobre eficiência dos equipamentos térmicos.

Aliado a esse ponto o estudo reforçou a importância de controle dos parâmetros de relação ar e gás para os queimadores e a importância de manter o ar de combustão aquecido para trabalhar com menor demanda térmica. Esses fatores quando controlados já contribuem para manter o consumo de combustíveis em níveis menores.

Do ponto de vista da tradução das variáveis críticas para controles próximos da operação o estudo contribuiu para a disseminação do conhecimento. Esse apoio faz com que a equipe de operação tenha capacidade de se envolver no controle da eficiência energética e ter facilidade em acompanhar a operação da máquina com foco nesse critério.

Como proposta para trabalhos futuros é interessante avaliar outras variáveis do equipamento como curva de queima e condições de resfriamento para correlacionar as mesmas com a eficiência energética contribuindo ainda mais com a evolução do tema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da metodologia se mostrou eficaz na avaliação das condições de operação do equipamento frente ao consumo de energia térmica, aqui representado pelo consumo de gás natural. Observou-se que as variáveis estudadas interferem no resultado do consumo de combustível. Falando das condições do ar de combustão, vazão e temperatura, os resultados obtidos foram alinhados com o descrito nas bibliografias do tema. Assim a melhor condição de vazão de ar é aquela que se aproxima da relação estequiométrica para a reação de combustão e a temperatura do ar quanto mais elevada menor será a demanda por combustível.

Quanto a rotação da chaminé os resultados foram distintos do esperado. Assim com o aumento da vazão na chaminé foi observado uma redução no consumo de gás natural. Mudança essa associada ao melhor aquecimento das zonas de entrada do forno, melhorando assim a absorção de energia pelo produto processado.

Quando ao impacto no produto não houve impactos significativos nas características técnicas. Validando assim as condições de operação aplicadas no equipamento.

Avaliando as medições internas do equipamento foi percebido que a temperatura na região imediatamente anterior aos queimadores é um indicador importante para o sistema, a medida que essa temperatura sobe pode-se perceber que o consumo de combustível reduz. Da mesma forma a pressão de ar nessa região também é associada a demanda de gás. Pressões menores contribuem para melhorar a eficiência energética, fato esse associado ao aquecimento das regiões de entrada, onde a queda de pressão causa o deslocamento dos gases quentes para a entrada do forno.

A metodologia de aplicação do DCCR se mostrou válida para o equipamento estudado, contribuindo para avançar na eficiência energética do forno avaliado. O resultado indica que a mesma pode ser aplicada em outros fornos para mapear os mesmos indicadores de eficiência energética.

Como proposta para estudos futuros sugere-se estudar condições de operação com diferentes curvas de queima e variáveis no resfriamento buscando melhores resultados de eficiência energética.

REFERÊNCIAS

- Alves, H. J., Melchiades, F. G., & Boschi, A. O. (2007). Levantamento Inicial do Consumo de Energias Térmica e Elétrica na Indústria Brasileira de Revestimentos Cerâmicos. *Cerâmica Industrial*.
- Alves, H. J., Melchiades, F. G., de Brito, H. B., & Boschi, A. O. (2010). Análise do Consumo de Energia Térmica no Setor Brasileiro de Revestimentos Cerâmicos. *Cerâmica Industrial*.
- Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. (2024, junho). *Números do Setor Cerâmico*. Anfacer. <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>
- Baker, C. G. J., & McKenzie, K. A. (2005). Energy Consumption of Industrial Spray Dryers. *Drying Technology*, 23(1–2), 365–386. <https://doi.org/10.1081/DRT-200047665>
- Bornia, A. C. (2010). *Análise gerencial de custos aplicação em empresas modernas* (Atlas, Org.; 3º ed).
- Boschi, G., Masi, G., Bonvicini, G., & Bignozzi, M. C. (2020). Sustainability in Italian Ceramic Tile Production: Evaluation of the Environmental Impact. *Applied Sciences*, 10(24), 9063. <https://doi.org/10.3390/app10249063>
- Branchini, L., Bignozzi, M. C., Ferrari, B., Mazzanti, B., Ottaviano, S., Salvio, M., Toro, C., Martini, F., & Canetti, A. (2021). Cogeneration Supporting the Energy Transition in the Italian Ceramic Tile Industry. *Sustainability*, 13(7), 4006. <https://doi.org/10.3390/su13074006>
- Bristot, V. M. (1996). *Máquinas e equipamentos para cerâmica* (1º ed). Editora Luana.
- Caglayan, H., Şöhret, Y., & Caliskan, H. (2018). Thermo-Ecologic Evaluation of a Spray Dryer for Ceramic Industry. *Energy Procedia*, 144, 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.06.022>

CAPES. (2020a). Ata 198a Reunião Ordinária. <https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/documentos/conselho-tecnico-cientifico-da-educacao-superior/atas-ctc-es/ata-198.pdf>

CAPES. (2020b). Tabela de Áreas do Conhecimento. https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/TabelaAreasConhecimento_072012_atualizada_2017_v2.pdf

Cargnin, M. (2010). *Modelagem E Simulação Do Efeito Da Curva De Queima Sobre A Retração Linear De Revestimentos Cerâmicos*. UFSC.

