

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO**

Karina Terra de Souza

**ESTUDO DOS PERFIS DE TEMPERATURA DE PEÇAS CERÂMICAS E
DO FLUXO DE GASES NO INTERIOR DE UM FORNO INTERMITENTE**

Campos dos Goytacazes/RJ

2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA FLUMINENSE

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO**

KARINA TERRA DE SOUZA

**ESTUDO DOS PERFIS DE TEMPERATURA DE PEÇAS CERÂMICAS E
DO FLUXO DE GASES NO INTERIOR DE UM FORNO INTERMITENTE**

**Alline Sardinha Cordeiro Morais
(Orientadora)**

**Cristine Nunes Ferreira
(Coorientadora)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

**Campos dos Goytacazes/RJ
2020**

Biblioteca Anton Dakitsch
CIP - Catalogação na Publicação

S729e Souza, Karina Terra de
Estudo dos perfis de temperatura de peças cerâmicas e do fluxo de gases no interior de um forno intermitente / Karina Terra de Souza - 2020.
117 f.: il. color.

Orientadora: Aline Sardinha Cordeiro Morais
Coorientadora: Cristine Nunes Ferreira

Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos Goytacazes, RJ, 2020.
Referências: f. 105 a 110.

1. cerâmica vermelha. 2. processo de queima. 3. fluidodinâmica computacional. 4. organização das peças cerâmicas no forno. I. Morais, Aline Sardinha Cordeiro, orient. II. Ferreira, Cristine Nunes, coorient. III. Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
FLUMINENSE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO

Karina Terra de Souza

ESTUDO DOS PERFIS DE TEMPERATURA DE PEÇAS CERÂMICAS E
DO FLUXO DE GASES NO INTERIOR DE UM FORNO INTERMITENTE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

Aprovada em 20 de março de 2020.

Banca Examinadora:

Alline Sardinha Cordeiro Morais, Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense
(Orientadora)

Cristine Nunes Ferreira, Doutora em Física
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense
(Coorientadora)

João José de Assis Rangel, Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

Maria Priscila Pessanha de Castro, Doutora em Física
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus, por todas as coisas que Ele fez e faz por mim. Apesar de todas as imperfeições, Ele sempre está ao meu lado, me sustentando em todos os momentos com Seu amor e Sua graça.

À minha família, por estar ao meu lado, me apoiando em todas as situações.

Ao meu esposo Felipe, por sempre estar comigo, me apoiando, ajudando, ouvindo e aconselhando. Muito obrigada pela paciência em todos os momentos e por seu amor.

Ao amigo Nilson e ao bolsista Gustavo pelo apoio nos experimentos práticos.

À Arte Cerâmica Sardinha, em especial ao senhor Rodolfo da Gama, pela contribuição na realização desta pesquisa, e pela disposição em ajudar.

Às orientadoras Alline Moraes e Cristine Ferreira, pelo apoio, confiança e por todas as contribuições dadas.

Aos professores João José de Assis Rangel e Maria Priscila Pessanha de Castro pelas contribuições.

Ao Instituto Federal Fluminense e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oferta do curso.

A todos que, de alguma forma, contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

"Não nos cansemos de fazer o bem. Pois, se não desanimarmos, chegará o tempo certo em que faremos a colheita." (Bíblia Sagrada, Gálatas 6:9)

RESUMO

No processo de fabricação de cerâmica vermelha, a etapa de queima é considerada crítica, uma vez que é responsável pela determinação das características finais do produto, além de contribuir, de forma significativa, pelos custos de produção e pela emissão de gases poluentes na atmosfera. Com o intuito de promover melhorias nesta etapa, o presente estudo tem por objetivo avaliar os perfis de temperatura de peças cerâmicas, e o fluxo de gases no interior de um forno intermitente, quando diferentes configurações de carga são propostas. Utilizando modelos numéricos, apoiados no uso dos *softwares ANSYS Transient Thermal e ANSYS Fluent*, foram obtidos os perfis térmicos das peças e analisado o fluxo dos gases no interior do forno. A partir das simulações foi observado que, quanto menor for a relação entre a área superficial da peça e seu volume, maior será a quantidade de calor necessária para a queima. Além disso, notou-se que a geometria do forno favorece a passagem dos gases na região central, assim, para tornar o fluxo de gases mais uniforme, foram propostas diferentes configurações de carga, sendo realizadas simulações considerando diferentes valores de espaçamento entre as peças. Por fim, os aspectos visuais e as propriedades tecnológicas das peças foram avaliados, sendo constatado que o posicionamento das peças foi adequado. As organizações de carga propostas têm potencial para melhorar a eficiência energética do processo de queima, elevando a qualidade final dos produtos e a receita da empresa.

Palavras-chave: cerâmica vermelha; processo de queima; fluidodinâmica computacional; organização das peças cerâmicas no forno.

ABSTRACT

In the red ceramic manufacturing process, the burning stage is considered critical, since it is responsible for determining the final characteristics of the product, in addition to contributing significantly to production costs and the emission of polluting gases into the atmosphere. In order to promote improvements in this stage, the present study aims to evaluate the temperature profiles of ceramic pieces, and the gas flow inside an intermittent furnace, when different load configurations are proposed. Using numerical models, supported by the use of the ANSYS Transient Thermal and ANSYS Fluent software, the thermal profiles of the pieces were obtained and the gas flow inside the furnace was analysed. From the simulations, it was observed that the smaller the relationship between the surface area of the piece and its volume, the greater the amount of heat required for burning. In addition, it was noted that the geometry of the furnace favors the passage of gases in the central region, so to make the flow of gases more uniform, different load configurations were proposed, and simulations were carried out considering different spacing values between the pieces. Finally, the visual aspects and the technological properties of the pieces were evaluated, and it was found that the positioning of the pieces was adequate. The proposed load configurations have the potential to improve the energy efficiency of the burning process, increasing the final quality of products and the company's revenue.

Keywords: red ceramic; burning process; computational fluid dynamics; organization of ceramic pieces in the furnace.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo produtivo	25
Figura 2 – Impactos ambientais do processo produtivo	29
Figura 3 – Esquema de um forno intermitente	32
Figura 4 – Curva de queima de um forno intermitente	34
Figura 5 – Etapas da pesquisa	46
Figura 6 – Diagrama de Venn para as <i>strings</i> de busca	49
Figura 7 – Forno abóboda	50
Figura 8 – Termopares instalados no forno em estudo	51
Figura 9 – Aspecto visual das peças cerâmicas	57
Figura 10 – Curva de queima do forno	59
Figura 11 – Gradiente de temperatura no forno	60
Figura 12 – Geometria das peças cerâmicas	61
Figura 13 – Geometria das peças cerâmicas selecionadas	63
Figura 14 – Geração das malhas das peças cerâmicas selecionadas	64
Figura 15 – Curva de queima	65
Figura 16 – Distribuição da temperatura no tijolo maciço	66
Figura 17 – Distribuição de temperatura no tijolo quatro furos	68
Figura 18 – Distribuição de temperatura no tijolo cobogó	69
Figura 19 – Distribuição de temperatura no tijolo de canto	70
Figura 20 – Distribuição da temperatura no tijolo maciço na escala global	71
Figura 21 – Distribuição de temperatura no tijolo quatro furos na escala global	72
Figura 22 – Distribuição de temperatura no tijolo cobogó na escala global	73
Figura 23 – Distribuição de temperatura no tijolo de canto na escala global	74
Figura 24 – Temperatura média das peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar M4	75
Figura 25 – Temperatura média das peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar M1	76
Figura 26 – Temperatura média das peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar C1	77
Figura 27 – Temperatura média das peças cerâmicas quando expostas a uma temperatura fixa	78
Figura 28 – Diferença de temperatura nas peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar M4	79
Figura 29 – Diferença de temperatura nas peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar M1	80
Figura 30 – Diferença de temperatura nas peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar C1	81
Figura 31 – Diferença de temperatura nas peças cerâmicas quando expostas a uma temperatura fixa	82
Figura 32 – Geometria do forno	83
Figura 33 – Dimensões das peças selecionadas	83
Figura 34 – Forno carregado com tijolo maciço, considerando igual espaçamento entre as fileiras	85
Figura 35 – Valores de espaçamento entre as fileiras de tijolos	85
Figura 36 – Forno carregado com tijolo maciço, considerando diferente espaçamento entre as fileiras	86

Figura 37 – Forno carregado com os quatro tipos de peças, considerando igual espaçamento entre as fileiras	87
Figura 38 – Forno carregado com os quatro tipos de peças, considerando diferente espaçamento entre as fileiras	88
Figura 39 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço	89
Figura 40 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço – fileira 1	91
Figura 41 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço – fileira 2	92
Figura 42 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço – fileira 3	92
Figura 43 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço – fileira 4	93
Figura 44 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças	94
Figura 45 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças – fileira 1	96
Figura 46 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças – fileira 2	97
Figura 47 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças – fileira 3	98
Figura 48 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças – fileira 4	98
Figura 49 – Amostras selecionadas para ensaio	99
Figura 50 – Amostras de tijolo maciço após a queima	100
Figura 51 – Amostras de tijolo após a queima	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Defeitos e possíveis causas durante o processo de queima

30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dimensionais do forno	52
Tabela 2 – Propriedades dos materiais	54
Tabela 3 – Parâmetros dimensionais das peças cerâmicas	62
Tabela 4 – Características geométricas do tijolo maciço	101

LISTA DE SIGLAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmicas para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CNI	Confederação Nacional da Indústria
ESPM	Escola Superior de Propaganda e Marketing
FIEMG	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MME	Ministério de Minas e Energia
MINEROPAR	Minerais do Paraná
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Contextualização	14
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Justificativa.....	17
2. REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 Indústria cerâmica.....	19
2.1.1 Indústria de cerâmica vermelha no Brasil	20
2.1.2 Indústria de cerâmica vermelha em Campos dos Goytacazes.....	22
2.2 Processo produtivo	24
2.3 Processo de queima	28
2.3.1 Fornos cerâmicos.....	31
2.3.2 Curva de queima.....	33
2.4 Transferência de calor e fluxo dos gases no forno	36
2.4.1 Análise dos processos de transferência de calor e fluxo de gases.....	38
2.5 Trabalhos relacionados	41
3. METODOLOGIA.....	45
3.1 Classificação da pesquisa	45
3.2 Etapas do procedimento metodológico.....	46
3.2.1 Etapa 1 – Revisão da literatura	47
3.2.2 Etapa 2 – Definição do objeto de pesquisa.....	49
3.2.3 Etapa 3 – Levantamento de dados do forno	50
3.2.4 Etapa 4 – Levantamento de dados e categorização das peças cerâmicas	52
3.2.5 Etapa 5 – Modelagem numérica das peças.....	53
3.2.6 Etapa 6 – Proposição de diferentes configurações de carga no forno	54
3.2.7 Etapa 7 – Modelagem numérica das organizações propostas.....	55
3.2.8 Etapa 8 – Análise visual das peças e das propriedades tecnológicas	56
3.2.8.1 Análise visual	56
3.2.8.2 Absorção de água.....	58
3.2.8.3 Retração linear de queima	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Comportamento térmico do forno	59
4.2 Dados e categorização das peças cerâmicas	61
4.3 Distribuição de temperatura nas peças cerâmicas	62
4.3.1 Distribuição de temperatura no tijolo maciço	66
4.3.2 Distribuição de temperatura no tijolo quatro furos.....	67
4.3.3 Distribuição de temperatura no tijolo cobogó	68
4.3.4 Distribuição de temperatura no tijolo de canto.....	69
4.3.5 Distribuição de temperatura nas peças cerâmicas – escala global	70
4.4 Temperatura média das peças cerâmicas.....	75
4.4.1 Temperatura média das peças cerâmicas – termopar M4.....	75
4.4.2 Temperatura média das peças cerâmicas – termopar M1	76
4.4.3 Temperatura média das peças cerâmicas – termopar C1.....	76
4.4.4 Temperatura média das peças cerâmicas – temperatura fixa	77

4.5 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas	78
4.5.1 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas – termopar M4	78
4.5.2 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas – termopar M1	79
4.5.3 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas – termopar C1	80
4.5.4 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas – temperatura fixa	81
4.6 Fluxo dos gases no interior do forno	82
4.6.1 Fluxo dos gases no forno – Situação 1 e Situação 2.....	89
4.6.2 Fluxo dos gases no forno – Situação 3 e Situação 4.....	94
4.7 Análise dos aspectos visuais e das propriedades tecnológicas das peças cerâmicas.....	99
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
REFERÊNCIAS	105
APÊNDICE A	111
APÊNDICE B.....	112
APÊNDICE C	117

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O termo cerâmica tem origem na palavra grega “*keramos*”, que se refere a “artefatos de argila queimada”. Em um sentido mais amplo, este termo pode ser utilizado para se referir tanto a uma matéria-prima quanto a um produto, um processo ou a uma indústria (HOTZA, 2007). A maior parte das cerâmicas é composta por elementos metálicos e não metálicos, sendo necessário um tratamento térmico a altas temperaturas para serem obtidas as propriedades desejáveis destes materiais (CALLISTER, 2002).

Por ser amplo, o setor cerâmico pode ser dividido em diferentes segmentos, a saber: cerâmica vermelha; materiais de revestimento; cerâmica branca; isolantes térmicos; fritas e corantes; abrasivos; vidro, cimento e cal; cerâmica de alta tecnologia, de acordo com as matérias-primas empregadas, propriedades e áreas de utilização (ABCERAM, 2018). No Brasil, as empresas deste setor apresentam expressivas disparidades em termos de desenvolvimento tecnológico, gestão e qualificação profissional (ABDI, 2016).

Neste estudo será dado enfoque ao setor de cerâmica vermelha devido à sua importância no polo ceramista da cidade de Campos dos Goytacazes, situado na região norte do estado do Rio de Janeiro. Este segmento abrange os materiais de coloração avermelhada, tais como, tijolos, blocos, telhas e elementos vazados. Possui, aproximadamente, 7000 fábricas que produzem, em sua maioria, blocos e tijolos, com um faturamento anual por volta de 18 bilhões de reais (ANICER, 2018).

Os processos de fabricação utilizados no setor cerâmico podem, de modo geral, ser divididos em quatro etapas: preparação da matéria-prima e da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento. Destes, o tratamento térmico é considerado de essencial importância, uma vez que, a partir dele, os produtos adquirem as propriedades finais (ABCERAM, 2018).

O tratamento térmico é realizado em duas etapas: secagem e queima. A etapa de queima é uma das mais importantes no processo de fabricação, haja vista que é nela em que são conferidas as características técnicas e estéticas finais das peças, além de ser a etapa térmica de maior consumo energético, contribuindo, desta forma, para o aumento do custo final dos produtos (GASCH, 2007; RAMOS; ALVES; ALEXANDRE, 2006).

Os fornos e secadores são os únicos equipamentos consumidores de energia térmica nas indústrias cerâmicas. Entre estes equipamentos, o forno é o maior consumidor de energia térmica, sendo para algumas plantas o único, uma vez que a secagem pode ser realizada de

forma natural; por meio de energia elétrica; ou pelo reaproveitamento de gases quentes do forno (ISHIDA *et al.*, 2018).

No processo de queima são utilizados, principalmente, lenha e resíduos de madeira: cavaco, serragem, briquetes e outros resíduos como combustíveis para os fornos. A necessidade de processos produtivos mais sustentáveis tem ocasionado um aumento no uso de madeira de reflorestamento. Resíduos do agronegócio, tais como, casca de arroz e bagaço de cana tem sido utilizados na queima das peças por empresas que buscam certificação (MME, 2018).

A indústria de cerâmica vermelha brasileira é composta por unidades produtoras distribuídas em todo o país e se caracteriza por micro e pequenas empresas, que atuam de maneira informal. O baixo valor agregado de seus produtos desestimula investimentos em equipamentos, tecnologia e qualificação da mão de obra, componentes estes que são essenciais para a obtenção de produtos de qualidade (MME, 2009).

A maior parte das empresas do setor é de gestão simples e familiar tradicional, o que faz com que a introdução de equipamentos modernos e a atualização dos processos produtivos ocorra de forma lenta no tempo (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010). Entretanto, a necessidade de atualização dos processos industriais é notória devido à competição cada vez maior entre as empresas, desta forma, a capacidade de inovar é uma característica cada vez mais importante para a obtenção de vantagens competitivas no setor (ROCHA; PALMA, 2012).

Apesar dos avanços tecnológicos observados na sociedade e da necessidade de atualização dos processos produtivos, observa-se que os processos de fabricação de produtos de cerâmica vermelha, em muitos casos, continuam sendo realizados de forma artesanal, ultrapassada, sem controle das variáveis de processo e baseado na experiência profissional dos envolvidos. As atividades de controle do processo não apresentam regularidade, acarretando, desta forma, problemas associados ao alto desperdício e à baixa reutilização de resíduos (BRAGA; SANTOS; SALES, 2016).

Percebe-se que a falta de planejamento, atualização tecnológica e controle nos processos ocasiona baixa qualidade, desperdício, perdas e falta de padronização nos produtos cerâmicos (SEBRAE; ESPM, 2008). Além disso, a defasagem tecnológica observada no segmento ocasiona uma menor produtividade nacional quando comparada ao padrão europeu (ABDI, 2016; LEHMKUHL, 2004).

Ademais, o processo de fabricação de produtos de cerâmica vermelha causa uma série de impactos ao meio ambiente que, de forma geral, estão associados aos seguintes aspectos: degradação das áreas de extração de argila; consumo de energia; geração de resíduos sólidos

decorrentes de perdas por falhas na qualidade do produto; emissão de poluentes atmosféricos; e gases de efeito estufa (FIEMG; FEAM, 2013).

Assim, de acordo com Grigoletti e Sattler (2003), a indústria cerâmica brasileira precisa modernizar seus processos produtivos de forma a implementar tecnologias de baixo impacto ambiental, reduzir o uso de matéria-prima e energia, diminuir a geração de resíduos e a emissão de poluentes, entre outros, para tornar mais sustentável seus processos de produção.

A adoção de estratégias empresariais com foco na inovação e no uso de tecnologias promove e diversifica a matriz energética, reduz o consumo de água e energia no processo produtivo. A associação destes aspectos à uma melhor gestão aumenta a produtividade e reflete em uma maior competitividade do setor cerâmico nos mercados (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010).

Além disso, percebe-se uma exigência cada vez maior de economia de energia e controle ambiental cabendo à indústria de cerâmica vermelha a tarefa de se adaptar a este novo cenário. Este ajuste consiste no rearranjo dos processos produtivos, desde a preparação da matéria-prima até a obtenção do produto final, utilizando, para isto, novas tecnologias e atualização de equipamentos existentes (NICOLAU; DADAM, 2009).

Vale ressaltar que a crise enfrentada pela economia brasileira em 2016 registrou uma queda de 3,6% do PIB nacional e de 5,1% na atividade de construção civil, com conseqüente redução de 2,8% da força de trabalho neste setor (CBIC, 2017), o que evidencia a necessidade de adequação das empresas à esta situação. Assim, mais do que nunca, torna-se necessário o atendimento dos produtos às especificações das normas vigentes e do mercado consumidor.

Dado o protagonismo da etapa de queima na qualidade final do produto, custos de produção e geração de impactos ambientais, diferentes estudos vêm sendo realizados nos últimos anos visando o aumento da eficiência energética dos fornos, no entanto, não foram encontradas pesquisas que buscassem melhorias na etapa de queima associadas a uma melhor organização das peças cerâmicas no interior do forno, tendo como base a modelagem numérica da distribuição de temperatura nas peças e do fluxo de gases no forno.

Nesse contexto, este estudo propõe analisar os perfis de temperatura de peças cerâmicas, e entender como o fluxo dos gases no forno é alterado pela disposição das peças em seu interior. O adequado posicionamento das peças no forno pode contribuir tanto para o aumento da eficiência energética do processo de queima, como também para a obtenção de produtos mais uniformes, de melhor qualidade e com especificações visuais desejadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar os perfis de temperatura de peças cerâmicas e compreender como a organização das peças no forno altera o fluxo dos gases em seu interior durante o processo de queima.

1.2.2 Objetivos específicos

Diante do objetivo principal, tem-se como objetivos específicos:

- Avaliar o perfil de temperatura no interior do forno por meio de medições diretas;
- Categorizar e avaliar a distribuição de temperatura nas peças cerâmicas;
- Propor diferentes organizações para as peças no forno, tendo como parâmetros de análise os perfis de temperatura do forno e das peças, e o espaçamento entre as peças;
- Entender o fluxo dos gases no interior do forno em função da organização das peças durante a queima;
- Avaliar os aspectos visuais e as propriedades tecnológicas das peças queimadas a partir de uma configuração proposta.

1.3 Justificativa

O aumento da competitividade entre as empresas do setor de cerâmica vermelha e a necessidade de atualização dos processos, em muitos casos ainda artesanais, demanda a este segmento a adoção de novas tecnologias e equipamentos a fim de propiciar melhorias técnicas e econômicas ao processo (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010). Entretanto, o baixo valor agregado dos produtos desestimula investimentos em equipamentos, tecnologias e qualificação da mão de obra (MME, 2009), uma vez que os custos com melhorias, em muitos casos, sobrepõem-se aos lucros proporcionados por elas. Assim, torna-se cada vez mais necessário o uso de soluções eficientes e de baixo custo que sejam capazes de trazer benefícios técnicos e financeiros ao setor.

Em relação aos custos de produção e lucratividade, a etapa mais decisiva é a de queima, haja vista que é nela em que são conferidas as características finais do produto, além de ser uma das etapas que mais onera o processo produtivo (RAMOS; ALVES; ALEXANDRE, 2006). Assim, este estudo é justificado pela necessidade de melhorias nesta etapa com o intuito de aumentar a eficiência energética do processo de queima, possibilitando a fabricação de produtos mais uniformes, de melhor qualidade e com especificações visuais desejadas. Além disso,

melhorias na etapa de queima podem contribuir para a diminuição da emissão de gases poluentes na atmosfera devido ao melhor aproveitamento do combustível nos fornos.

Uma vez que no setor cerâmico um dos principais fatores que tornam uma empresa competitiva é o baixo custo de produção, optou-se por utilizar, nesta pesquisa, técnicas de modelagem e simulação devido à possibilidade de compreensão dos processos de transferência de calor e do fluxo de gases que ocorrem no interior do forno em um ambiente virtual, de forma confiável e de baixo custo.

Diferentes trabalhos, tais como de Kawaguti *et al.* (2003), Dadam (2005), Sebastião, Fernandes e Nandi (2013), Azevedo (2017) e Lima (2018) buscaram proporcionar melhorias no processo de queima na indústria cerâmica, entretanto, não foram encontradas pesquisas com enfoque na organização das peças no forno, fazendo uso de uma abordagem apoiada na modelagem numérica da distribuição de temperatura nas peças e do fluxo de gases no interior do forno, sendo este o objeto de estudo da presente pesquisa.

2. Revisão da literatura

Esta seção apresenta um levantamento teórico a respeito da indústria cerâmica, tendo como eixo central o segmento de cerâmica vermelha, abordando sua importância no cenário nacional, estadual e regional, desafios e oportunidades de melhoria. Além disso, apresenta o processo produtivo deste ramo, com ênfase no processo de queima, bem como os fundamentos e métodos de análise dos processos de transferência de calor e fluxo dos gases no interior dos fornos cerâmicos.

2.1 Indústria cerâmica

O setor cerâmico compreende os materiais inorgânicos, não metálicos, que geralmente são obtidos após tratamento térmico em altas temperaturas (ABDI, 2016). A utilização de produtos cerâmicos cresce a cada dia, sendo atualmente utilizado em diversas áreas, tais como, automotiva, implantes biocompatíveis, refratários e eletrônica (SCHULLER; BIANCHI; AGUIAR, 2008).

A indústria cerâmica pode ser dividida em dois grupos: tradicional e avançada. Na cerâmica tradicional os produtos são formados a partir de matérias-primas naturais ou que sofreram um baixo nível de beneficiamento. Neste grupo, o material conformado é submetido a um tratamento térmico, que não apresenta um controle de temperatura rigoroso, a fim de aumentar a densidade e resistência dos produtos. Os materiais produzidos se destacam pelas suas propriedades mecânicas e estéticas e, normalmente, são de uso doméstico ou utilizados no ramo da construção civil (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

Por outro lado, na cerâmica avançada as matérias-primas são beneficiadas até atingir um alto grau de pureza. Os materiais produzidos, neste grupo, passam por um tratamento térmico, no qual são controlados tempo, temperatura e pressão, por exemplo, a fim de se obter produtos de alto valor agregado, sem defeitos. Caracterizam-se pelas suas funções elétricas, magnéticas, nucleares, ópticas, mecânicas, térmicas, químicas, e/ou biológicas (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

A diversidade de produtos fabricados pela indústria cerâmica demanda diferentes níveis de tecnologia. As regiões Sul e Sudeste são mais especializadas na fabricação de produtos de tecnologia mais elevada, tais como revestimentos cerâmicos, enquanto que na região Nordeste há a predominância de indústrias de cerâmica vermelha e processos de fabricação artesanais (SEBRAE, 2012).

Os materiais cerâmicos possuem como matéria-prima primária a argila, que se caracteriza por possuir boa plasticidade; adequada resistência mecânica após a queima; possibilidade de aplicação de técnicas de processamento simples; além de estar disponível em grandes quantidades (VIEIRA; HOLANDA; PINATTI, 2000).

A argilas são aluminossilicatos, sendo formadas por alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), as quais contêm água quimicamente ligada. Possuem uma variedade de características físicas, composições químicas e estruturas. Compostos à base de bário, cálcio, sódio, potássio, ferro e materiais orgânicos podem ser elencados como algumas de suas impurezas mais comuns (CALLISTER, 2002).

As argilas de queima vermelha, ou argilas comuns, são utilizadas no segmento da cerâmica vermelha, ou estrutural, e no segmento de revestimentos cerâmicos. Esta matéria-prima se destaca devido ao alto volume de produção, além de possuir baixo valor unitário, o que torna inviável o transporte a grandes distâncias, condicionando a instalação das indústrias cerâmicas próximas às jazidas (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010).

2.1.1 Indústria de cerâmica vermelha no Brasil

A cerâmica pode ser considerada tanto uma atividade artística, em que se produz artefatos com valor estético, quanto como uma atividade industrial, em que são produzidos artefatos com valor industrial. No Brasil, uma diversidade de produtos cerâmicos é utilizada no setor de construção civil, tais como blocos, telhas, tijolos maciços, tubos para saneamento e revestimentos. Estes materiais também estão presentes em objetos de uso doméstico, como filtros e panelas de barro (SEBRAE, 2015).

O quadro institucional de cerâmica vermelha é formado por instituições de apoio, de desenvolvimento e de formalização (ABDI, 2016). O papel das instituições de apoio é oferecer suporte nas esferas institucional, científica, cultural, didática, empresarial, industrial e tecnológica das indústrias. No Brasil, as duas principais instituições de apoio são a Associação Nacional da Indústria de Cerâmica Vermelha (ANICER) e a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM).

As instituições de desenvolvimento se ocupam de propiciar meios de capacitação e estruturação da produção, bem como de realizar estudos do setor cerâmico e mapeamento de jazidas. São instituições de desenvolvimento: Instituto Nacional de Tecnologia (INT); Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT); Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI); e Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE).

Por fim, as instituições de formalização são responsáveis pela padronização e desenvolvimento da qualidade no setor. As principais instituições deste segmento são a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a ANICER, que regulamentam as normas, e o programa setorial de qualidade do setor de cerâmica vermelha, respectivamente.

Os produtos de cerâmica vermelha são compostos de cerca de 25 a 70% de argilas e teor variável de óxido de ferro, sendo este o elemento responsável pela coloração avermelhada após o processo de queima, originando, assim, o termo “cerâmica vermelha”. Este segmento também é conhecido por cerâmica estrutural visto que seus produtos compõem a estrutura de edificações (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010).

Entre as vantagens associadas à utilização de elementos cerâmicos estão o menor peso, que facilita o processo de transporte; o menor consumo de recursos naturais usados no processo de fabricação; e o melhor isolamento acústico e térmico (ANICER, 2018). A estrutura empresarial da indústria cerâmica é bastante diversificada, sendo composta por pequenos empreendimentos familiares (olarias); cerâmicas de pequeno e médio porte, que enfrentam problemas de gestão e mecanização; e empreendimentos de grande porte, detentores de tecnologia moderna (ABDI, 2016).

Os produtos de cerâmica vermelha são classificados de acordo com o processo de fabricação utilizado, sendo os produtos extrudados e os prensados, os dois tipos principais. Os blocos de vedação ou tijolos furados, lajotas de forro, manilhas e tijolos maciços são alguns exemplos de produtos extrudados, que possuem uma variedade de produtos devido à fácil substituição das boquilhas das extrusoras. Em relação aos prensados, as telhas e ladrilhos de piso são os produtos mais representativos desta categoria (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010).

A região Sul apresenta o maior número de empresas no país (29%), seguida pelas regiões Sudeste (26%) e Nordeste (24%). A maior produção nacional ocorre na região Sudeste (41%), sendo o estado de São Paulo o maior produtor do país; as regiões Sul e Nordeste produzem cerca de 24% cada uma; a região Centro-Oeste apresenta produção de cerca de 7%; e, por fim, a região Norte detém cerca de 3% da produção nacional (HENRIQUES JR; RODRIGUES, 2017).

No Brasil, as regiões Sudeste e Sul apresentam maior desenvolvimento, uma vez que possuem maior densidade demográfica; atividade industrial e agropecuária; melhor infraestrutura; centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas, o que faz com que estas regiões apresentem maior concentração de indústrias cerâmicas. A região Nordeste, por sua vez, tem apresentado um certo nível de desenvolvimento, e aumentado a demanda por produtos

cerâmicos, conseqüentemente, também tem crescido a quantidade de fábricas cerâmicas na região (ABCERAM, 2018).

Cabe ressaltar que nas regiões Sul e Sudeste estão concentradas importantes jazidas de minerais industriais de uso cerâmico, desta forma, torna-se compreensível a maior quantidade de empresas nas referidas regiões, uma vez que a localização das mesmas é determinada tanto pela proximidade de jazidas quanto de mercado consumidor, sendo que quanto maior a qualidade da argila, mais atrativo será o local para a instalação da indústria (FIEMG; FEAM, 2013).

Apesar do desenvolvimento alcançado nas últimas décadas, o setor de cerâmica vermelha brasileiro ainda enfrenta grandes desafios na manutenção e melhoria de suas indústrias, a saber: necessidade de estudos geológicos das atuais reservas e de áreas potenciais de argilas; manutenção do suprimento de argilas por meio da compatibilização da extração com outras atividades econômicas da região, e com a preservação do meio ambiente; formalização da atividade extrativa; inovação na produção de matérias-primas; investimentos em tecnologias para o processo de queima; e incentivo ao associativismo (FIEMG; FEAM, 2013).

As áreas de composição de materiais, conformidade, qualidade e gestão dos empreendimentos demanda profissionais qualificados no setor de cerâmica vermelha, no entanto, há neste segmento a predominância de mão de obra sem qualificação e com baixo nível de instrução formal (MME, 2018). O setor também sofre com a baixa produtividade de suas indústrias; entre as causas para tal estão a grande defasagem tecnológica ligada a equipamentos antigos, baixo nível de automação e pouca capacitação dos funcionários (ABDI, 2016).

2.1.2 Indústria de cerâmica vermelha em Campos dos Goytacazes

O segmento cerâmico no estado do Rio de Janeiro é o quarto maior do país, apresentando cerca de 220 empresas em operação, com 207 produtoras de material cerâmico. Cerca de 82% das empresas estão concentradas em três áreas: Campos (94); Itaboraí (51) e Região Serrana-Médio Vale do Paraíba (25), com produção de blocos de vedação (92%); telhas (4%); e blocos estruturais (4%) (HENRIQUES JR; RODRIGUES, 2017).

O município de Campos dos Goytacazes, situado na região norte do estado do Rio Janeiro abriga o maior polo cerâmico do estado (RIBEIRO *et al.*, 2012). A alta demanda por produtos cerâmicos e a disponibilidade de matéria-prima de alta qualidade, com facilidade de extração e transporte estabelece à atividade cerâmica uma posição estratégica para o desenvolvimento regional e estadual, sendo também um aporte ao fortalecimento do ramo da construção civil no estado (RAMOS; ALVES; ALEXANDRE, 2006).

O polo ceramista de Campos fabrica, de forma predominante, blocos de vedação (80%). Até a década de 80 era comum o uso de óleo combustível nos processos de secagem e queima, entretanto, com o aumento dos preços deste, o setor voltou a usar a lenha, tal como era até a década de 60. Em relação à queima, são utilizados fornos do tipo Hoffman, túnel, caieira, vagão e abóboda (HENRIQUES JR; RODRIGUES, 2017).

O desenvolvimento do polo foi motivado pela grande reserva de argilas ali presente. Os depósitos argilosos apresentam dois tipos de argilas: uma argila “gorda” situada na camada inferior e uma argila “magra”, na parte superior. Normalmente a extração destas argilas se dá na proporção 1:1 para a fabricação de tijolos, sendo a mistura realizada de forma empírica (VIEIRA; HOLANDA; PINATTI, 2000).

A argila “gorda” apresenta alta plasticidade, granulometria fina, sendo composta basicamente por argilominerais, enquanto que a argila “magra” caracteriza-se por ser rica em quartzo e menos plástica, o que possibilita a drenagem adequada das peças nas etapas de secagem e queima, com o intuito de evitar trincas e conferir rapidez ao processo (MME, 2009).

As argilas do polo ceramista caracterizam-se pela predominância caulínica, com baixo teor de óxidos fundentes e elevada perda ao fogo, que causa retração e porosidade ao material após a queima. Para corrigir as imperfeições desta argila e, conseqüentemente, melhorar as propriedades tecnológicas da mesma, podem ser realizadas composições com argilas de outras localidades (RIBEIRO *et al.*, 2012).

As indústrias presentes no polo cerâmico apresentam disparidades tecnológicas em seus processos produtivos; enquanto a maioria faz uso de métodos rudimentares, uma pequena parcela tem seus processos de produção mais atualizados, com a utilização de fornos túneis, secadores e outras estruturas automatizadas. Para o processo de queima, na maioria das cerâmicas, são utilizados lenha e óleos combustíveis, que apresentam oscilações no poder calorífico e poluem o meio ambiente (RAMOS; ALVES; ALEXANDRE, 2006).

A lenha é o principal combustível utilizado nos fornos cerâmicos, no entanto, apresenta baixo rendimento energético, o que impacta, de forma negativa, na qualidade e nos padrões técnicos e estéticos dos produtos. Ademais, sua queima traz impactos ao meio ambiente devido à emissão de cinzas, óxidos de enxofre, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio, que causam a chuva ácida, bem como danificam a camada de ozônio (SEBRAE; ESPM, 2008).

Outro desafio enfrentado pelas indústrias cerâmicas da região é a baixa capacidade de inovação do processo, o que reduz a capacidade competitiva destas. A inovação, neste caso, compreende o processo como um todo, desde a concepção da ideia, manufatura do produto e

lançamento no mercado, não excluindo melhorias ou novas estratégias na estrutura organizacional. Entre as causas para a limitação mencionada estão a falta de profissionalização da mão de obra, falta de visão inovadora na administração das empresas, baixa cooperação interorganizacional, falta de incentivos e programas que auxiliem as empresas a buscar e investir em soluções tecnológicas (ROCHA; PALMA, 2012).

2.2 Processo produtivo

O setor cerâmico é tradicionalmente conhecido como a atividade de produção de artefatos a partir da argila. Uma importante característica desta matéria-prima é a alta plasticidade e facilidade de modelagem quando umedecida (SEBRAE, 2012). Dentre os materiais do ramo da construção civil, os cerâmicos são os que apresentam melhor durabilidade, conforto térmico, preço e desempenho estético (ANICER, 2015).

O processo produtivo cerâmico visa atender, de forma geral, três aspectos, a saber: quantitativo, qualitativo e de rentabilidade. O aspecto quantitativo relaciona-se aos valores previstos de produção; o qualitativo à manutenção das características técnicas e estéticas dentro de valores ótimos; e o de rentabilidade aos custos de produção que tornem o produto competitivo no mercado (MARTÍN, 2004).

Em relação aos setores da indústria cerâmica, o de cerâmica vermelha é aquele que trabalha com materiais predominantemente utilizados na construção civil, como blocos, tijolos, telhas, sendo usualmente conhecido como cerâmica estrutural (SEBRAE, 2015), cujo processo de produção pode ser dividido em 11 fases (Figura 1): extração, desintegração, mistura, laminação, extrusão, corte, secagem, queima, inspeção, estocagem e expedição, conforme descrição a seguir:

Extração

A primeira etapa do processo de produção da cerâmica vermelha é a extração da argila (principal matéria-prima do processo) de depósitos espalhados na crosta terrestre. Este processo é realizado a céu aberto, nos meses de menor precipitação, e pode ser feito de forma manual ou mecanizada, por meio de escavadeiras, pás carregadeiras, trator de esteira com lâmina, entre outros. Após a extração dos materiais, os mesmos são beneficiados e classificados de acordo com a granulometria, podendo também passar por um processo de purificação (ABCERAM, 2018; FIEMG & FEAM, 2013).

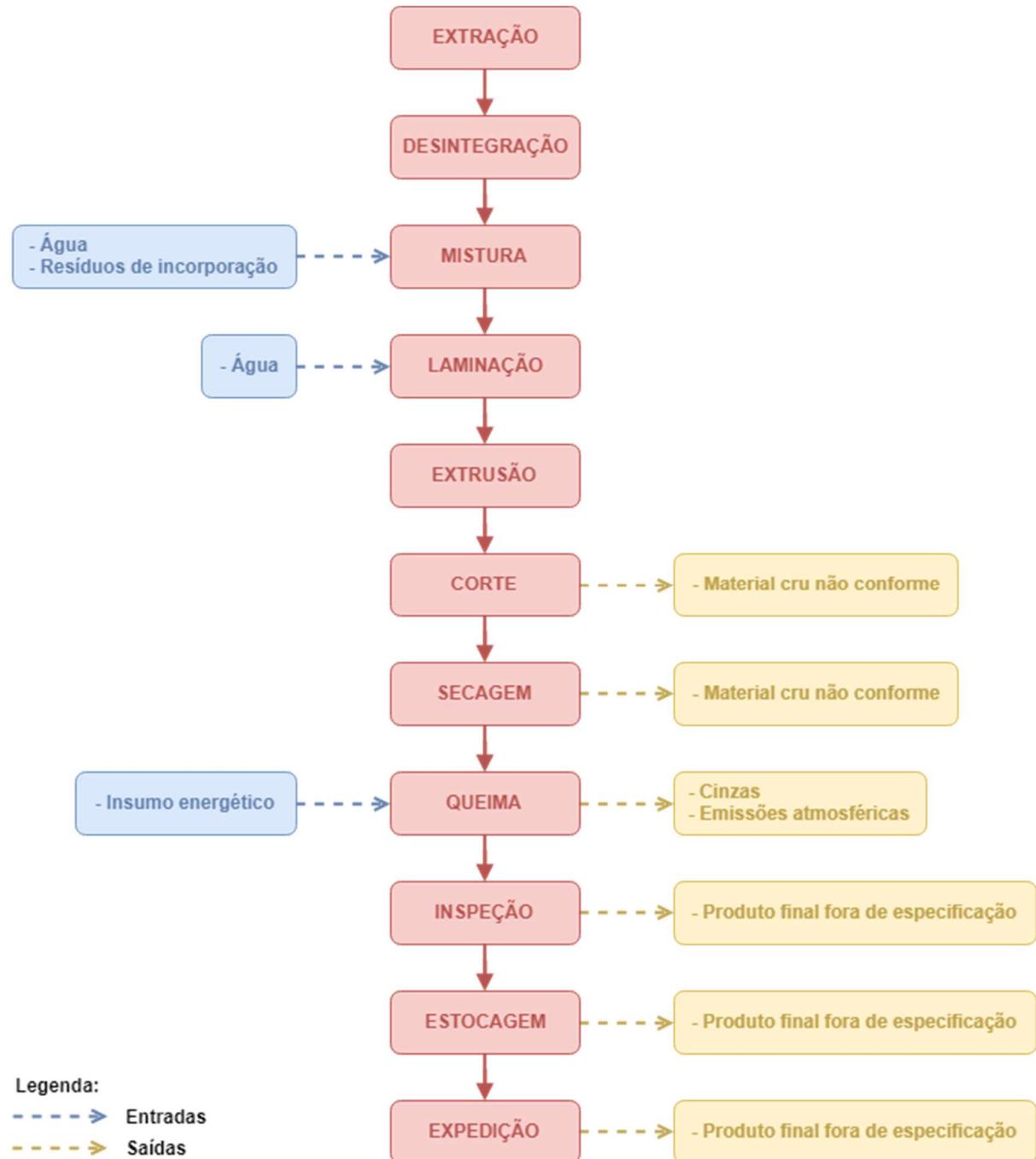


Figura 1 - Fluxograma do processo produtivo.

Fonte: FIEMG e FEAM (2013).

Desintegração

Após a extração, a argila é armazenada em pequenos lotes, que são cobertos com uma capa plástica a fim de agilizar o processo de decomposição da matéria orgânica e sais solúveis. O processo de descanso da argila é importante pois traz melhorias nos resultados de conformação do produto acabado (FIEMG; FEAM, 2013).

Mistura

Normalmente o processo de fabricação de materiais cerâmicos envolve duas ou mais matérias-primas, aditivos e água. Assim, uma das principais etapas deste processo é a correta dosagem das matérias-primas e dos aditivos. Esta, por sua vez, deve seguir, de forma rigorosa as formulações de massas previamente estabelecidas (ABCERAM, 2018). A boa realização desta etapa melhora a qualidade do produto final, reduz perdas e aumenta o desempenho ambiental do processo (FIEMG; FEAM, 2013).

O processo de mistura deve ser desenvolvido de forma a obter boa homogeneização da argila. Para facilitar o processo, a adição de água deve ser realizada no centro e não nas laterais, podendo também ser utilizada água aquecida para acelerar o processo de absorção da mesma pelo grão de argila. Aconselha-se que a massa cerâmica descanse por um período de 24 a 48 horas (FIEMG; FEAM, 2013).