Carneiro, S. M. M. (1994). Interdisciplinaridade: um novo paradigma do conhecimento? In *Educar em Revista* (pp. 99–109)

Castro Oliveira, M., & Iten, M. (2021). Modelling of A Solar Thermal Energy System For Energy Efficiency Improvement In A Ceramic Plant. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 6, 31. <https://doi.org/10.1051/rees/2021029>

Castro Oliveira, M., Iten, M., Cruz, P. L., & Monteiro, H. (2020). Review on Energy Efficiency Progresses, Technologies and Strategies in the Ceramic Sector Focusing on Waste Heat Recovery. *Energies*, 13(22), 6096. <https://doi.org/10.3390/en13226096>

Cavazzuti, M., Corticelli, M. A., Masina, G., & Saponelli, R. (2013). CFD Analyses of Syngas-Fired Industrial Tiles Kiln Module. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 7(4), 533–543. <https://doi.org/10.1080/19942060.2013.11015491>

Christodoulides, P., Agathokleous, R., Aresti, L., Kalogirou, S. A., Tassou, S. A., & Florides, G. A. (2022). Waste Heat Recovery Technologies Revisited with Emphasis on New Solutions, Including Heat Pipes, and Case Studies. *Energies*, 15(1), 384. <https://doi.org/10.3390/en15010384>

Cremaço, M. A. (2021). *Operações Unitárias em Sistemas particulados e fluidodinâmicos e outro trabalhos* (3^o ed, Vol. 1). SAGAH.

Cuviella-Suárez, C., Colmenar-Santos, A., Borge-Diez, D., & López-Rey, Á. (2019). Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multi-effect distillation. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1322–1336. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.269>

- Delpech, B., Milani, M., Montorsi, L., Boscardin, D., Chauhan, A., Almahmoud, S., Axcell, B., & Jouhara, H. (2018). Energy efficiency enhancement and waste heat recovery in industrial processes by means of the heat pipe technology: Case of the ceramic industry. *Energy*, *158*, 656–665. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.041>
- Fan, Y. V., Chin, H. H., Klemeš, J. J., Varbanov, P. S., & Liu, X. (2020). Optimisation and process design tools for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, *247*, 119181. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119181>
- Ferrer, S., Mezquita, A., Aguilera, V. M., & Monfort, E. (2019). Beyond the energy balance: Exergy analysis of an industrial roller kiln firing porcelain tiles. *Applied Thermal Engineering*, *150*, 1002–1015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.052>
- Hussnain, S. A., Farooq, M., Amjad, M., Riaz, F., Tahir, Z. U. R., Sultan, M., Hussain, I., Shakir, M. A., Qyyum, M. A., Han, N., & Bokhari, A. (2021). Thermal Analysis and Energy Efficiency Improvements in Tunnel Kiln for Sustainable Environment. *Processes*, *9*(9), 1629. <https://doi.org/10.3390/pr9091629>
- IBGE. (2024, janeiro 6). *Anuário Estatístico do Brasil*. IBGE. <https://anuario.ibge.gov.br/2023/industria/energia>
- Jouhara, H., Bertrand, D., Axcell, B., Montorsi, L., Venturelli, M., Almahmoud, S., Milani, M., Ahmad, L., & Chauhan, A. (2021). Investigation on a full-scale heat pipe heat exchanger in the ceramics industry for waste heat recovery. *Energy*, *223*, 120037. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120037>
- Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, *6*, 268–289. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>
- Jr., A. P., & Fernandes, V. (2021). Ciência e tecnologia à luz da interdisciplinaridade. Em *Ciência, inovação e ética: tecendo redes e conexões para a sustentabilidade* (p. 189–200). SENAR AR-PR. <https://atual.sistemafaep.org.br/boletim/tecendo-redes-e-conexoespara-a-sustentabilidade>