Laminação

Os laminadores são equipamentos responsáveis pela determinação do tamanho máximo dos grãos de argila, contribuindo, de forma direta, para a secagem, resistência mecânica, queima e aparência final do produto acabado. São compostos por dois cilindros paralelos que devem operar em sentido oposto, tendendo ao mesmo centro, e com diferentes velocidades de rotação a fim de diminuir o consumo energético e melhorar a capacidade de trituração dos grãos (MINEROPAR, 2007).

Extrusão

A extrusão é um método utilizado na indústria cerâmica para conferir forma aos materiais. Nele, a massa plástica é colocada dentro de uma extrusora, também conhecida como maromba, onde é compactada e forçada a passar por um bocal de um determinado formato. Assim, obtém-se uma coluna extrudada, que pode ser cortada a fim de se obter diferentes tipos de peças, tais como tijolos vazados, blocos e tubos, por exemplo (ABCERAM, 2018).

Corte

Na etapa de corte são conferidas as dimensões desejadas do produto. Pode ser realizada por meio de cortadores manuais ou automáticos. Após o corte as peças passam por um processo de inspeção visual. Estando aprovadas, as peças são enviadas para o setor de secagem, caso contrário, são reintroduzidas na etapa de preparação da massa (FIEMG; FEAM, 2013).

Secagem

Nesta etapa a umidade residual dos produtos é eliminada, podendo ser realizada de forma natural ou artificial. No decorrer da secagem, o teor de umidade é reduzido de 20 a 30% para cerca de 5% (SEBRAE; ESPM, 2008).

A secagem natural possui menor custo com a geração de calor, sendo realizada em locais com condições climáticas favoráveis. No entanto, o tempo de secagem é elevado, sendo utilizado quando se tem baixa produção, além de poder afetar a qualidade final das peças devido a possibilidade do aparecimento de trincas e deformações caso o processo não seja realizado de forma controlada (FIEMG; FEAM, 2013; OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

Por outro lado, a secagem artificial apresenta menor tempo de secagem, maior produtividade, redução de perdas e maior qualidade do produto. Possui como desvantagens o custo com a geração de calor, necessidade de maior conhecimento técnico por parte do operador e de equipamentos e controles (FIEMG; FEAM, 2013).

Queima

A operação de queima também é conhecida como sinterização e, nela, os produtos adquirem suas propriedades finais. Após o processo de secagem, as peças são submetidas a um tratamento térmico. Neste, os produtos são introduzidos em fornos que operam em três fases: aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada; permanência em uma determinada temperatura por um intervalo de tempo; e resfriamento até temperaturas inferiores a 200 °C (ABCERAM, 2018). De forma geral, a temperatura de queima é da ordem de 750 °C à 900 °C para tijolos; 900 °C à 950 °C para telhas; e de 950 °C à 1200 °C para tubos cerâmicos (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010).

O processo de queima pode ter duração de alguns minutos até vários dias, conforme o tipo de produto que está sendo fabricado. Nele, os materiais cerâmicos sofrem diferentes transformações, dentre as quais estão: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e soldagem de grãos (ABCERAM, 2018). Falhas neste processo podem trazer defeitos aos materiais, tais como trincas e porosidade, que afetam sua resistência mecânica e tenacidade (SCHULLER; BIANCHI; AGUIAR, 2008).

Inspeção

Após a queima o produto é submetido a um controle de qualidade em que são selecionadas, de forma aleatória, uma determinada quantidade de peças. Os produtos são

avaliados por uma série de testes, tais como, absorção de água, torção, permeabilidade, sonoridade e empenamento a fim de verificar se atendem aos requisitos de mercado (FIEMG; FEAM, 2013).

Estocagem

Os produtos são organizados em lotes, que devem ser devidamente identificados com a data e número do forno. Os lotes novos não devem ser misturados com os chamados lotes velhos a fim de evitar problemas de encaixe, por exemplo (FIEMG; FEAM, 2013).

Expedição

A etapa final do processo de fabricação de materiais cerâmicos é a expedição, em que ocorre o envio dos produtos fabricados para o mercado consumidor.

2.3 Processo de queima

Os materiais cerâmicos podem adquirir diferentes propriedades conforme o processo de fabricação empregado, sendo estas determinadas pela composição química das matérias-primas utilizadas, bem como pela forma em que é desenvolvido o processo de queima (OLIVEIRA; HOTZA, 2015; SCHULLER; BIANCHI; AGUIAR, 2008). A tipologia e as características técnicas do produto a ser fabricado, a temperatura máxima da queima e a duração do ciclo de queima serão determinados, em muitos casos, pela forma em que as matérias-primas se comportam quando são submetidas à ação do calor (PINTO; SOUSA; HOLANDA, 2005).

As propriedades da cerâmica podem ser divididas em dois grupos: propriedades mineralógicas e propriedades tecnológicas. Entre os aspectos mineralógicos importantes a se considerar estão: granulometria, peso específico real dos grãos, plasticidade e limite de liquidez. Por outro lado, pode-se citar a retração linear, perda de massa, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente e resistência mecânica como propriedades tecnológicas (KOHL; MEDTLER; SANTOS, 2015).

No processo de queima são desenvolvidas uma série de transformações físico-químicas, tais como, perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem (sinterização) dos grãos. As temperaturas de queima situam-se entre 800 °C a 1000 °C para a maioria dos produtos (FIEMG; FEAM, 2013).

O principal combustível utilizado na indústria cerâmica, a lenha, apresenta baixo rendimento energético, o que prejudica a qualidade e os padrões técnicos dos produtos. Além

disso, o uso deste combustível traz impactos ao meio ambiente devido à produção de cinzas, óxidos de enxofre, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio, que causam a chuva ácida e danos à camada de ozônio (ABDI, 2016).

A poluição do ar ocasionada em virtude da produção de materiais cerâmicos ocorre, principalmente, devido ao tipo de combustível utilizado na queima; à tecnologia dos fornos e ao não emprego de tecnologias para o controle das emissões atmosféricas (CAMARA *et al.*, 2015). Os principais impactos ambientais, geração de resíduos sólidos e poluentes gasosos, envolvidos no processo produtivo de uma cerâmica modelo, bem como os insumos necessários a este podem ser observados na Figura 2.

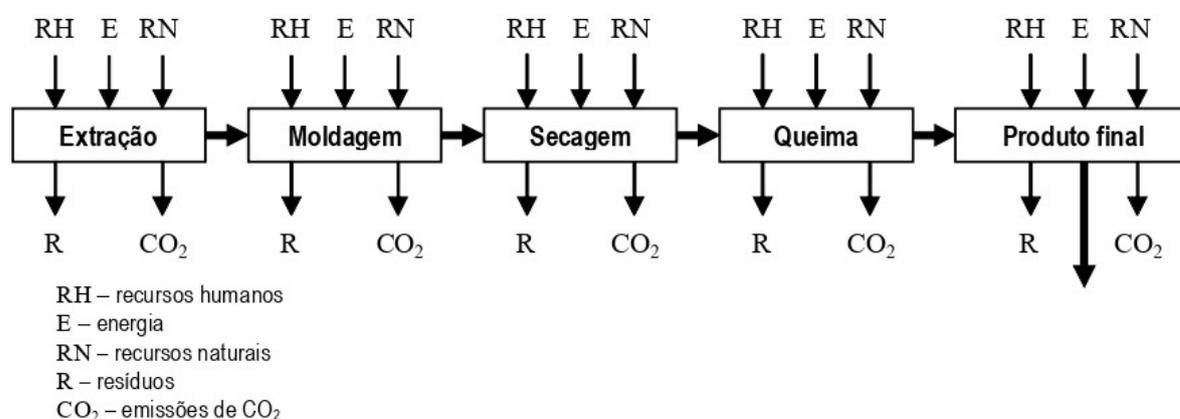


Figura 2 - Impactos ambientais do processo produtivo.
 Fonte: Grigoletti e Sattler (2003).

Os processos de queima e secagem devem ser realizados de forma controlada, uma vez que nestes são desenvolvidas as reações termoquímicas, devendo-se, portanto, respeitar os gradientes e temperaturas limites específicos da massa. As reações mencionadas são responsáveis pela obtenção das características físico-químicas dos produtos, tais como, absorção de água, resistência mecânica e coloração (DADAM, 2005). Quando realizada de forma não-controlada, o material cerâmico pode apresentar uma série de defeitos, conforme descrito no Quadro 1.

A etapa pós-queima pode trazer significativas perdas para o setor cerâmico quando realizada de forma ineficiente, podendo variar de 5% nas indústrias mais estruturadas e modernas até 20% nas indústrias mais desorganizadas e defasadas. Indústrias cerâmicas de pequeno porte em Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro, chegam a apresentar 10% de perda na etapa de queima (ABDI, 2016).

Diversos métodos com base em estatística e/ou diagramas de fase vêm sendo empregados na formulação ou reformulação de misturas cerâmicas a fim de obter propriedades

específicas. Além disso, cada vez mais, técnicas de modelagem e controle têm sido aplicadas à otimização de etapas do processo de fabricação cerâmico com o intuito de aumentar a produtividade e a qualidade dos materiais, assim como o rigor de leis ambientais tem incentivado o uso mais eficiente de recursos minerais e energéticos (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

Quadro 1 – Defeitos e possíveis causas durante o processo de queima.

Defeito	Tipo	Possível causa
falta de ortogonalidade	dimensional	- queima diferencial centro-lateral do forno.
calibre	dimensional	- queima diferencial entre o centro e as laterais do forno; - variações de queima com o tempo.
curvatura	dimensional	- curva de queima inadequada às condições de massa, formato, espessura etc.; - temperatura de queima muito alta; - movimentação das peças dentro do forno.
trincas	estrutural / superficial	- secagem brusca de água; - choque térmico na saída do forno.
quebra nas pontas	estrutural	- movimentação abrupta.
rupturas no forno	estrutural	- secagem brusca na entrada do forno; - falta de ventilação; - choque térmico; - peças já debilitadas nos processos anteriores.
porosidade inadequada	estrutural	- temperatura baixa e/ou ciclo muito rápido: porosidade alta; - temperatura alta e/ou ciclo muito lento: porosidade baixa.
coração negro	estrutural	- curvas de temperatura ou pressão que dificultam a desgaseificação e oxidação.
inchamento	estrutural	- incorretas curvas de temperatura e/ou pressão do forno.
furos	superficial	- desgaseificação insuficiente; - excessiva temperatura de queima.
bolhas	superficial	- desgaseificação inadequada ou insuficiente.
tons	superficial	- variações das condições de queima: de um lado a outro do forno; e instabilidade ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado de Martín, 2004.

2.3.1 Fornos cerâmicos

Após a secagem os produtos são submetidos aos fornos cerâmicos em temperaturas que podem variar entre 850 °C e 950 °C por um determinado intervalo de tempo, que é definido de acordo com o tipo da matéria-prima, do forno e da peça a ser queimada (HENRIQUES JR; RODRIGUES, 2017).

Os fornos cerâmicos podem ser classificados em intermitentes, semicontínuos e contínuos. A escolha de um determinado tipo está condicionada ao tipo de combustível, porte das instalações, tipo e qualidade do produto, matéria-prima e fatores econômicos (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010; FIEMG; FEAM, 2013). Nos fornos os produtos adquirem suas propriedades finais, tais como, cor, porosidade e resistência mecânica, sendo também o local em que ocorre o maior consumo de energia térmica (DADAM, 2005).

No Brasil cerca de 70% das indústrias cerâmicas utilizam fornos intermitentes, seguido de 28% de semicontínuos e 2% de fornos contínuos. Os fornos intermitentes são utilizados por pequenos fabricantes devido ao menor custo inicial. Já os fornos semicontínuos são adotados por médias empresas; estas também utilizam fornos intermitentes de maior capacidade ou maior quantidade de fornos por empresa. Fornos túnel de pequena capacidade e baixo custo de construção também estão sendo desenvolvidos na indústria brasileira nos últimos anos a fim de atender às plantas de produção, assim como a capacidade de aquisição das empresas (ABDI, 2016).

Os fornos contínuos apresentam maior eficiência energética, seguidos pelos fornos semicontínuos e intermitentes. Apesar da baixa eficiência, no Brasil, os fornos intermitentes são predominantes, sendo a lenha o principal combustível utilizado no setor cerâmico. A queima da lenha traz grandes impactos ao meio ambiente devido às emissões não controladas de efluentes gasosos e particulados (ABDI, 2016).

Fornos intermitentes

Nos fornos intermitentes os blocos a serem aquecidos são colocados no interior do forno, permanecendo estáticos em uma determinada posição até alcançarem uma temperatura específica, sendo, posteriormente, resfriados até a temperatura ambiente e removidos do forno da forma como foram colocados, sendo a produção feita por batelada. Neste grupo de fornos encontra-se o caipira, caieira, abóboda, garrafão, metálico móvel, vagão, paulistinha, igrejinha, entre outros (ABDI, 2016; HENRIQUES JR; RODRIGUES, 2017).

Possuem menor rendimento e produção, uma vez que constantemente sofrem processos de aquecimento e resfriamento, o que contribui para um gasto de energia adicional, haja vista que boa parte da energia é perdida para o ambiente ou é gasta para aquecer a estrutura de refratários, constituindo, desta forma, perda de calor (HENRIQUES JR; RODRIGUES, 2017).

Entre suas principais características estão: maior consumo específico ou baixo rendimento térmico; aquecimento irregular com a presença de diferentes temperaturas no interior do forno; maior número de operadores; concepção simples e de construção fácil e rápida; maior flexibilidade de produção, entre outros (KAWAGUTI, 2004).

Na Figura 3 é apresentado um forno intermitente do tipo abóboda. Neste forno as fornalhas são localizadas nas paredes laterais da câmara, em número de quatro a seis. O piso interno das câmaras é construído de tijolos comuns com aberturas, às quais contam com canais subterrâneos em sua parte inferior a fim de interligar o forno à chaminé e aos secadores, quando existentes. As chaminés também são construídas em alvenaria de tijolos comuns e podem alcançar de 15 a 30 m (MESSIAS, 1996). O calor produzido nas fornalhas segue um fluxo ascendente e, ao atingir o teto, passa ter a direção descendente, passando pela carga e pelo piso crivado, onde ocorre a passagem dos gases, sendo esta induzida por uma chaminé através de dutos subterrâneos (HENRIQUES JR; RODRIGUES, 2017).

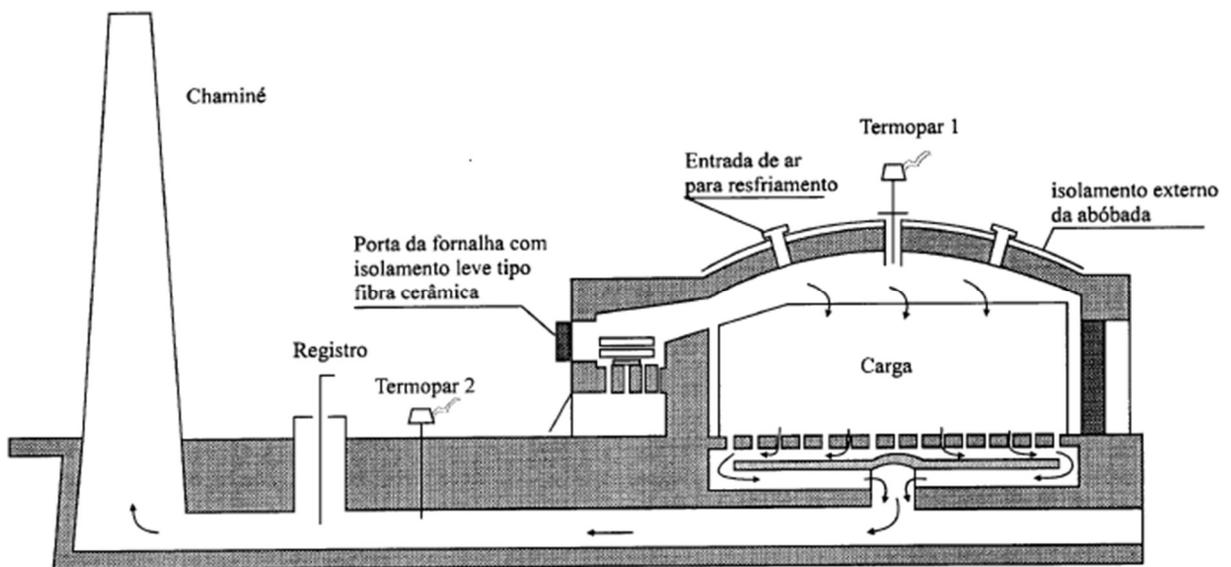


Figura 3 - Esquema de um forno intermitente.
Fonte: Messias (1996).

Fornos semicontínuos

Os fornos semicontínuos se caracterizam pelo razoável rendimento térmico, boa produtividade, fácil operação, além de serem econômicos em termos operacionais, entretanto, apresentam alto custo de construção. Seus principais tipos são: Hoffman e Frederico (ABDI, 2016).

Devido às similaridades, os fornos intermitentes e semicontínuos podem ser reunidos em uma mesma categoria, apresentando as seguintes vantagens: concepção simples; rápida e fácil construção; ciclo de queima rápido; baixo custo de construção; baixo nível de qualificação e mão de obra. De forma paralela, possuem as seguintes desvantagens: inexistência de controle de gases; aquecimento irregular; difícil reaproveitamento dos gases de exaustão; grandes perdas de produtos e alto consumo de combustível; baixa produtividade, longo tempo para pré-aquecimento; interrupções para carga e descarga dos blocos (ABDI, 2016).

Fornos contínuos

Nos fornos contínuos a queima é realizada sem interrupção para carregamento ou descarga dos blocos cerâmicos, isto é, enquanto um lote sai do forno, outro é introduzido em seu interior; possui como tipo principal o forno túnel. O movimento das peças neste forno é feito por meio de carros metálicos (vagonetas), sobre os quais é montada uma base cerâmica para a disposição das peças. Nestes fornos o ar quente, que sai da zona de resfriamento, pode ser reaproveitado para auxiliar no processo de combustão ou na secagem das peças (HENRIQUES JR; RODRIGUES, 2017).

Os fornos contínuos apresentam como vantagens: controle maior sobre a atmosfera do forno; aquecimento e queima uniforme; reaproveitamento dos gases utilizados na queima; menor consumo de combustível; maior capacidade de produção; pequena perda de rejeitos; baixo custo de mão de obra, e como desvantagens: elevado custo de construção; eficiência maior com combustíveis mais nobres; exigência de mão de obra qualificada para operação e controle de equipamento (ABDI, 2016).

2.3.2 Curva de queima

A operação de queima é conduzida por meio da chamada “curva de queima”, sendo essa um instrumento utilizado para representar a distribuição de temperatura dos gases ao longo do comprimento em fornos túneis e ao longo do tempo em fornos intermitentes (NICOLAU, 2012). Permite que a queima de um produto seja feita com qualidade e continuidade, sendo possível,

por meio dela, a determinação dos pontos críticos que causam defeitos no material cerâmico (FIEMG; FEAM, 2013).

O resultado de cada queima nos fornos intermitentes pode se apresentar de forma diferente, assim, cabe à empresa buscar uma curva de queima compatível com o produto que está sendo fabricado, assim como ao forno que está sendo usado no momento. A mudança na curva de queima pode ser obtida através da alteração da duração da queima e da secagem final que ocorre no interior do forno (NICOLAU, 2012). A Figura 4 representa a curva de queima teórica de um forno intermitente.

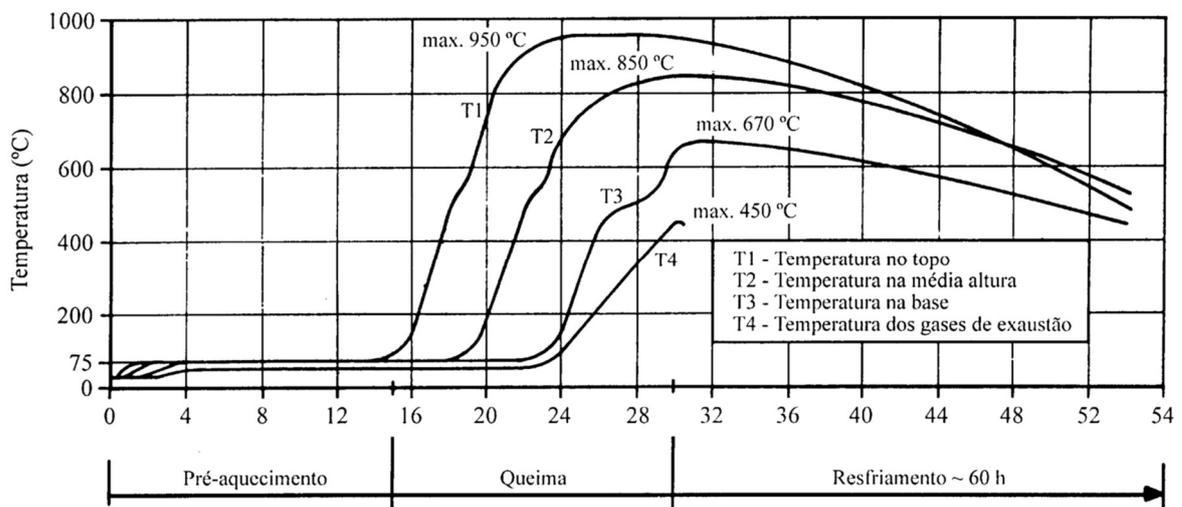


Figura 4 - Curva de queima de um forno intermitente.
Fonte: Messias (1996).