- Karellas, S., Leontaritis, A.-D., Panousis, G., Bellos, E., & Kakaras, E. (2013). Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry. *Energy*, *58*, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.097>
- Madeddu, S., Ueckerdt, F., Pehl, M., Peterseim, J., Lord, M., Kumar, K. A., Krüger, C., & Luderer, G. (2020). The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). *Environmental Research Letters*, *15*(12), 124004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbd02>
- Mezquita, A., Boix, J., Monfort, E., & Mallol, G. (2014). Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, *65*(1–2), 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.002>
- Mezquita, A., Monfort, E., Ferrer, S., & Gabaldón-Estevan, D. (2017). How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: Dry versus wet route. *Journal of Cleaner Production*, *168*, 1566–1570. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.082>
- Milan, G. S., Vargas, R. F. G., & Grazziotin, D. B. (2012). Um estudo sobre a aplicação da Produção mais Limpa (P+L). *GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, *7*(1), 127–140.
- Milani, M., Montorsi, L., Stefani, M., Saponelli, R., & Lizzano, M. (2017). Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement. *Journal of Environmental Management*, *203*, 1026–1037. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.076>
- Milani, M., Montorsi, L., Stefani, M., & Venturelli, M. (2017). CFD analysis of a full-scale ceramic kiln module under actual operating conditions. *E3S Web of Conferences*, *22*, 00117. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200117>
- Milani, M., Montorsi, L., Venturelli, M., Tiscar, J. M., & García-Ten, J. (2019). A numerical approach for the combined analysis of the dynamic thermal behaviour of an entire ceramic roller kiln and the stress formation in the tiles. *Energy*, *177*, 543–553. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.037>

- Nassetti, G., Ferrari, A., Fregni, A., & Maestri, G. (1998). *Piastrelle Ceramiche & energia* (1^o ed). Centro cerâmico de Bolonha.
- Özdamar, L., & Birbil, Ş. İ. (1999). A hierarchical planning system for energy intensive production environments. *International Journal of Production Economics*, 58(2), 115–129. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00076-0)
- Raza, M. Y., Lin, B., & Liu, X. (2021). Cleaner production of Pakistan’s chemical industry: Perspectives of energy conservation and emissions reduction. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123888. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123888>
- Roustapour, O. R., Hosseinalipour, M., Ghobadian, B., Mohaghegh, F., & Azad, N. M. (2009). A proposed numerical–experimental method for drying kinetics in a spray dryer. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.031>
- Ruivo, L., Russo, M., Lourenço, R., & Pio, D. (2021). Energy management in the Portuguese ceramic industry: Analysis of real-world factories. *Energy*, 237, 121628. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121628>
- Santos, T., Henriet, L., Costa, V. A. F., & Costa, L. C. (2020). Microwave vs conventional porcelain firing: Macroscopic properties. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17(5), 2277–2285. <https://doi.org/10.1111/ijac.13569>
- Simeone, A., Luo, Y., Woolley, E., Rahimifard, S., & Boër, C. (2016). A decision support system for waste heat recovery in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(1), 21–24. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.034>
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M., & Swihart, M. T. (2019). *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química* (8^o ed). LTC.
- Sohrabi Baba Heidary, D., Lanagan, M., & Randall, C. A. (2018a). Contrasting energy efficiency in various ceramic sintering processes. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(4), 1018–1029. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.015>

- Sohrabi Baba Heidary, D., Lanagan, M., & Randall, C. A. (2018b). Contrasting energy efficiency in various ceramic sintering processes. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(4), 1018–1029. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.10.015>
- Utlu, Z., & Hepbaşlı, A. (2014). Exergoeconomic analysis of energy utilization of drying process in a ceramic production. *Applied Thermal Engineering*, 70(1), 748–762. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.070>
- Venturelli, M., Brough, D., Milani, M., Montorsi, L., & Jouhara, H. (2021). Comprehensive numerical model for the analysis of potential heat recovery solutions in a ceramic industry. *International Journal of Thermofluids*, 10, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100080>
- Vieira, L. E. (2002). *Avaliação Do Comportamento Térmico De Uma Placa Cerâmica Ao Longo Do Processo De Monoqueima Em Forno A Rolos*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Wang, Y., Yang, H., & Xu, K. (2020). Thermal Performance Combined with Cooling System Parameters Study for a Roller Kiln Based on Energy-Exergy Analysis. *Energies*, 13(15), 3922. <https://doi.org/10.3390/en13153922>
- Yu, J., Jin, S.-H., Raju, K., Lee, Y., & Lee, H.-K. (2021). Analysis of individual and interaction effects of processing parameters on wet grinding performance in ball milling of alumina ceramics using statistical methods. *Ceramics International*, 47(22), 31202–31213. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.296>

APÊNDICES

ANEXOS