O processo de queima se desenvolve em três estágios: pré-aquecimento, queima, e resfriamento, conforme descrição a seguir (MESSIAS, 1996):

Após o processo de secagem, o material conformado ainda pode conter água residual, assim, a primeira fase do processo de queima se caracteriza pelo aquecimento gradual, sendo denominada “esquente”. A remoção da umidade é realizada a baixas temperaturas a fim de evitar trincas e fissuras indesejáveis ao material e pode ter duração de 8 a 24 horas, de acordo com a matéria-prima; eficiência do processo de secagem; geometria e natureza do produto.

Na segunda fase é realizada a queima propriamente dita, conhecida como “fogo forte”, em que as temperaturas são elevadas em um maior ritmo. Ao se alcançar a temperatura de queima mínima, 800 °C à 900 °C, suspende-se a alimentação das fornalhas por um determinado período a fim de conferir uniformidade à temperatura em toda a carga.

Por fim, na última fase, o material cerâmico é submetido a um resfriamento gradual por meio da entrada do ar frio pelas fornalhas que resfria a carga e as paredes do forno, sendo, normalmente, realizado de forma natural. Em algumas indústrias, quando a temperatura interna do forno atinge níveis que permitem a abertura das portas, são posicionados ventiladores que fazem o resfriamento forçado da carga.

No processo de fabricação de materiais cerâmicos existem quatro intervalos de temperatura em que as reações físico-químicas desenvolvidas no material são consideradas críticas (DUTRA, 2007):

- 100 °C – 120 °C: transformação da água líquida, utilizada na conformação do material, em vapor de água. Nesta fase o vapor ocupa um volume maior, o que pode ocasionar um aumento na pressão interna da peça. Se a velocidade com que a água líquida se transforma em vapor for maior do que a velocidade com que o vapor percorre o interior do corpo até a superfície, então o material cerâmico pode sofrer trincas e quebra.
- 400 °C – 800 °C: decomposição dos carbonatos e eliminação da água de constituição dos argilominerais. A falta de oxigênio nesta etapa pode provocar defeitos como inchamento ou bolhas, como também pode fazer com que o ferro se transforme em óxido ferroso, que pode provocar o chamado “coração negro” nas peças.
- 573 °C: transformação do quartzo α em quartzo β , que ocasiona um aumento brusco de volume. Assim, nesta transformação, a taxa de aquecimento deve ser lenta para evitar o aparecimento de trincas.
- resfriamento: pode causar trincas e recristalização do material, se realizado de forma rápida ou muito lenta, respectivamente.

A velocidade de aquecimento do forno varia de acordo com a alimentação das fornalhas, bem como com o tipo de combustível empregado. O controle da queima é realizado pelo registro da chaminé que, se não feito de forma adequada, pode aumentar o consumo de combustível e trazer problemas de homogeneização na queima (FIEMG; FEAM, 2013).

Em relação ao registro da chaminé, um aspecto a se considerar é a quantidade de ar na combustão. Um excesso de ar diminui a temperatura da chama e aumenta as perdas de calor, o que reduz a eficiência térmica. Por outro lado, uma baixa quantidade de ar pode resultar em uma combustão incompleta e na geração de gases poluentes, fuligem e fumaça (PINHEIRO; VALLE, 1995).

Ao atingir a temperatura máxima, recomenda-se que produtos vazados sejam mantidos por, no mínimo, seis horas de patamar (tempo em que o material fica na máxima temperatura); e telhas e tijolos maciços sejam mantidos por 10 horas no mínimo. Estudos, por parte da empresa, devem ser realizados a fim de determinar o patamar para cada tipo de argila e material produzido (FIEMG; FEAM, 2013).

A curva de queima não é determinada somente pela qualidade final desejada, haja vista que um tempo de queima superior ao necessário acarreta aumento no consumo de energia e atraso no processo produtivo. A flexibilidade de produção, com a fabricação de diferentes produtos por uma mesma empresa, torna necessária a busca de uma curva de queima ótima para cada produto (KAWAGUTI, 2004).

As temperaturas presentes em diferentes pontos do forno podem ser obtidas por meio de termopares, sensores de temperatura. Consistem em dois fios de metais diferentes, que são conectados a fim de formar duas juntas: de medição (junta quente) e de referência (junta fria). Seu funcionamento se baseia no efeito *Seebeck*, no qual ocorre o aparecimento de uma tensão, da ordem de mV, entre os terminais da junta de referência quando a junta de medição é submetida a uma diferença de temperatura (FRANCHI, 2015).

Os termopares devem ser inspecionados de forma regular a fim de identificar problemas a serem corrigidos, bem como podem ser usados para promover a melhoria do processo como um todo. De forma geral, o investimento realizado para este monitoramento é considerado baixo, haja vista o retorno positivo que a instrumentação do processo proporciona (NICOLAU, 2012).

2.4 Transferência de calor e fluxo dos gases no forno

A transferência de calor pode ser definida como a energia térmica em trânsito ocasionada por uma diferença de temperaturas no espaço, podendo acontecer de três formas: condução, convecção e radiação (BERGMAN *et al.*, 2011).

A condução ocorre através do meio, que pode ser um sólido ou um fluido, quando há um gradiente de temperatura. Neste processo a energia flui das partículas mais energéticas para as menos energéticas (BERGMAN *et al.*, 2011). A equação (1) quantifica a taxa de transferência de calor, sendo conhecida como *lei de Fourier*.

$$\vec{q} = -k\vec{\nabla}T \quad (1)$$

onde:

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k}$$

q: fluxo de calor por condução (W/m²);

k: condutividade térmica (W/mK);

∇T : gradiente de temperatura (K/m).

O processo de convecção se dá entre uma superfície e um fluido em movimento quando estes estiverem a diferentes temperaturas. A expressão que quantifica este processo de transferência de calor é conhecida como a *lei do resfriamento de Newton*, sendo definida pela equação (2) (BERGMAN *et al.*, 2011).

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

q: fluxo de calor por convecção (W/m²);

h: coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²K);

T_s: temperatura da superfície (K);

T_∞: temperatura do fluido (K).

Por fim, na radiação a transferência de calor ocorre pela emissão de ondas eletromagnéticas, não necessitando de um meio material para a transferência de energia (BERGMAN *et al.*, 2011), sendo a equação (3), conhecida como *lei de Stefan-Boltzmann*, utilizada para mensurar a potência irradiada por uma superfície.

$$P = \epsilon\sigma AT_s^4 \quad (3)$$

P: potência total da radiação emitida (W);

σ: constante de Stefan-Boltzmann (σ = 5.67 x 10⁻⁸ W/m²K⁴);

ε: emissividade (0 ≤ ε ≤ 1);

A: área da superfície (m²);

T_s: temperatura absoluta (K) da superfície.

No interior dos fornos o aquecimento das peças é realizado por convecção e por radiação, com o calor sendo gerado por fontes externas (queima de combustível ou reaproveitamento de gases quentes, por exemplo). No interior das peças e das pilhas de peças, a transferência de calor ocorre por condução e radiação entre os materiais, e por convecção através dos gases (DADAM, 2005).

2.4.1 Análise dos processos de transferência de calor e fluxo de gases

A compreensão dos processos de transferência de calor e do fluxo de gases no interior dos fornos é de grande importância para que seja possível propor melhorias no processo de queima. Conforme mencionado anteriormente, grande parte das indústrias de cerâmica vermelha utiliza processos artesanais, com baixo nível de tecnologia, o que dificulta a medição das variáveis de processo.

Uma forma de analisar os processos de transferência de calor e fluxo de gases nos fornos cerâmicos é por meio da construção de modelos físicos em escala reduzida, no entanto, para isso, são necessários recursos financeiros e tempo. O uso de modelos matemáticos se apresenta como uma alternativa aos modelos físicos, entretanto, devido à complexidade dos processos envolvidos, a obtenção da solução analítica pode se tornar difícil. Nesse contexto, os modelos numéricos se apresentam como uma alternativa para avaliar o comportamento dos sistemas (BAPTISTA JR., 2014).

De acordo com Athayde (2013), é de grande complexidade a resolução de problemas de escoamento de gases no interior dos fornos. Segundo os autores, a *Computacional Fluid Dynamics* (CFD), ou fluidodinâmica computacional é indicada para avaliar esses problemas, os quais envolvem fenômenos de transferência de calor e de quantidade de movimento em fluidos. A partir do exposto, neste trabalho, as técnicas de CFD foram utilizadas para avaliar a distribuição de temperatura nas peças cerâmicas, bem como o fluxo de gases no interior do forno.

Segundo Nery (2010) os avanços tecnológicos na área computacional tornaram o processo de criação e análise de resultados de um modelo de CFD menos trabalhoso, mais rápido e, conseqüentemente, com menor custo, diferente do que era observado nas décadas de 1970 e 1980, em que a CFD era utilizada, quase que exclusivamente, na pesquisa. Assim, o autor afirma que a fluidodinâmica computacional é uma ferramenta de projeto industrial estabelecida, que ajuda a reduzir escalas de tempo do projeto e a melhorar processos de engenharia.

A CFD é um dos ramos da mecânica dos fluidos, que pode ser definida como a simulação numérica de processos físicos e/ou físico-químicos que apresentam escoamento (CAVALCANTI, 2013), transferência de calor, transferência de massa, reações químicas e fenômenos relacionados (JEONG; SEONG, 2014). Enquanto as soluções analíticas possibilitam determinar as propriedades das variáveis em qualquer ponto do meio, as soluções numéricas permitem determiná-las apenas em pontos discretos. Assim, torna-se essencial, na

solução numérica, a seleção destes pontos a fim de que seja possível a criação de uma rede, na qual cada ponto representa uma região do meio, sendo em torno destes pontos realizados balanços de massa e energia das variáveis desejadas (INCROPERA *et al.*, 2008; JAHN, 2007).

De acordo com Cavalcanti (2013), o processo de modelagem, utilizando as técnicas de CFD, pode ser dividido em cinco etapas:

- criação da geometria: fase em que a geometria do domínio considerado é construída por meio de ferramentas CAD (*Computer Aided Design*);
- criação da malha: a malha é gerada sobre a geometria criada e corresponde à divisão do domínio em volumes de controle, sobre os quais obtém-se a solução das equações;
- pré-processamento: etapa em que são definidos os modelos, as condições de contorno (planos de simetria, paredes isotérmicas e adiabáticas, por exemplo) e os parâmetros necessários para a obtenção da solução numérica;
- solução numérica: nesta fase desenvolve-se a solução numérica em si;
- pós-processamento: nesta fase os resultados são analisados por meio de gráficos, campos de variáveis, campos vetoriais, entre outros.

A dinâmica dos fluidos computacional tem como base as leis da conservação das propriedades físicas, tais como, conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia, sendo estas conhecidas como equações de Navier-Stokes, conforme apresentado a seguir (ANSYS, 2019a; ATHAYDE, 2013):

Na equação (4), equação de conservação da massa ou equação da continuidade, o primeiro termo refere-se ao acúmulo de massa, enquanto o segundo apresenta a taxa de transporte de massa por convecção.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

ρ : densidade do fluido (kg/m^3);

\vec{v} : velocidade do fluido (m/s);

t: tempo (s).

Na equação (5), os termos da equação de conservação da quantidade de movimento se referem à taxa de acúmulo de quantidade de movimento, taxa de quantidade de movimento por convecção e taxa de quantidade de movimento por difusão. Podem ser adicionados, nesta equação, termos para avaliar forças externas, tais como, gravitacional, ou resistência ao fluxo.

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + S_m \quad (5)$$

onde:

$$\bar{\tau} = \mu(\nabla(\vec{v}) + \nabla(\vec{v})^T - \frac{2}{3}\delta\nabla \cdot \vec{v})$$

ρ : densidade do fluido (kg/m³);

\vec{v} : velocidade do fluido (m/s);

t: tempo (s);

p: pressão (N/m²);

$\bar{\tau}$: tensor das tensões;

μ : viscosidade cinemática (m²/s);

S_m : termo-fonte;

δ : delta de Kroenecker.

Na equação (6), equação de conservação de energia, os termos se referem ao aumento de energia interna, taxa de transporte de energia interna por convecção, taxa de transporte de energia por condução e um termo fonte (trabalho).

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla(k_{\text{eff}}\nabla T - \sum_i h_i \vec{j}_i + (\bar{\tau}_{\text{eff}}\vec{v})) + S_h \quad (6)$$

ρ : densidade do fluido (kg/m³);

E: energia interna (J/kg);

t: tempo (s);

\vec{v} : velocidade do fluido (m/s);

p: pressão (bar);

k_{eff} : condutividade térmica efetiva (W/mK);

T: temperatura (K);

h_i : entalpia (J/Kg);

$\bar{\tau}_{\text{eff}}$: tensor;

S_h : termo-fonte de calor (J/m³).

As equações de Navier-Stokes podem ser discretizadas e resolvidas numericamente (NERY, 2010). A resolução destas equações, na fluidodinâmica computacional, pode ser realizadas através de três abordagens numéricas: método das diferenças finitas, método dos elementos finitos, e método dos volumes finitos, cuja descrição detalhada pode ser obtida em Peiró e Sherwin (2005) e, de forma breve, a seguir, conforme Jeong e Seong (2014) e Kumar (2009):

- Método das diferenças finitas: baseia-se na aplicação das expansões das séries polinomial, polinomial de Legendre, Fourier e Taylor para representar as equações diferenciais. Neste método o domínio computacional é dividido em células hexaédricas, sendo a solução obtida em cada ponto nodal.
- Método dos elementos finitos: domínio computacional é dividido em domínios menores (elementos finitos), e a solução em cada elemento é construído a partir de funções básicas. Por serem utilizadas funções básicas, as condições de contorno podem ser mais difíceis de serem formuladas.
- Método dos volumes finitos: baseia-se na forma integral da equação diferencial parcial a ser resolvida (conservação da massa, momento e energia). O domínio computacional é discretizado em volumes finitos e, para cada volume, as equações governantes são resolvidas.

O uso de técnicas de CFD nas últimas décadas tem possibilitado, aos engenheiros, avaliar o desempenho de processos quando diferentes situações são apresentadas e obter soluções para problemas com geometria complexa e condições de contorno. Entre as vantagens do uso destas técnicas estão: flexibilidade para alterar parâmetros do projeto sem a necessidade de custear novos equipamentos, o que diminui, desta forma, seus custos; tempo de resposta mais rápido do que o obtido por meio de experimentos; possibilidade de investigar a raiz dos problemas e obter soluções adequadas; compreensão dos problemas de escoamento, principalmente em regiões em que as medições são difíceis (KUMAR, 2009).

2.5 Trabalhos relacionados

Dada a importância da etapa de tratamento térmico no processo de fabricação de produtos cerâmicos, diferentes estudos vêm sendo realizados ao longo dos anos com o intuito de promover melhorias na qualidade final do produto, reduzir o consumo de combustível nos fornos, uniformizar a produção das peças, e reduzir a emissão de poluentes na atmosfera, conforme descrição a seguir.

A fim de compreender o princípio de funcionamento, determinar o comportamento térmico e o desempenho em relação ao consumo de energia de um forno intermitente, tipo paulistinha, ao longo do processo de queima, Kawaguti *et al.* (2003) desenvolveram um programa de simulação numérica por meio do método de diferenças finitas. O estudo teve por finalidade reduzir o consumo de energia, a melhoria do produto queimado e a conversão do

combustível do forno: de óleo BPF para gás natural, sendo realizadas comparações quando da utilização destes dois combustíveis. Os resultados do algoritmo foram comparados com medições efetuadas no forno (interior, parede lateral e abóbada), sendo verificada a viabilidade técnica da substituição do combustível. Ademais, o programa de simulação criado apresentou diferenças nas temperaturas do piso do forno sendo, portanto, necessário maior aprimoramento deste.

Visando prever o comportamento de um forno, tipo túnel, Dadam (2005) desenvolveu um programa de simulação numérica, sendo usada a técnica de volumes finitos, baseada em balanços de massa e energia para diferentes volumes dos componentes do forno, tais como, carga, gases, vagonetas e paredes. Os resultados experimentais, com o forno em operação, foram confrontados com os resultados da simulação numérica, sendo consideradas adequadas as formulações matemáticas utilizadas. O programa permitiu determinar a eficiência térmica do forno e estabelecer curvas de queima do produto cerâmico, por exemplo, além de ser flexível, uma vez que pode ser adaptado para outros fornos túnel bastando, para isso, alterar as dimensões do forno e as variáveis de processo que se deseja simular.

Sabendo que os maiores custos em uma indústria cerâmica está relacionado ao uso de energia térmica em seus processos produtivos, Sebastião, Fernandes e Nandi (2013) propuseram em seu trabalho a melhoria da eficiência energética de um forno contínuo por meio da troca de queimadores, com o intuito de reduzir os custos do processo de fabricação de telhas prensadas, bem como diminuir as emissões de poluentes. De acordo com os autores, a concorrência de mercado e os aspectos ambientais demandam a busca tanto por equipamentos e acessórios mais eficientes, como também por um melhor aproveitamento de insumos disponíveis no processo. Em seu trabalho, os autores apresentaram o queimador como um equipamento que pode proporcionar uma economia significativa de energia, haja vista a modernização percebida neste nos últimos anos. Constatou-se que a troca dos queimadores e medidas de controle foram capazes de reduzir o consumo de combustível em aproximadamente 26%, proporcionando, desta forma, grande economia ao processo.

Para melhorar as condições nas quais o processo de queima se desenvolve, bem como reduzir os impactos ambientais, Azevedo (2017) propôs um sistema de recuperação de calor (SRC), que reaproveita o ar de exaustão do forno para preaquecer o ar de combustão a fim de possibilitar uma economia de combustível no processo de queima, bem como uma redução na emissão de gases poluentes na atmosfera. Constatou-se, após a sua construção, que o SRC possibilitou a recuperação de uma considerável parcela de calor que antes era perdido e

inutilizado, reduziu o consumo de combustível no processo de queima e, conseqüentemente, contribuiu para a diminuição das emissões de gases poluentes na atmosfera. Além disso, foram realizados testes nos produtos cerâmicos queimados, sendo observado que o SRC não altera, de forma significativa, suas propriedades.

Com o intuito de tornar o processo de queima mais homogêneo, reduzir a quantidade de combustível consumido, bem como diminuir os impactos ambientais, Lima (2018) propôs um sistema de controle de alimentação para fornos intermitentes utilizados na indústria de cerâmica vermelha. Em seu estudo é demonstrado o desenvolvimento da simulação e o comportamento do sistema por meio da técnica *hardware-in-the-loop*, considerando uma planta virtual e um sistema de controle real, sendo este executado via um controlador lógico programável. Também é apresentada a modelagem matemática que correlaciona a temperatura do forno com a umidade das peças, a qual é comprovada de forma empírica. O sistema de controle proposto se comportou de forma estável, linear, sendo observado que o seu uso tem potencial de reduzir, de forma significativa, o consumo de combustível.

Os estudos citados buscaram desenvolver métodos de análise térmica e de melhorias no uso de combustível a fim de possibilitar às empresas a fabricação de produtos de maior qualidade, com menores custos e impactos ao meio ambiente. Apesar do processo de secagem se desenvolver de forma diversa do processo de queima, estes compartilham, nas devidas proporções, similaridades.

Assim, também foi considerado no presente estudo o trabalho desenvolvido por Lima (2017), que avaliou a influência da geometria das peças cerâmicas no processo de secagem, descrevendo o fenômeno de transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa, com o intuito de otimizar e prever o processo de retirada de água e aquecimento dos sólidos através do método da capacitância global. O estudo simulou casos diversos por meio da variação da forma do corpo, e obteve as cinéticas de secagem e aquecimento do sólido. Constatou-se que a perda de umidade se dá em uma velocidade menor que a do aquecimento do material cerâmico, haja vista que a difusividade térmica é superior à difusividade de massa, bem como foi observado que a forma do sólido tem grande influência nos fenômenos de transporte de calor e massa.

Os processos de transferência de energia no interior dos fornos também foram avaliados em diferentes estudos por meio de soluções numéricas, apoiadas no uso de *softwares* de simulação. Para analisar a eficiência energética de dois fornos catenários, Nery (2010) utilizou técnicas de CFD, por meio do *software ANSYS CFX*, com o intuito de compreender o papel que

alguns fatores, tais como, geometria, intensidade e tipo de tiragem, atmosfera do forno exercem no comportamento térmico e na dinâmica de escoamento dos gases no forno, visando identificar aquele com maior eficiência energética.

Ameloti e Carvalho (2012) analisaram os processos de transferência de calor e da dinâmica dos gases dentro de um forno industrial do tipo RAC220, de produção de carvão vegetal, por meio do método dos volumes finitos, com o intuito de verificar os perfis de temperatura para diferentes configurações físicas do forno. Utilizando o *software ANSYS Fluent* foi possível obter soluções numéricas para o problema em estudo e propor ajustes no equipamento, visando melhorias na qualidade final do carvão vegetal produzido.

Para compreender o escoamento dos gases na zona de queima em fornos de grelha móvel, destinados a pelotização de minério de ferro, Athayde (2013) desenvolveu um modelo fluidodinâmico do forno, utilizando o método dos volumes finitos, através do *software ANSYS Fluent*. Para analisar a distribuição de temperatura no forno foi desenvolvido um sistema de medição com 16 termopares do tipo N. A partir dos dados de simulação, os autores propuseram estratégias para melhorar o escoamento dos gases no interior do forno.

Apesar dos estudos desenvolvidos avaliarem processos de queima em diferentes segmentos e tipos de fornos, não foram encontrados trabalhos que alinhassem os métodos de análise de temperatura, e do fluxo dos gases ao emprego de uma melhor organização das peças cerâmicas no interior do forno, tendo como base a modelagem numérica, sendo este o objeto principal de pesquisa neste estudo.

3. METODOLOGIA

Esta seção apresenta a forma pela qual esta pesquisa é classificada, bem como a descrição das etapas necessárias para atingir o objetivo geral do estudo.

3.1 Classificação da pesquisa

A pesquisa pode ser classificada de diferentes formas, podendo ser dividida de acordo com: sua natureza (básica, ou aplicada); abordagem aplicada ao problema (quantitativa, ou qualitativa); objetivos (exploratória, descritiva ou explicativa); e procedimentos técnicos (bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso ou *ex-post facto*) (SILVA; MENEZES, 2005).

Do ponto de vista da natureza, a pesquisa básica busca gerar novos conhecimentos, que possam ser úteis para o avanço da ciência, os quais envolvem verdades e interesses universais, entretanto nesta não é prevista a aplicação prática dos conhecimentos. Por outro lado, na pesquisa aplicada os conhecimentos gerados são aplicados de forma prática, com o intuito de prover soluções para problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais (SILVA; MENEZES, 2005).

Em relação à abordagem do problema, a pesquisa pode ser classificada como quantitativa ou qualitativa. Na pesquisa quantitativa as informações e opiniões são quantificadas, isto é, representadas por meio de números, sendo necessária a utilização de recursos e de técnicas estatísticas, dentre as quais pode-se citar a porcentagem, média, moda, mediana e desvio-padrão, por exemplo. Já a pesquisa qualitativa está atrelada a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados, assim, não requer a utilização de métodos e de técnicas estatísticas (SILVA; MENEZES, 2005).

A pesquisa também pode ser classificada de acordo com seus objetivos, podendo ser do tipo exploratória, descritiva ou explicativa. A pesquisa exploratória visa promover uma maior familiaridade com um determinado problema, de modo a torná-lo mais explícito, ou a construir hipóteses, assim, permite o aprimoramento das ideias, ou a descoberta de intuições. Por outro lado, a pesquisa descritiva objetiva a descrição de características de uma população, fenômeno, ou do estabelecimento de relações entre variáveis. Por último, a pesquisa explicativa visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, explicando a razão, o porquê das coisas (GIL, 2002).

Por fim, a pesquisa também pode ser classificada de acordo com os procedimentos técnicos utilizados, sendo classificada em bibliográfica, documental, experimental,

levantamento, estudo de caso ou *ex-post facto*. A pesquisa bibliográfica é baseada em materiais já elaborados, tais como livros e artigos científicos, isto é, nas contribuições dos autores sobre um determinado tópico. A pesquisa documental se diferencia da pesquisa bibliográfica pelo fato desta utilizar materiais que ainda não receberam tratamento analítico. Na pesquisa experimental determina-se um objeto de estudo, seleciona-se as variáveis que podem influenciá-lo, e define-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. O levantamento é caracterizado pela interrogação direta das pessoas, cujo comportamento se deseja conhecer. O estudo de caso visa realizar um estudo profundo de um ou poucos objetos, de forma a permitir o seu amplo e detalhado conhecimento. Por último, a pesquisa *ex-post facto* assemelha-se à pesquisa experimental, entretanto, nesta o pesquisador não possui controle sobre a variável independente, uma vez que o fenômeno já ocorreu (GIL, 2002).

A partir do exposto, esta pesquisa classifica-se em: aplicada (busca a solução para um determinado problema); quantitativa (quantifica variáveis); exploratória (busca familiarizar-se com o problema apresentado); e estudo de caso (realiza um estudo detalhado do objeto de pesquisa).

3.2 Etapas do procedimento metodológico

O desenvolvimento do presente estudo foi dividido em oito etapas (Figura 5): revisão da literatura; definição do objeto de pesquisa; levantamento de dados do forno; levantamento de dados e categorização das peças cerâmicas; modelagem numérica das peças; proposição de diferentes configurações de carga no forno; modelagem numérica das organizações propostas; e análise visual das peças e das propriedades tecnológicas.



Figura 5 – Etapas da pesquisa.
Fonte: Elaboração própria.

3.2.1 Etapa 1 – Revisão da literatura

A revisão da literatura é a primeira etapa a ser realizada no desenvolvimento de um projeto. Permite a obtenção de referenciais teóricos que norteiam o estudo, bem como o estado da arte da pesquisa a ser desenvolvida. Neste estudo, a revisão da literatura foi realizada visando atender três objetivos:

- conhecimento da indústria cerâmica com ênfase no segmento de cerâmica vermelha, em termos de sua importância no cenário nacional, estadual e regional, desafios do setor e oportunidades de melhorias;
- compreensão do processo produtivo, enfatizando o processo de queima;
- entendimento dos processos de transferência de calor no interior dos fornos cerâmicos.

Em seguida foram definidos quatro temas-chave relacionados aos objetivos mencionados para dar prosseguimento à pesquisa. Os temas-chave permitem a filtragem de informações em bases de dados de maneira eficiente, sendo definidos, neste estudo, os seguintes temas:

- cerâmica vermelha;
- processo de queima;
- modelagem da transferência de calor e massa;
- organização física.

Posteriormente, foram definidos termos de busca para representar os temas-chave e facilitar as pesquisas, conforme descrição a seguir:

- T1 = ("clay" OR "clay ceramic" OR "red clay ceramic" OR "clayey ceramic");
- T2 = ("burning" OR "burning process*" OR "burning stage" OR "burning phase");
- T3 = ("model*" OR "system model*" OR "heat transfer" OR "mass transfer");
- T4 = ("arrangement" OR "physical arrangement" OR "placement").

A partir dos termos de busca foram definidas lógicas de associação entre os termos de busca através de *strings*, que permitiram a filtragem dos conteúdos:

- $S1 = (T1 \text{ AND } T2 \text{ AND } T3 \text{ AND } T4)$;
Exemplo: $S1 = ((\text{"clay"} \text{ OR } \text{"clay ceramic"} \text{ OR } \text{"red clay ceramic"} \text{ OR } \text{"clayey ceramic"}) \text{ AND } (\text{"burning"} \text{ OR } \text{"burning process*"} \text{ OR } \text{"burning stage"} \text{ OR } \text{"burning phase"}) \text{ AND } (\text{"model*"} \text{ OR } \text{"system model*"} \text{ OR } \text{"heat transfer"} \text{ OR } \text{"mass transfer"}) \text{ AND } (\text{"arrangement"} \text{ OR } \text{"physical arrangement"} \text{ OR } \text{"placement"})$).
- $S2 = (T1 \text{ AND } T2 \text{ AND } T3)$;
- $S3 = (T1 \text{ AND } T2 \text{ AND } T4)$;
- $S4 = (T1 \text{ AND } T3 \text{ AND } T4)$;
- $S5 = (T2 \text{ AND } T3 \text{ AND } T4)$;
- $S6 = (T1 \text{ AND } T2)$;
- $S7 = (T1 \text{ AND } T3)$;
- $S8 = (T1 \text{ AND } T4)$;
- $S9 = (T2 \text{ AND } T3)$;
- $S10 = (T2 \text{ AND } T4)$;
- $S11 = (T3 \text{ AND } T4)$.

Foram utilizadas as bases de dados Scopus e Scielo devido as suas notoriedades no cenário acadêmico e ao fato de agregarem outras bases de conhecimento, permitindo assim a obtenção do estado da arte dos temas-chave quando associados. Após as pesquisas, foram encontradas as seguintes quantidades de documentos para cada uma das *strings* criadas.

- $S1 = 1$ documento;
- $S2 = 79$ documentos;
- $S3 = 7$ documentos;
- $S4 = 555$ documentos;
- $S5 = 185$ documentos;
- $S6 = 989$ documentos;
- $S7 = 40099$ documentos;
- $S8 = 2321$ documentos;
- $S9 = 25337$ documentos;
- $S10 = 775$ documentos;
- $S11 = 118184$ documentos.

Os resultados obtidos das *strings* de busca são dispostos no diagrama de Venn, conforme Figura 6.

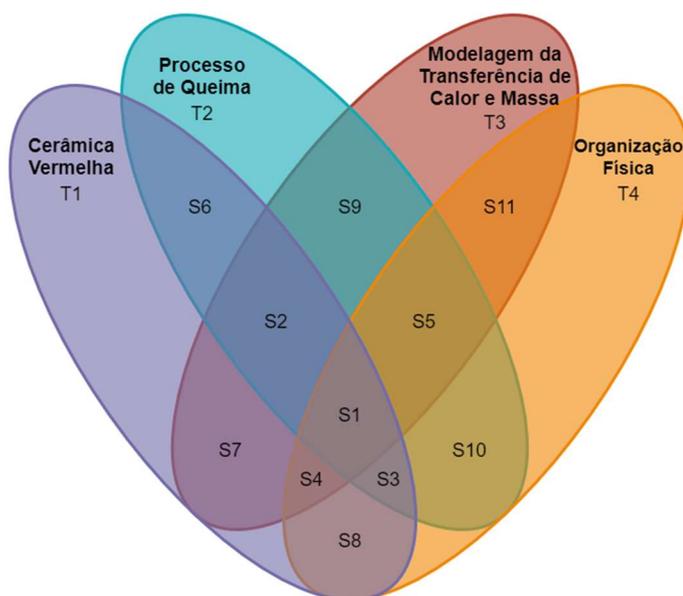


Figura 6 – Diagrama de Venn para as *strings* de busca.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme pode ser observado na figura acima, foi encontrado apenas um documento associando todos os termos de busca, no entanto, o trabalho não aborda o problema de pesquisa aqui proposto. Em seguida, procedeu-se a análise dos títulos, palavras-chave e resumos dos artigos. Observou-se que, em relação à indústria cerâmica, os estudos estavam voltados para a melhoria da etapa de queima, uma vez que que é nesta em que são conferidas as características técnicas e estéticas finais das peças, além de ser responsável pelo maior consumo de energia térmica, tendo considerável influência nos custos de produção.

Além dos artigos obtidos por meio da busca relatada, também foram realizadas pesquisas de publicações acadêmicas relacionadas aos temas-chave no *Google Acadêmico*, bem como de relatórios do setor cerâmico elaborados por órgãos oficiais no *Google*.

3.2.2 Etapa 2 – Definição do objeto de pesquisa

A partir do referencial teórico foram realizadas visitas técnicas na empresa “Arte Cerâmica Sardinha”, situada no distrito de São Sebastião, município de Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro. Esta empresa foi escolhida devido à mentalidade mais aberta do empresário em relação à necessidade de atualização dos processos de produção, assim como ao fato da empresa produzir uma ampla variedade de produtos. O objetivo das visitas foi compreender de forma mais detalhada como ocorre o processo de queima, e como este interfere

na obtenção de produtos mais uniformes, de melhor qualidade e com especificações visuais desejadas. Observou-se, com as visitas técnicas, que a forma com que as peças são acomodadas no interior do forno interfere de forma significativa nos resultados esperados de uma boa queima, sendo este o objeto de estudo da presente pesquisa.

3.2.3 Etapa 3 – Levantamento de dados do forno

O forno utilizado neste estudo (Figura 7) é do tipo intermitente, abóboda. Construído com tijolos maciços comuns; possui duas portas opostas para a inserção e retirada dos produtos e quatro fornalhas (tijolos refratários). A retirada dos gases deste forno é feita na parte inferior, por meio de uma depressão causada por uma chaminé



Figura 7 – Forno abóboda.
Fonte: Autora (2019).

De acordo com Nery (2010), o controle de abertura da chaminé é de significativa importância no processo de queima, uma vez que por meio dele ocorre a retirada dos gases de combustão do forno, o transporte destes para o meio externo e a alimentação da fornalha com oxigênio.

Uma alta vazão de gases pela chaminé faz com que o fluxo de gases no interior do forno se intensifique, gerando uma atmosfera oxidante, queima acelerada de combustível, perda de gases quentes e diminuição da eficiência da queima. Por outro lado, uma baixa vazão causa um estagnação dos gases no forno, gerando uma atmosfera redutora, a qual dificulta a queima e

limita a temperatura máxima (NERY, 2010). O controle de aquecimento e queima dos fornos é realizado por um operador, sendo o processo, de forma geral, muito dependente da habilidade e conhecimento deste.

De acordo com Tagliafico e Senarega (2004), busca-se nos fornos intermitentes a uniformidade de temperatura para todas as peças e o controle do tempo de exposição destas a níveis fixos de temperatura. O comportamento térmico do forno em estudo é obtido por meio de seis termopares, tipo K; na porta 1 estão instalados três termopares, a saber: M4 (inferior); M1 (meio); e C1 (superior), enquanto que na porta 2 existem apenas dois: M2 (meio) e C2 (superior); e na parte superior da abóboda encontra-se instalado um termopar, T9, sendo estes conectados a um indicador de temperatura, que permite o monitoramento da evolução da temperatura, conforme Figura 8. Durante as visitas foram obtidas as curvas de temperatura do forno, sendo estas apresentadas na Seção 4.1.



Figura 8 - Termopares instalados no forno em estudo.
Fonte: Adaptado de Lima (2018).

Além do forno mencionado, a Arte Cerâmica Sardinha conta com mais 3 fornos intermitentes, com dimensões similares ao forno em estudo, às quais são apresentadas na Tabela 1. A empresa produz diferentes tipos de produtos cerâmicos, tais como, tijolo maciço, cobogó, plaquetas, ladrilhos, e blocos de vedação, dentre os quais o tijolo maciço apresenta a maior demanda, correspondendo a cerca de 80% do faturamento da empresa.

Tabela 1 – Parâmetros dimensionais do forno.

Parâmetro	Valor
diâmetro do forno	6,83 m
espessura da parede do forno	1,2 m
altura do solo até a carga	2,2 m
altura do solo até o topo da abóboda	3,3 m
altura da porta	1,84 m
largura da porta	1,27 m
altura da fornalha	0,62 m
largura da fornalha	0,75 m
diâmetro do duto subterrâneo	0,8 m

Fonte: Adaptado de Lima (2018).

3.2.4 Etapa 4 – Levantamento de dados e categorização das peças cerâmicas

Uma das características da cerâmica em que o estudo foi desenvolvido é a variedade de peças cerâmicas fabricadas. Apesar do tijolo maciço possuir maior demanda e, conseqüentemente, maior volume de produção, a empresa também fabrica tijolos para diferentes aplicações, desde artefatos de decoração à blocos estruturais. Durante as visitas técnicas foi realizada a catalogação das peças cerâmicas fabricadas na empresa, sendo também obtidas as suas dimensões.

O objetivo da catalogação foi verificar a presença de peças com características geométricas similares, de forma a possibilitar a sua divisão em grupos. Nesta pesquisa este agrupamento foi realizado tendo como base um estudo do processo de secagem, desenvolvido por Batista, Nascimento e Lima (2009). Segundo os autores, quanto maiores as dimensões das peças, mais demorado e difícil é este processo. Entretanto, ressaltam que “desde que a relação área/volume da peça e as condições operacionais dominem o processo, esta afirmação é dependente do tipo e forma do produto”.

Assim, neste estudo, também foram consideradas as dimensões da área superficial e volume das peças cerâmicas e, posteriormente, estabelecida a relação área/volume para categorizá-las em grupos. Para cada um dos grupos, foi escolhida uma peça para representá-lo, definida de acordo com a demanda de produção na cerâmica. As peças catalogadas, bem como sua posterior categorização são apresentadas na Seção 4.2.

3.2.5 Etapa 5 – Modelagem numérica das peças

A análise térmica das peças cerâmicas foi realizada nas peças representativas de cada um dos grupos, conforme Seção 3.2.4 e Seção 4.2. Na modelagem numérica foram empregadas técnicas de CFD, conforme Seção 2.4.1, sendo utilizada a versão estudantil do *software ANSYS Transient Thermal (solver CFD)* que, de acordo com ANSYS (2019b), permite determinar a variação da distribuição de temperatura e outras propriedades térmicas de objetos ao longo do tempo. A modelagem foi desenvolvida em três etapas:

- pré-processamento: configuração dos parâmetros (condutividade, densidade e calor específico) do material sob análise, elaboração da geometria das peças, geração das correspondentes malhas, e configuração da simulação;
- processamento: resolução das equações diferenciais;
- pós-processamento: visualização e análise de resultados.

Em relação às propriedades dos materiais (condutividade, densidade e calor específico), foram utilizados valores presentes na literatura, obtidos por Alexandre (2000). Segundo o referido autor, a partir de experimentos, verificou-se a existência de uma relação entre a condutividade térmica e a temperatura, sendo obtidos valores na faixa de 0,54 a $1,21 \times 10^{-3}$ W/cmK para o intervalo de temperatura entre 300 °C a 800 °C. Neste estudo, definiu-se para a condutividade térmica o valor de $0,87 \times 10^{-3}$ W/cmK.

Para o parâmetro densidade, Alexandre (2000), observou que seus valores oscilaram de 2,55 a 2,77 g/cm³, sendo o valor médio fixado na ordem de 2,64 g/cm³. Por fim, o parâmetro calor específico foi obtido por meio da capacidade térmica por unidade de volume (J/gK), conforme equação (7).

$$c = \frac{C}{\rho} \quad (7)$$

c: calor específico (J/gK);

C: capacidade térmica por unidade de volume (J/cm³K);

ρ : densidade (g/cm³).

Assumindo, o valor de 0,45 J/cm³K para a capacidade térmica e 2,64 g/cm³ para a densidade (ALEXANDRE, 2000), obteve-se o valor de 0,17 J/gK para o calor específico das matérias-primas utilizadas nas indústrias de cerâmica vermelha do polo ceramista de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro. Na Tabela 2 são apresentados os valores dos

parâmetros utilizados na modelagem numérica das peças cerâmicas, e na Seção 4.3 os perfis de temperatura das peças selecionadas para análise.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais.

Parâmetro	Valor
condutividade	0,87 W/cmK
densidade	2,64 g/m ³
calor específico	0,17 J/gK

Fonte: Alexandre (2000).

3.2.6 Etapa 6 – Proposição de diferentes configurações de carga no forno

De acordo com Hassan e Hamed (2008), a configuração de carga é o fator mais importante no controle da taxa de transferência de calor entre o forno e a carga, tendo influência direta no uso de energia e produtividade. Pelo fato do forno em estudo ser do tipo intermitente de chama invertida, o fluxo de gases se dá de forma descendente, tendendo a se concentrar na região central do forno devido à disposição das fornalhas e à forma pela qual os dutos subterrâneos estão localizados. Desta forma, a estrutura física do forno também teve que ser considerada na proposição das diferentes configurações de carregamento deste.

Ressalta-se que é variável a quantidade de peças de cada tipo em cada queima, o que torna inviável, neste estudo, a proposição de todas as possibilidades de organização das peças cerâmicas no forno. Assim, buscou-se, por meio de quatro configurações de carga avaliar como o tipo das peças e o espaçamento entre estas pode alterar o fluxo dos gases no interior do forno. A seguir são apresentadas as propostas de configurações de carga desta pesquisa:

- Situação 1: forno carregado apenas com a peça que possui a maior demanda de produção na cerâmica em que o estudo foi desenvolvido. Considerou-se, nesta situação, igual espaçamento entre as peças cerâmicas.
- Situação 2: Situação 1 modificada, considerando diferente espaçamento entre as peças. A estrutura física do forno, em estudo, favorece a passagem dos gases na parte central, desta forma, buscou-se avaliar a influência da inserção de um diferente espaçamento entre as peças (menor no centro e maior nas laterais) no fluxo dos gases.
- Situação 3: carregamento do forno com as peças representativas de cada um dos grupos, conforme Seção 3.2.4, preenchendo o forno com igual porcentagem de peças de cada uma das categorias, sendo a organização interna destas, no sentido vertical, realizada de acordo com o comportamento térmico do forno e dos perfis de temperatura das peças cerâmicas.

- Situação 4: Situação 3 modificada, assumindo diferente espaçamento entre as peças. Assim como na Situação 2, esta estratégia busca avaliar a influência do uso de um menor espaçamento no centro e maior nas laterais na circulação de gases no interior do forno.

3.2.7 Etapa 7 – Modelagem numérica das organizações propostas

Para a modelagem numérica do forno carregado foi utilizada a versão estudantil do *software ANSYS Fluent (solver CFD)*, que utiliza o método numérico de volumes finitos para resolver as equações diferenciais. Ressalta-se que as técnicas numéricas utilizadas nos cálculos são detalhadas em ANSYS (2019a).

A geometria do forno foi construída em uma ferramenta CAD, conforme dados apresentados na Tabela 1, Seção 3.2.3, enquanto as geometrias das configurações de carga foram elaboradas de acordo com a Seção 3.2.6. Para a Situação 1, o espaçamento entre as fileiras foi definido como a metade da largura da peça que está alocada na fileira.

Já para a Situação 2, optou-se por manter o valor de espaçamento total obtido na Situação 1, estabelecendo uma simetria entre os espaçamentos a partir do centro do forno, menores na região central e maiores nas laterais, sendo estes múltiplos de um valor base. Considerou-se, também, o valor zero para os espaçamentos entre as fileiras do centro. A equação (8) apresenta o cálculo do espaçamento entre as peças para a Situação 2, sendo $k_0, k_1, k_2, \dots, k_i$ respectivamente iguais a $0, 1, 2, \dots, i$.

$$\text{esp}_{\text{total}} = 2 \times (k_0 + k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + \dots + k_i) \times \text{esp}_{\text{base}} \quad (8)$$

$\text{esp}_{\text{total}}$: espaçamento total;

esp_{base} : espaçamento base;

k_i : multiplicador da fileira i .

Para a Situação 3, o valor de espaçamento entre as fileiras foi definido conforme Situação 1, metade da largura da peça que está disposta na fileira. Por fim, na Situação 4, manteve-se o valor total de espaçamento obtido na Situação 3, sendo o cálculo do espaçamento entre as fileiras realizado de acordo com a Situação 2. As simulações foram realizadas considerando regime estacionário, uma vez que com a evolução do processo a velocidade dos gases tendem à uniformização.

3.2.8 Etapa 8 – Análise visual das peças e das propriedades tecnológicas

O entendimento da distribuição da temperatura nas peças é utilizado, nesta pesquisa, para determinar o melhor posicionamento destas no interior do forno, sentido vertical. De forma paralela, a percepção de como os fluxos de gases são influenciados pelo posicionamento das peças, sentido horizontal, possibilita a proposição de configurações de carga que promovam uma melhor uniformização do processo de queima.

Além disso, com o intuito de investigar as interferências que a configuração de carga pode impactar nas propriedades tecnológicas e nos aspectos visuais das peças, amostras representativas de tijolos maciços foram selecionadas para a realização de ensaios físicos e de análise visual. Essas amostras foram escolhidas por apresentarem maior demanda de produção na cerâmica em que a pesquisa foi desenvolvida, e por apresentarem dimensões simplificadas, o que facilita a execução dos ensaios.

Apesar de não haver uma norma específica para os demais tipos de peças selecionados, optou-se pela realização de uma análise visual nestas peças para verificação de atendimento a requisitos estéticos. Ressalta-se, também, que não é intuito desta pesquisa avaliar as propriedades das peças antes e depois da mudança na organização das peças, haja vista que na empresa em que esta pesquisa é realizada não existe uma configuração de carga estabelecida.

Assim, o objetivo dos ensaios realizados foi apenas verificar se as peças, organizadas no forno de acordo com os correspondentes perfis de temperatura, atendiam às especificações técnicas e estéticas. As amostras selecionadas foram submetidas à análise visual e a ensaios físicos para determinação da retração linear de queima e absorção de água, sendo estes descritos a seguir. De acordo com a norma ABNT NBR 15270-3 (2005) recomenda-se que sejam ensaiadas no mínimo seis peças.

3.2.8.1 Análise visual

A análise visual das amostras de tijolo tem como base as orientações descritas pela norma ABNT NBR 7170 (1983), que define as condições de aceitação de tijolos maciços cerâmicos destinados a obras de alvenaria. Os tijolos não devem apresentar trincas, quebras, superfícies irregulares, deformações e desuniformidade de cor. A quantidade de amostras necessárias para o ensaio, bem como as condições de aceitação e rejeição do lote podem ser consultadas na norma ABNT NBR 7170 (1983).

Nesta pesquisa para o ensaio de inspeção visual dos tijolos maciços, de acordo com a norma, são necessárias 20 amostras, sendo na 1ª amostragem, a quantidade máxima de tijolos defeituosos admitidos igual a 3, isto é, no mínimo 17 tijolos sem defeitos. A rejeição do lote,

neste caso, ocorre se a quantidade de tijolos defeituosos for superior a 7 unidades. Caso a quantidade de tijolos defeituosos estiver entre 4 e 6, o lote deve passar por uma 2ª amostragem, sendo necessário que a soma das unidades defeituosas nas duas amostragens seja menor ou igual a 8.

Além da análise visual, também optou-se por verificar as formas e dimensões dos tijolos maciços, que devem possuir a forma de um paralelepípedo-retângulo, com dimensões recomendadas pela norma ABNT NBR 8041 (1983). Neste caso, de acordo com a norma, são necessárias 24 amostras, que podem ser dispostas em duas filas de 12 tijolos. Os valores de comprimento, largura e altura, neste caso, podem ser somados e, posteriormente, divididos por 24, de forma a ser obter a dimensão real das peças.

Em relação às demais peças, apenas optou-se por avaliar as características estéticas das peças. A aparência das peças é de significativa importância na cerâmica, sendo um dos principais fatores para a determinação do preço final do produto. Quando submetidas a temperaturas maiores do que as suportadas por várias horas, as peças podem se tornar impróprias para comercialização ou, se confeccionadas em argila branca, por exemplo, apresentar o aspecto mesclado (Figura 9a). Por outro lado, quando sujeitas a baixas temperaturas podem, da mesma forma, se tornar inadequadas para o comércio, apresentando o aspecto rosado (Figura 9b).



Figura 9 – Aspecto visual das peças cerâmicas – (a) tijolo de canto, (b) quatro furos.
Fonte: Autora (2019)

A aparência mesclada, apesar de apreciada no segmento de decoração apresenta, da mesma forma que o aspecto rosado, menor valor agregado do que as peças completamente brancas. Evidencia-se, desta forma, a importância de se conduzir o processo de queima de forma a possibilitar a produção de uma maior quantidade de peças totalmente brancas, a qual pode ser obtida por meio de uma melhor configuração de carga no interior do forno.

3.2.8.2 Absorção de água

Para o ensaio de absorção de água foi utilizada a norma ABNT NBR 15270-3 (2005). Neste procedimento, a massa seca das peças é verificada e, em seguida, os tijolos são colocados em um recipiente, que é preenchido com água à temperatura ambiente, de forma a mantê-los totalmente imersos. Após 24 horas, as peças são removidas e colocadas na vertical para escorrer o excesso de água. A água remanescente é retirada com o auxílio de um pano limpo e, posteriormente, mede-se o peso da massa úmida permitindo o cálculo da absorção de água, conforme equação (9).

$$AA = \frac{(m_U - m_S)}{m_S} \times 100 \quad (9)$$

AA: absorção de água (%);

m_U : massa da peça saturada em água, úmida (g);

m_S : massa da peça seca (g).

3.2.8.3 Retração linear de queima

Neste ensaio as dimensões das peças secas e queimadas são medidas com o auxílio de um paquímetro. Em seguida, a retração linear das peças queimadas (R_L) é calculada conforme a norma ABNT MB 305 (1987), por meio da equação (10):

$$R_{LQ} = \frac{(L_S - L_Q)}{L_S} \times 100 \quad (10)$$

R_{LQ} : retração linear de queima (%);

L_S : comprimento do corpo de prova após a secagem (mm);

L_Q : comprimento do corpo de prova após a queima (mm).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta o comportamento térmico do forno, os dados e a categorização das peças cerâmicas, bem como discute os resultados da modelagem numérica, no que se refere à distribuição de temperatura nas peças, assim como ao fluxo dos gases no interior do forno, quando diferentes configurações de carga são propostas.

4.1 Comportamento térmico do forno

Por possuir o sistema de chama invertida, o forno em estudo apresenta temperaturas maiores na parte superior e menores na parte inferior durante todo o processo de queima. Na Figura 10 são apresentadas as temperaturas no interior do forno obtidas por meio dos termopares M4, M1 e C1, conforme Seção 3.2.3, as quais também podem ser consultadas no APÊNDICE A.

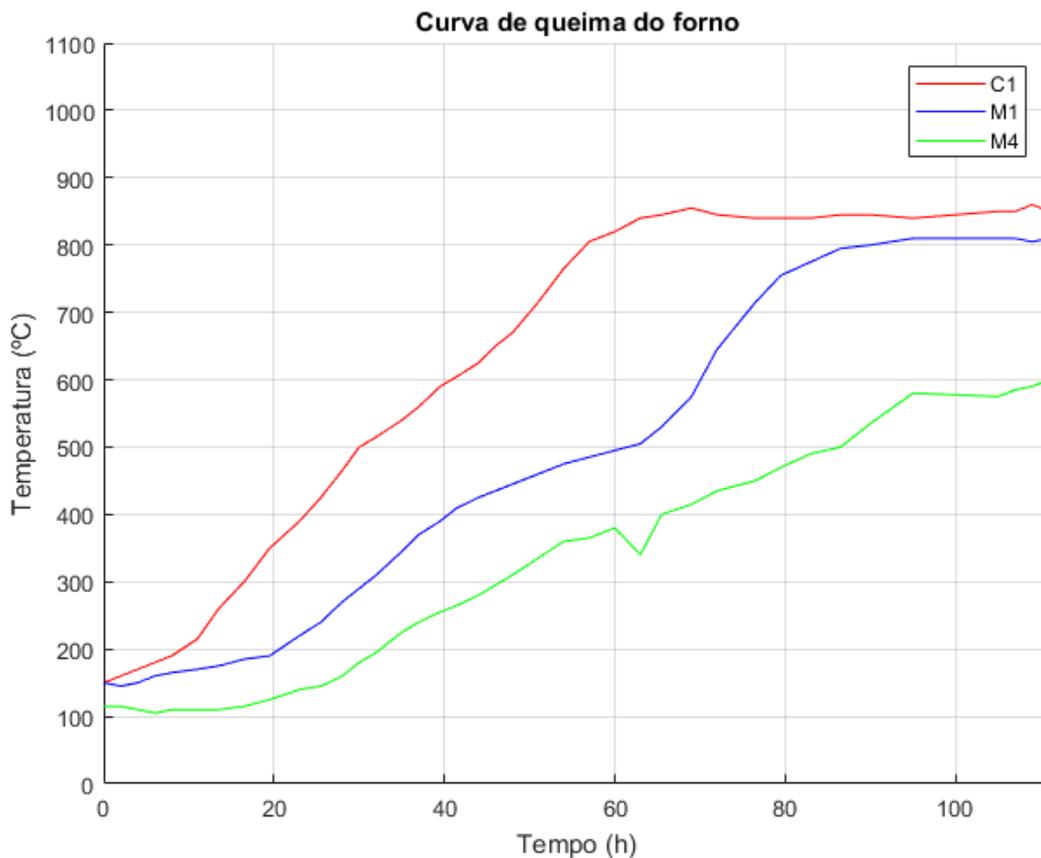
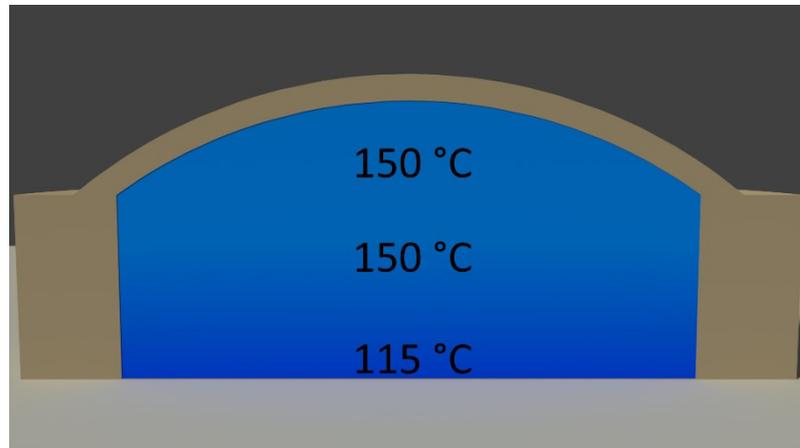


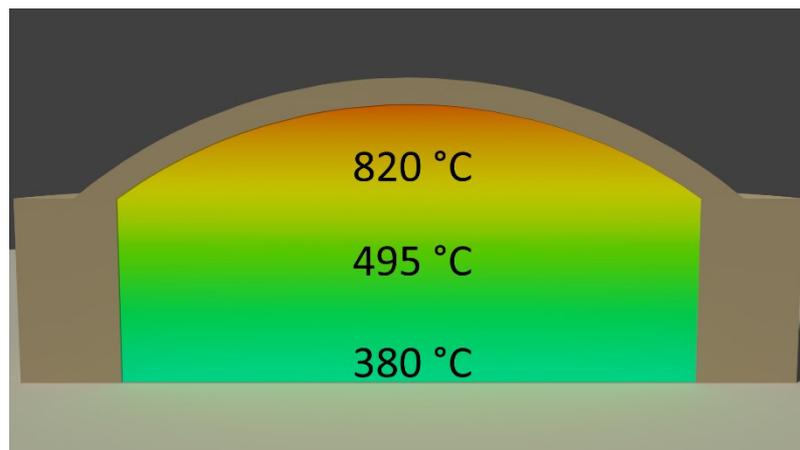
Figura 10– Curva de queima do forno.
Fonte: Elaboração própria.

Cabe salientar que, apesar de cada queima ser única, a curva de queima do processo não sofre significativas alterações, uma vez que a alimentação das fornalhas e a abertura da chaminé

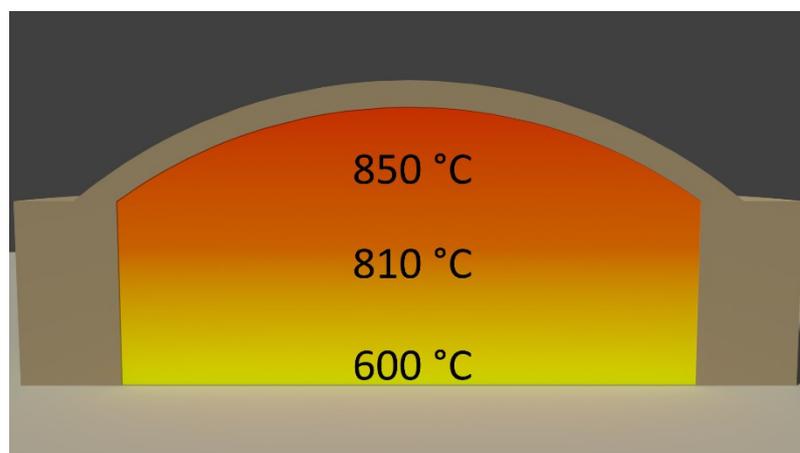
são realizadas de forma a seguir uma curva de queima padrão definida na cerâmica. Para uma melhor visualização da distribuição de temperatura no forno, são apresentadas, na Figura 11, o gradiente de temperatura no interior do forno em três momentos da queima: início; após 60 horas; e fim.



(a)



(b)



(c)

Figura 11 – Gradiente de temperatura no forno – (a) início da queima, (b) após 60 horas de queima, (c) fim da queima.
Fonte: Elaboração própria.

4.2 Dados e categorização das peças cerâmicas

Conforme mencionado na Seção 3.2.4, na cerâmica em que o estudo foi realizado é fabricada uma diversidade de produtos. Nas visitas técnicas foram obtidas as dimensões das peças, que são apresentadas no APÊNDICE B. A partir destes dados, foram elaboradas as correspondentes geometrias das peças em uma ferramenta CAD, às quais podem ser observadas na Figura 12.

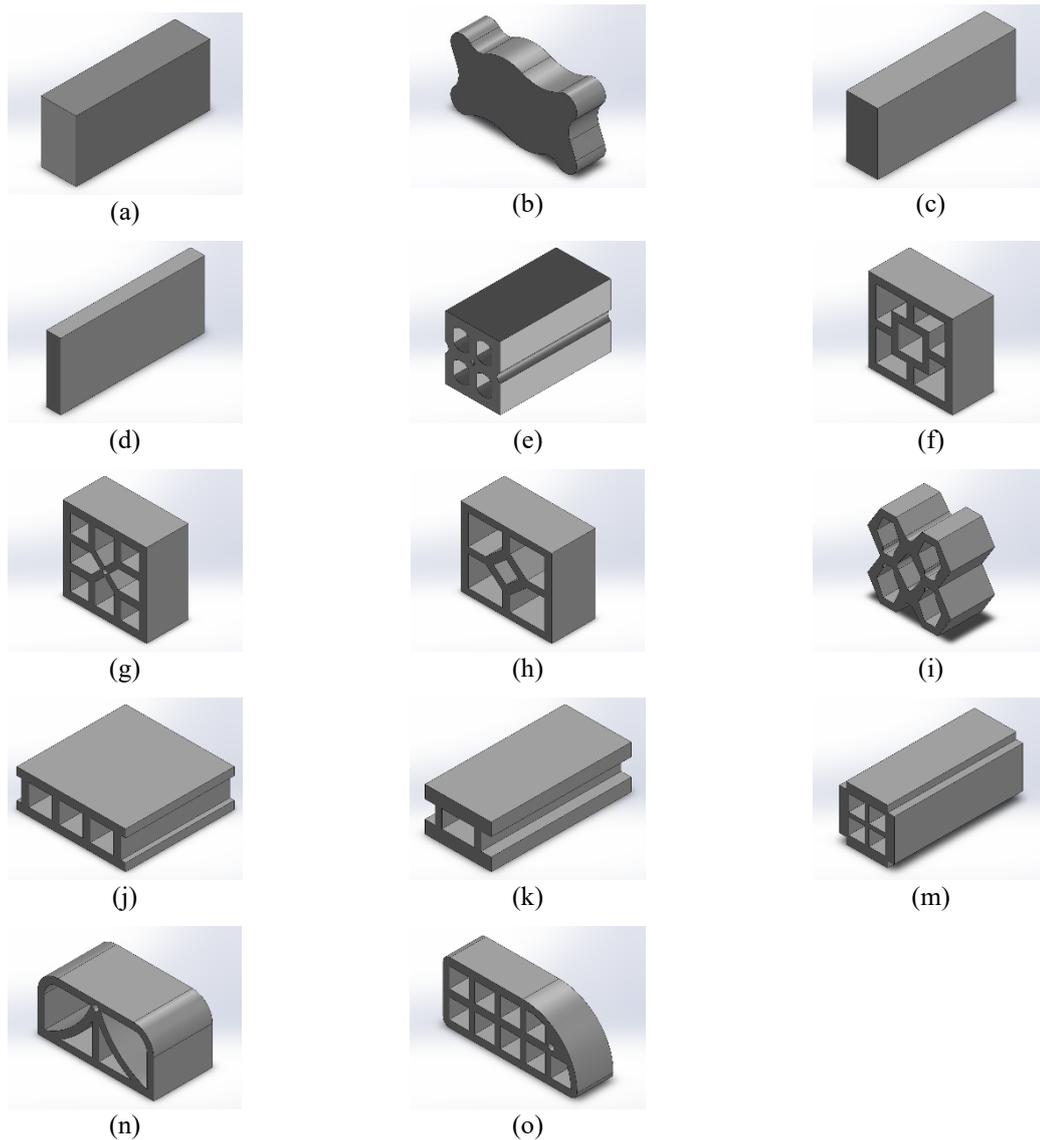


Figura 12 – Geometria das peças cerâmicas – (a) maciço, (b) adoquim, (c) maciço rústico 1, (d) maciço rústico 2, (e) quatro furos, (f) cobogó 1, (g) cobogó 2, (h) cobogó 3, (i) cobogó 4, (j) ladrilho 1, (k) ladrilho 2, (m) plaqueta, (n) meio cobogó, (o) tijolo de canto.

Fonte: Elaboração própria.

Uma vez catalogadas, as peças foram categorizadas em grupos, de acordo com a relação entre a sua área superficial e volume. Para cada grupo foi escolhida uma peça representativa,

de acordo com a demanda de produção na cerâmica. Na Tabela 3 são apresentados os dados dimensionais mencionados, divisão das peças em grupos, bem como a indicação das peças que foram selecionadas para representar cada um dos grupos.

Tabela 3 – Parâmetros dimensionais das peças cerâmicas.

Peça	Área (cm ²)	Volume (cm ³)	Área/Volume (cm ⁻¹)	Categoria	Peça selecionada
maciço	639,73	891,07	0,72		
adoquim	723,65	989,79	0,73	grupo 1	maciço
maciço rústico 1	584,84	742,63	0,79		
maciço rústico 2	670,54	589,15	1,14		
quatro furos	1844,46	1429,38	1,29	grupo 2	quatro furos
ladrilho 1	1188,72	879,75	1,35		
cobogó 1	2172,38	1526,67	1,42		
cobogó 2	2255,74	1570,71	1,44		
cobogó 3	1972,78	1344,31	1,47	grupo 3	cobogó 1
cobogó 4	1661,21	1130,2	1,47		
ladrilho 2	2110,04	1418,88	1,49		
plaqueta	1486,32	793,07	1,87		
meio cobogó	1258,1	593,62	2,12	grupo 4	tijolo de canto
tijolo de canto	945,11	417,09	2,27		

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Distribuição de temperatura nas peças cerâmicas

De forma geral, o processo de queima segue uma curva de queima pré-estabelecida, a qual relaciona a temperatura da peça e o tempo de aquecimento de acordo com as características térmicas e químicas da matéria-prima de fabricação, bem como da geometria da peça cerâmica (SANTOS, 2001).

Nesta pesquisa as peças foram categorizadas em quatro grupos: grupo 1, grupo 2, grupo 3 e grupo 4, sendo escolhidas as peças: maciço, quatro furos, cobogó e tijolo de canto, respectivamente, para representar cada categoria, cujas geometrias são apresentadas na Figura 13. A análise térmica de cada uma destas peças foi realizada por meio *software ANSYS Transient Thermal*, conforme Seção 3.2.5.

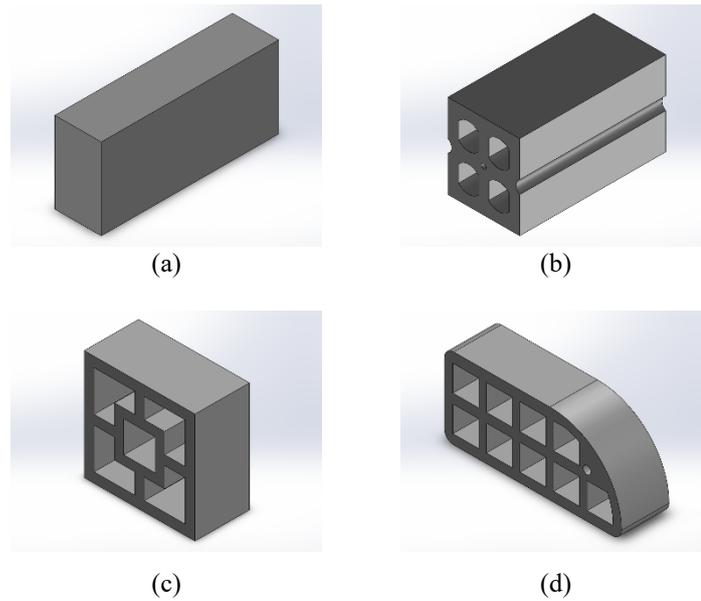


Figura 13 – Geometria das peças cerâmicas selecionadas – (a) maciço, (b) quatro furos, (c) cobogó 1, (d) tijolo de canto.
Fonte: Elaboração própria.

Após a definição das geometrias a serem utilizadas nas análises térmicas, foi realizada a geração das malhas de cada uma das peças selecionadas (Figura 14), às quais consistem na discretização do domínio, isto é, em sua divisão em pequenos volumes de controle, que são conectados entre si por nós.

Os volumes de controle podem apresentar de diferentes formas, tais como, triangular, quadrado, retangular e prismático, de acordo com o problema que está sendo trabalhado, sendo que a sua quantidade possui relação direta com o resultado final – quanto mais refinada a malha, mais aproximado será o resultado, porém mais demorado será o processo de obtenção do mesmo (MARTINS, 2016). O refinamento das malhas, nesta pesquisa, foi realizado até serem obtidos valores próximos ao máximo disponibilizado pela versão estudantil do *software* utilizado – 512 mil elementos.

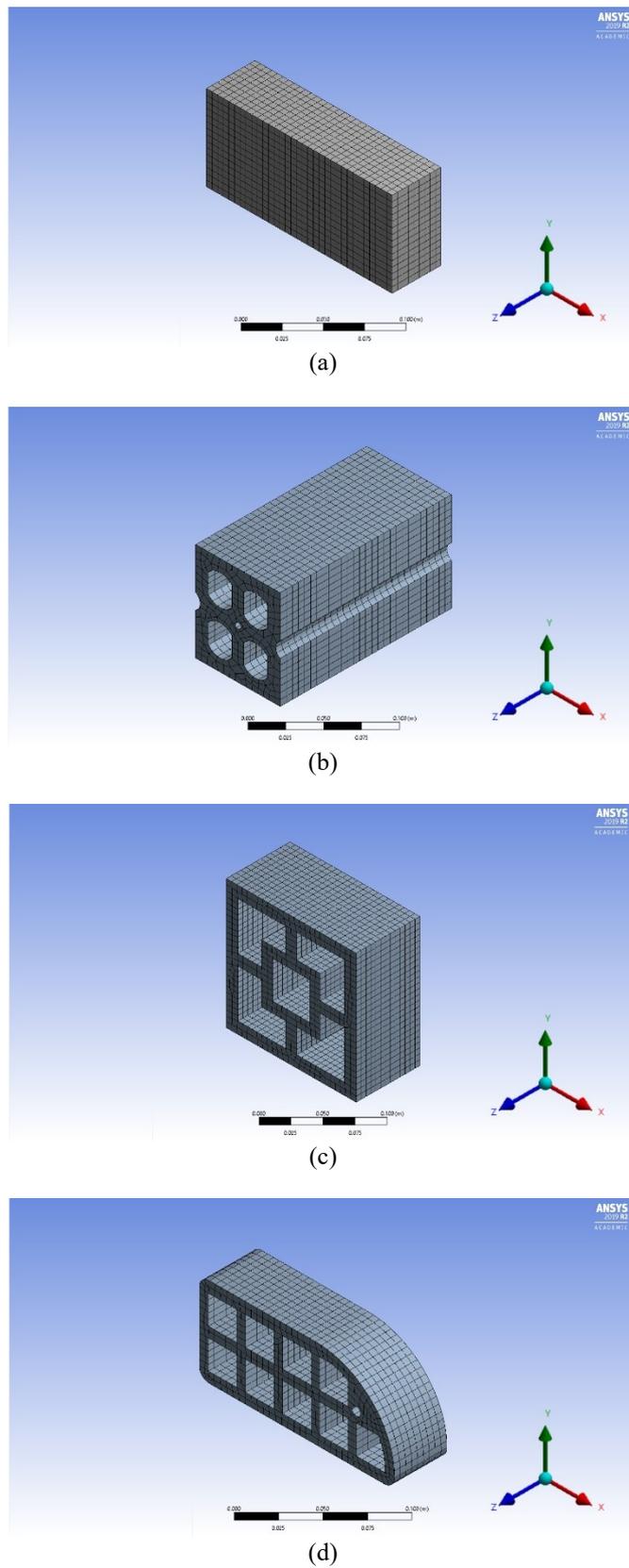


Figura 14 – Geração das malhas das peças cerâmicas selecionadas – (a) maciço, (b) quatro furos, (c) cobogó 1, (d) tijolo de canto.
Fonte: Elaboração própria.

Em relação às configurações de simulação, as peças foram expostas a quatro curvas de temperatura: temperatura constante de 1000 °C, termopar alto (C1), termopar meio (M1) e termopar baixo (M4) por um período de 111 horas, que foi o tempo de duração da queima em que os dados de temperaturas do forno foram obtidos. A posição dos termopares no forno foi apresentada na Figura 8, enquanto as curvas de temperatura nas quais as peças foram expostas podem ser observadas na Figura 15.

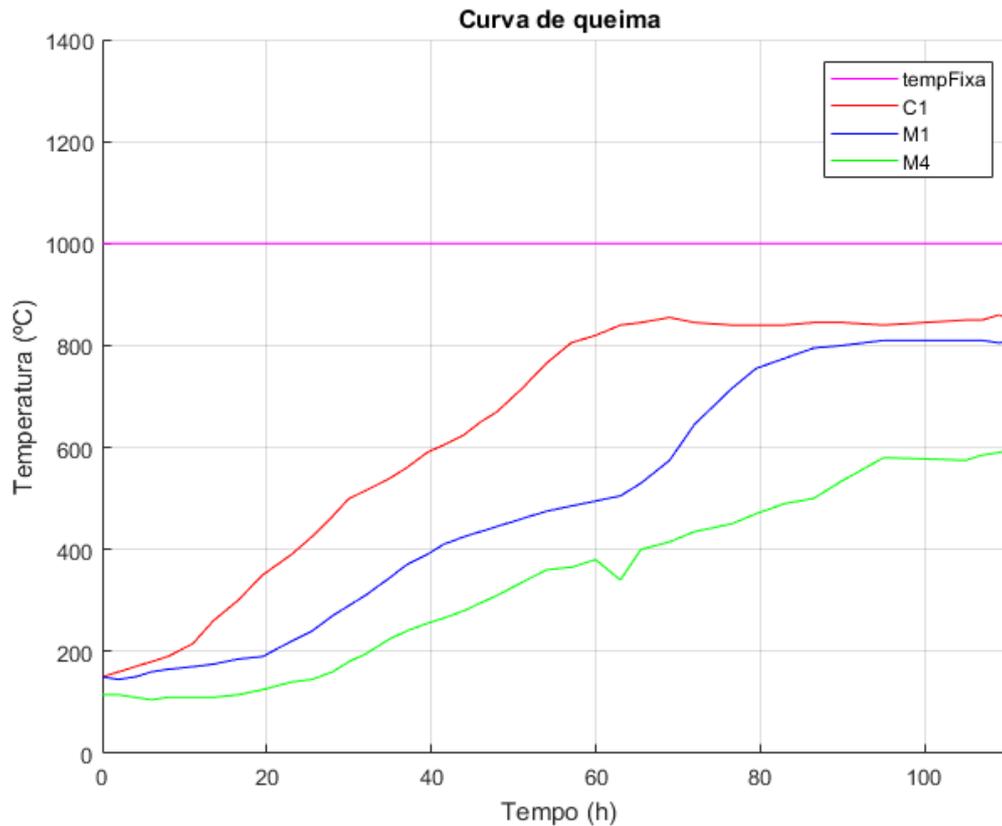


Figura 15 – Curva de queima.
Fonte: Elaboração própria.

Nesta seção são apresentados apenas os perfis de temperatura das peças quando submetidas a uma temperatura de 1000 °C por 111 horas. Essa escolha foi feita para facilitar a visualização dos gradientes de temperatura nas peças, uma vez que a exposição destas a temperaturas que variam lentamente no tempo faria com que sua temperatura interna também variasse de forma lenta, dificultando a percepção de qual peça demanda maior quantidade de calor para sua queima.

Além disso, foi definido o intervalo de tempo de 30 minutos para a apresentação dos perfis de temperatura, haja vista que, quando submetidas a longos períodos de queima, as temperaturas internas das peças tendem à uniformização, assim, não seria possível observar, de

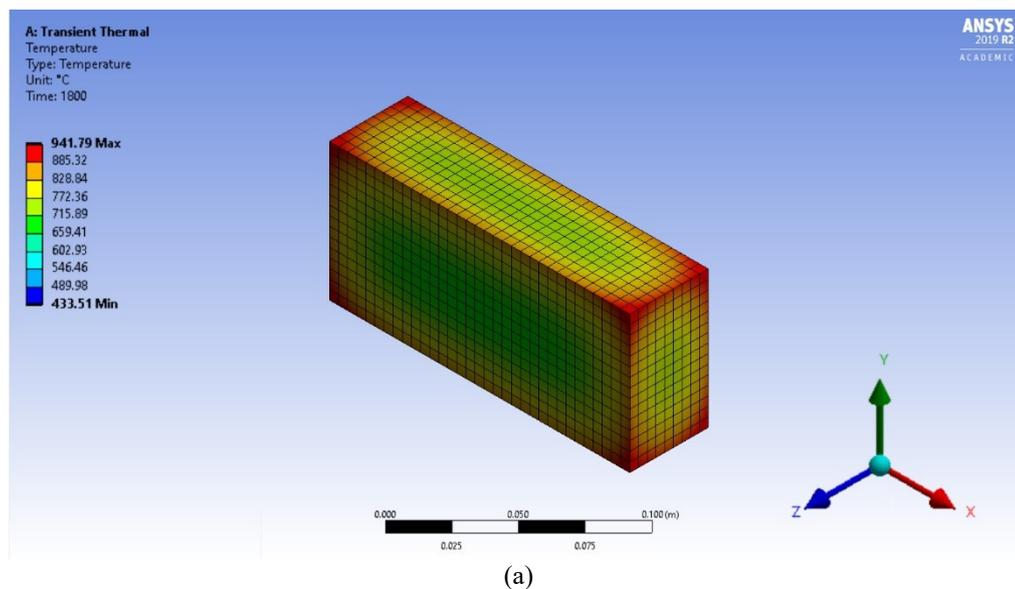
forma clara, os gradientes de temperatura em seu interior. Ademais, a partir das análises realizadas, percebeu-se que a exposição das peças às diferentes curvas de queima apresentou resultados similares em termos de quantidade de calor necessária para a queima.

4.3.1 Distribuição de temperatura no tijolo maciço

De acordo com Batista, Nascimento e Lima (2009), as dimensões das peças cerâmicas estão diretamente associadas à duração e dificuldade do processo de secagem. Apesar de suas particularidades, o processo de secagem assemelha-se, nas devidas proporções ao processo de queima, assim, este também é dependente da forma do produto.

O tijolo maciço possui uma estrutura inteiriça e, conforme Tabela 3, faz parte do grupo 1, que apresenta a menor relação área/volume. Na Figura 16 é apresentado o perfil de temperatura desta peça quando submetido a uma temperatura externa de 1000 °C por 30 minutos. Nesta simulação, a temperatura interna do tijolo maciço variou no range de 433,51 °C a 941,79 °C.

A parte interna da peça alcançou as menores temperaturas, e a parte externa as maiores temperaturas, uma vez que o processo de transferência de calor desenvolve-se das partículas mais energéticas para as menos energéticas (BERGMAN *et al.*, 2011). Observou-se, nesta simulação um significativo gradiente de temperatura na peça, caracterizando um processo de queima não uniforme.



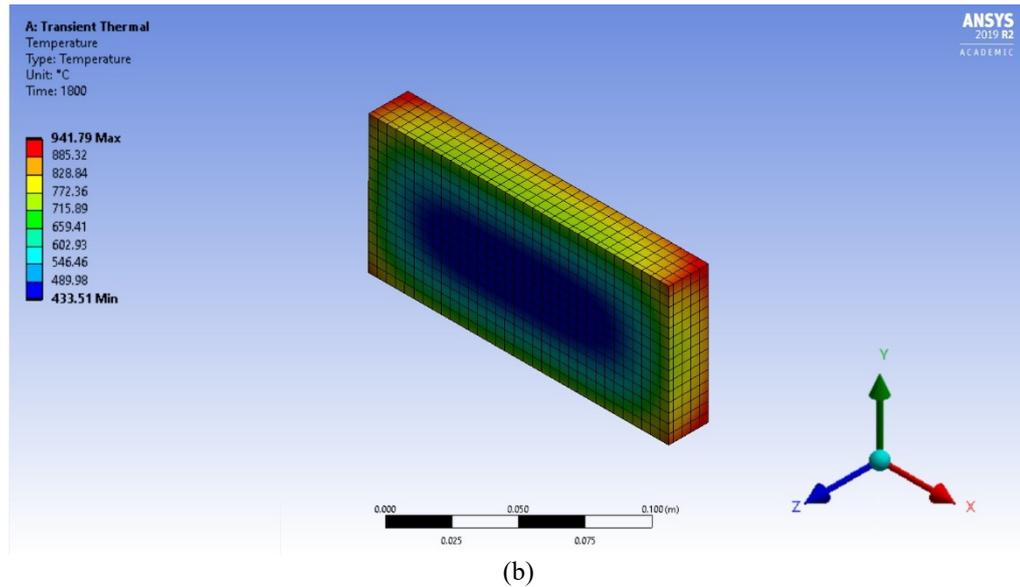


Figura 16 – Distribuição de temperatura no tijolo maciço – (a) inteiro, (b) seccionado.
Fonte: Elaboração própria.

4.3.2 Distribuição de temperatura no tijolo quatro furos

De forma oposta ao tijolo maciço, o tijolo quatro furos apresenta cavidades em seu interior, que permitem a circulação de gases quentes. No processo de queima, segundo Santos (2001), a temperatura da peça e o tempo de aquecimento estão relacionados com as características de sua matéria-prima, bem como de sua geometria. As cavidades presentes no tijolo analisado aumentam a sua área superficial, conseqüentemente, sua relação área/volume, conforme Tabela 3, torna-se maior.

Como pode ser visto na Figura 17, quando submetidas a uma temperatura de 1000 °C por cerca de 30 minutos, as temperaturas internas desta peça ficaram situadas no range de 841,34 °C a 973,31 °C, apresentando uma distribuição de temperatura mais uniforme, bem como demonstrando que precisa de uma menor quantidade de calor para a sua queima, quando comparada às peças pertencentes ao grupo 1.

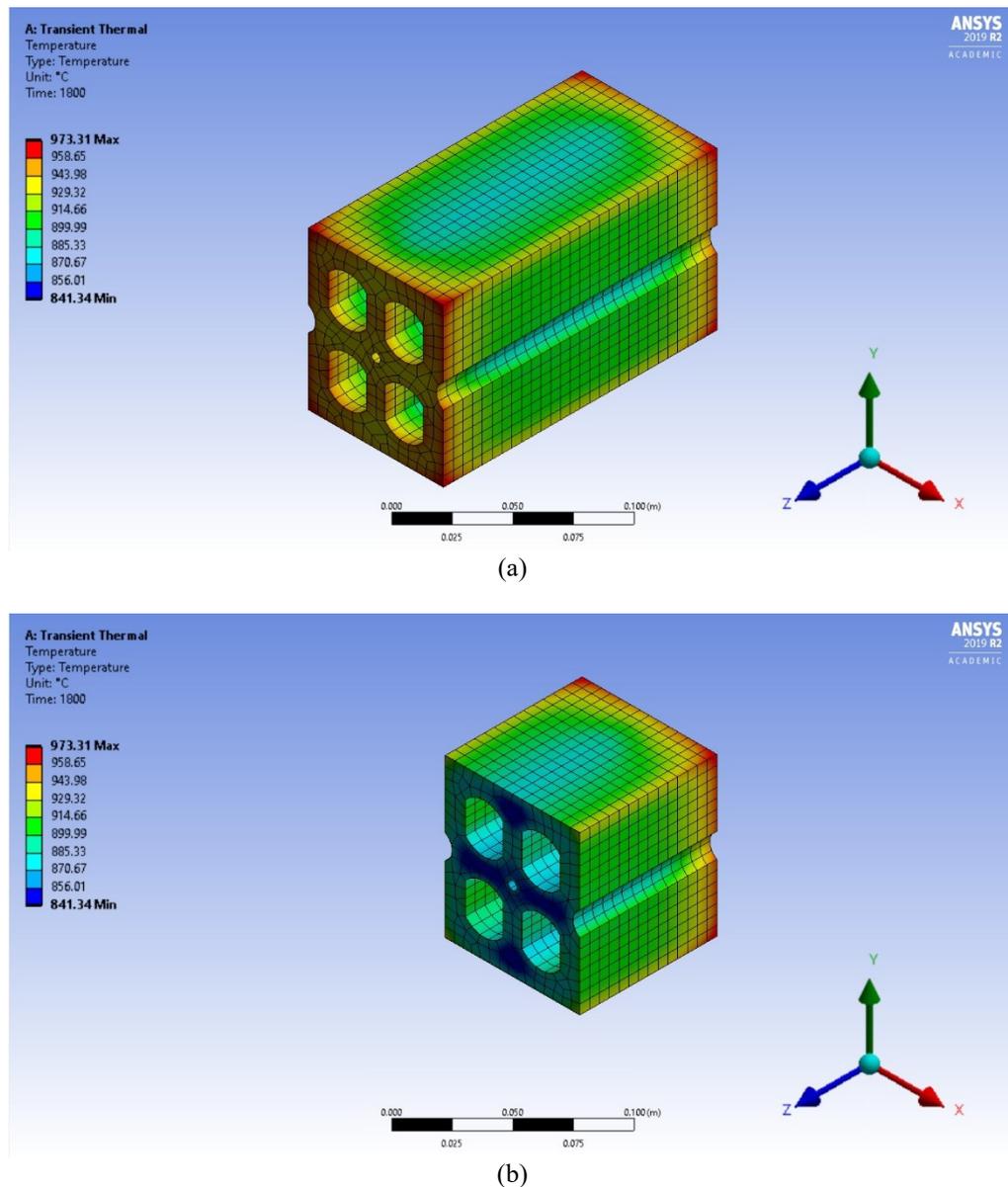


Figura 17 – Distribuição de temperatura no tijolo quatro furos – (a) inteiro, (b) seccionado.
 Fonte: Elaboração própria.

4.3.3 Distribuição de temperatura no tijolo cobogó

De forma similar ao tijolo quatro furos, o tijolo cobogó também apresenta espaços vazios em sua estrutura física. A geometria desta peça possui uma maior área superficial e volume, quando comparadas ao tijolo maciço e quatro furos, das quais obtém-se uma maior relação área/volume, além disso, o maior número de cavidades contribui para uma melhor transferência de calor.

Segundo Nery (2010), a qualidade da peça cerâmica está diretamente associada à uniformidade de sua temperatura interna; no caso do tijolo cobogó, o gradiente interno de

temperatura (Figura 18) situou-se entre 861,16 °C a 975,34 °C devido, provavelmente, à sua geometria. Por possuir uma menor variação em sua temperatura interna, percebe-se, por meio dos resultados de simulação, que esta peça demanda uma menor quantidade de calor para a sua queima, quando comparada às peças pertencentes aos grupos 1 e 2.

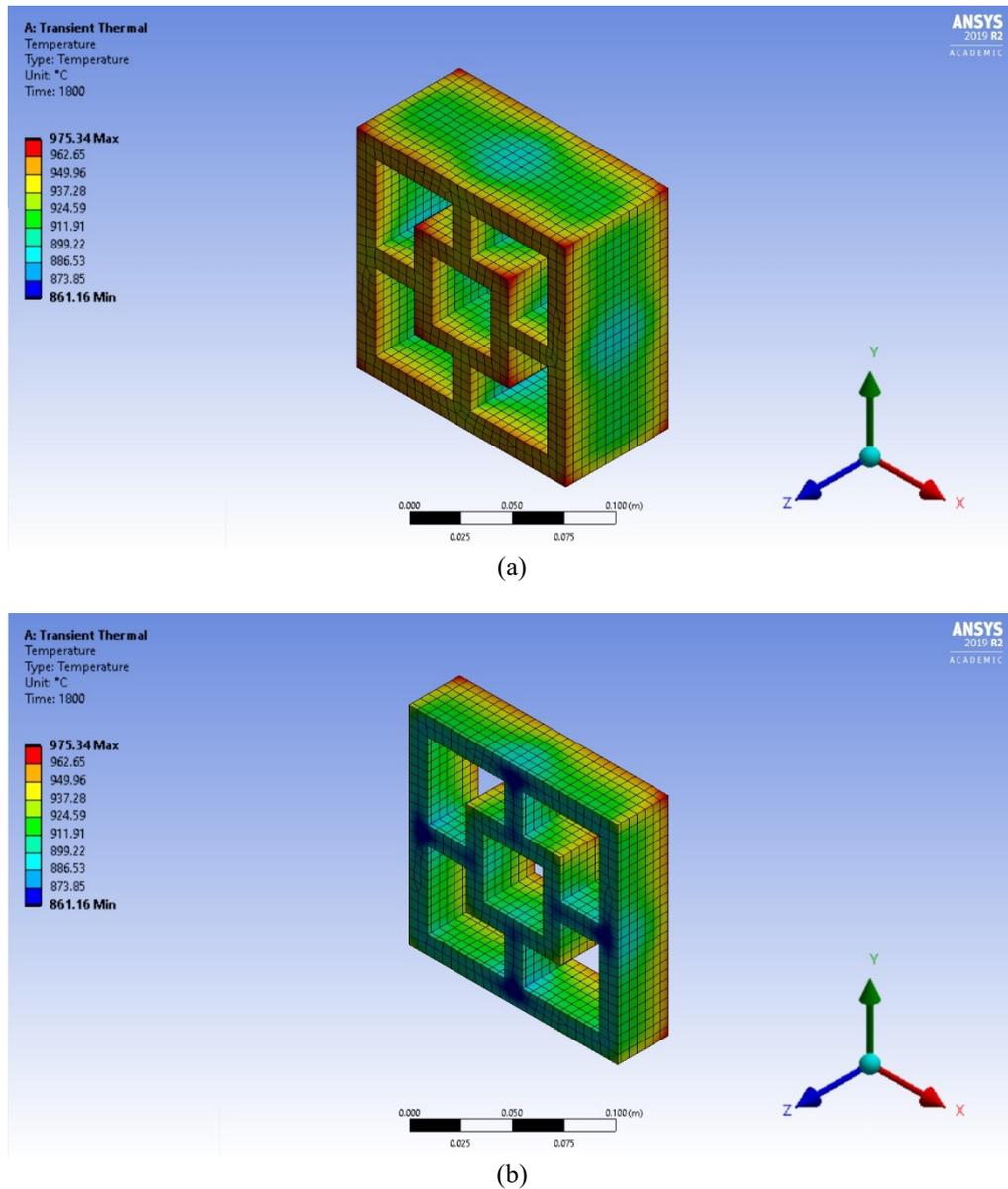


Figura 18 – Distribuição de temperatura no tijolo cobogó – (a) inteiro, (b) seccionado.
Fonte: Elaboração própria.

4.3.4 Distribuição de temperatura no tijolo de canto

De acordo com Tagliafico e Senarega (2004), busca-se nos fornos a uniformidade de temperatura nas peças. Dentre as peças selecionadas para análise, o tijolo de canto é a peça que possui a maior quantidade de cavidades, as quais contribuem para um melhor processo de troca

de calor. A circulação de gases quentes nesta peça possibilita uma baixa variação de temperatura interna, 918,21 °C a 991,23 °C, configurando uma distribuição de temperatura praticamente uniforme, quando comparada às peças dos demais grupos (Figura 19).

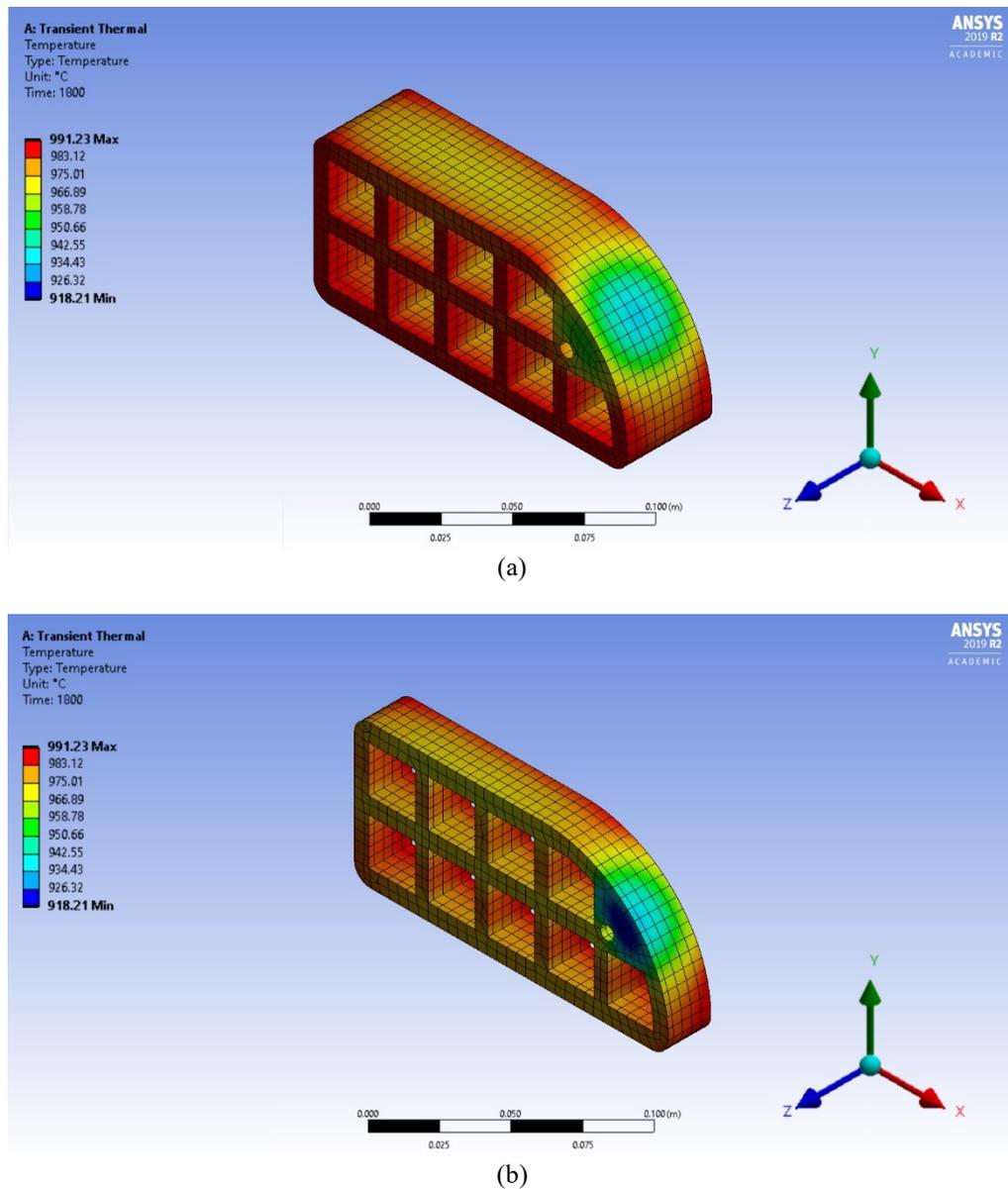


Figura 19– Distribuição de temperatura no tijolo de canto – (a) inteiro, (b) seccionado.
Fonte: Elaboração própria.

4.3.5 Distribuição de temperatura nas peças cerâmicas – escala global

A partir dos resultados de simulação, pode-se concluir que a quantidade de calor necessária para a queima das peças selecionadas se dá na seguinte ordem: grupo 1 > grupo 2 > grupo 3 > grupo 4. Nota-se, também, que as Figuras 16, 17, 18 e 19 apresentam diferentes limites de escala, uma vez que utilizam o valor mínimo e máximo de temperatura alcançado

por cada uma das peças. Assim, para uma melhor visualização e comparação da distribuição de temperatura nas peças selecionadas, optou-se por colocar as escalas no mesmo range, tendo como limite inferior a menor temperatura observada (433,51 °C – tijolo maciço) e como limite superior a maior temperatura alcançada (991,23 °C – tijolo de canto). As Figuras 20, 21, 22 e 23 apresentam a distribuição de temperatura nas peças cerâmicas selecionadas para representar cada grupo na escala mencionada.

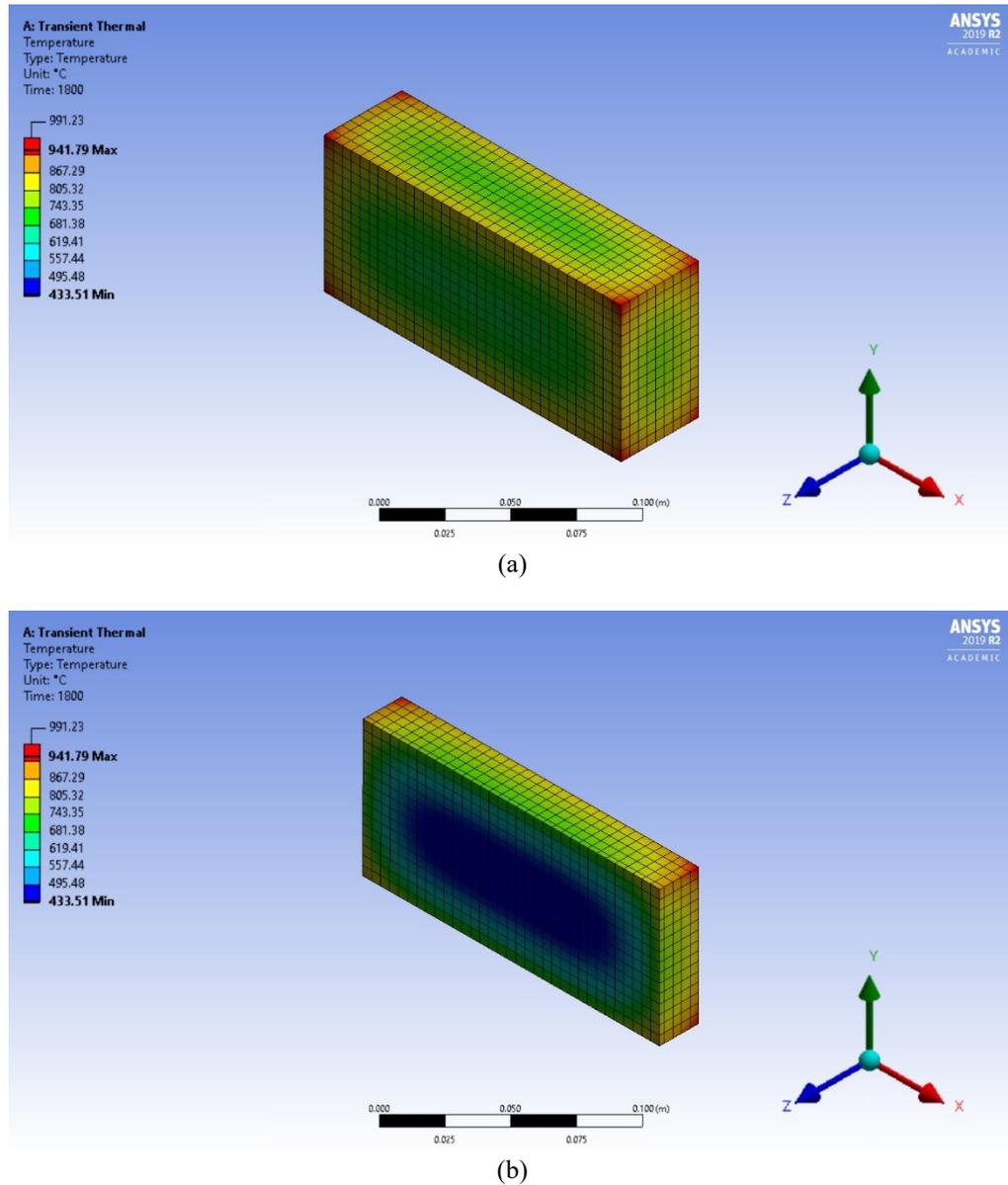
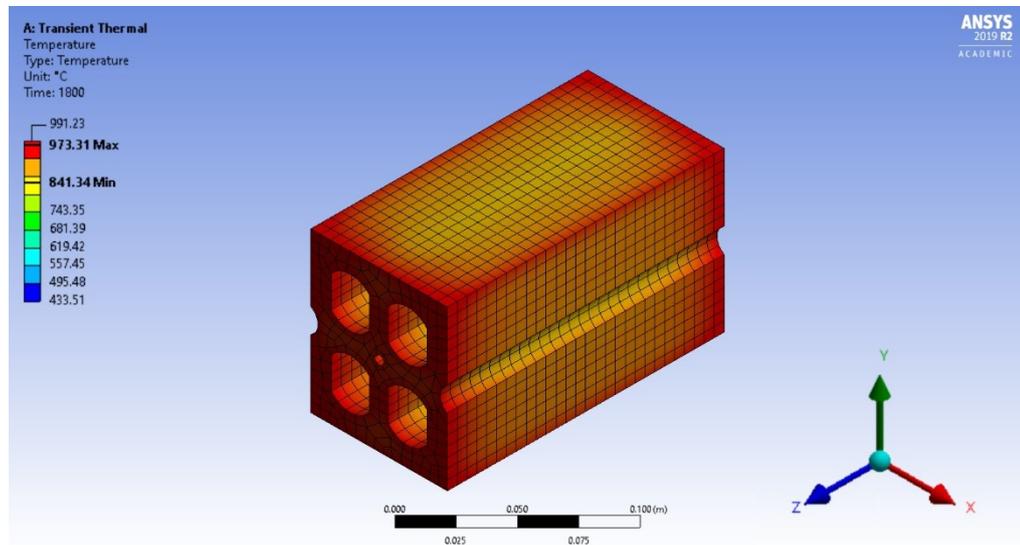
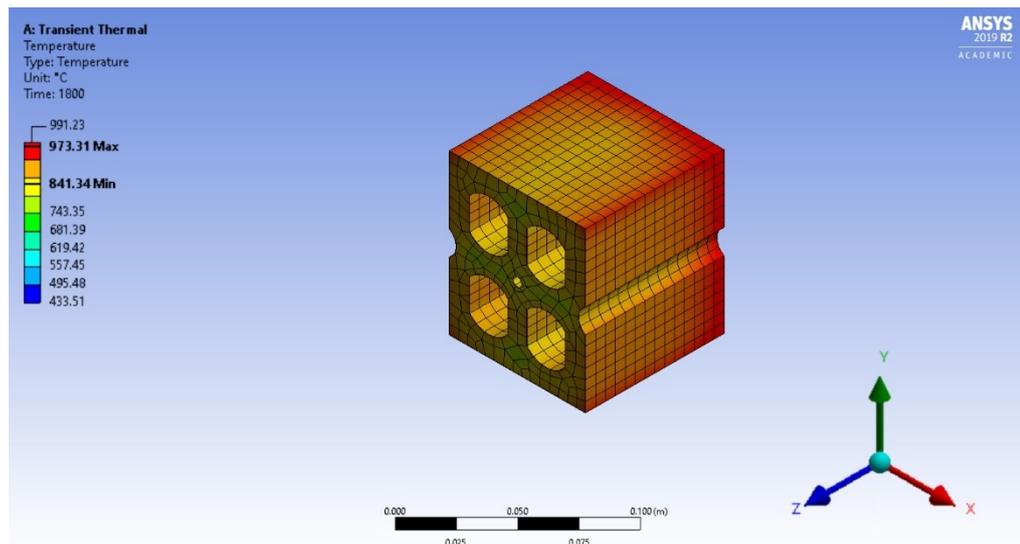


Figura 20– Distribuição de temperatura no tijolo maciço na escala global – (a) inteiro, (b) seccionado.
Fonte: Elaboração própria.



(a)



(b)

Figura 21 – Distribuição de temperatura no tijolo quatro furos na escala global – (a) inteiro, (b) seccionado.
Fonte: Elaboração própria.

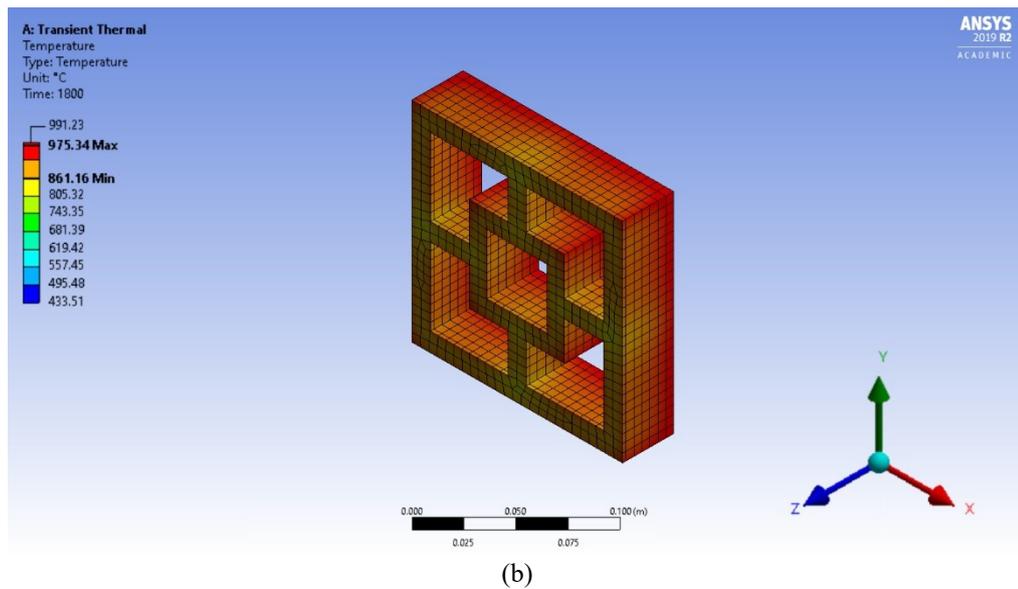
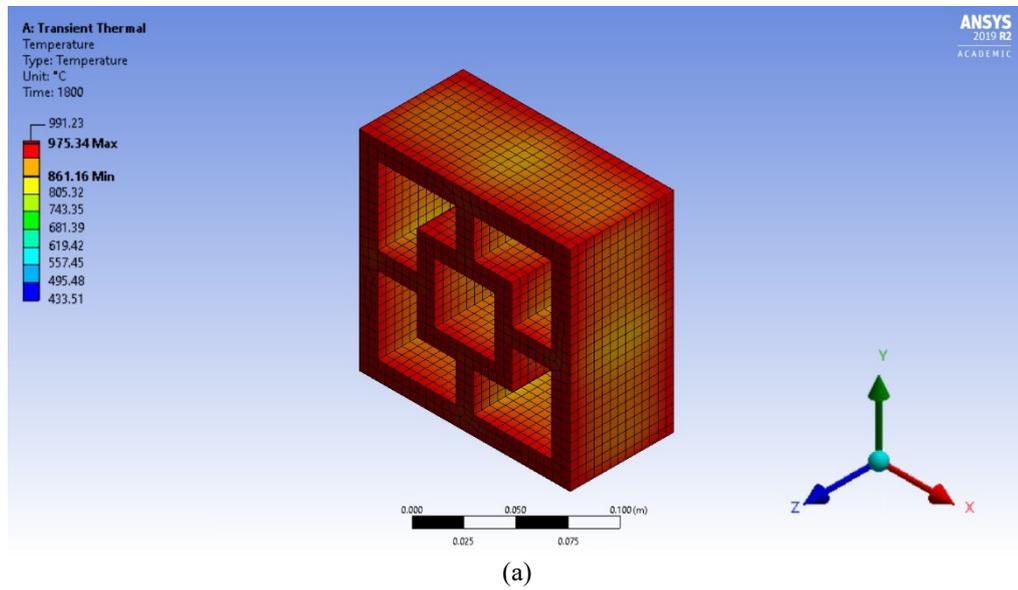


Figura 22 – Distribuição de temperatura no tijolo cobogó na escala global – (a) inteiro, (b) seccionado.
Fonte: Elaboração própria.

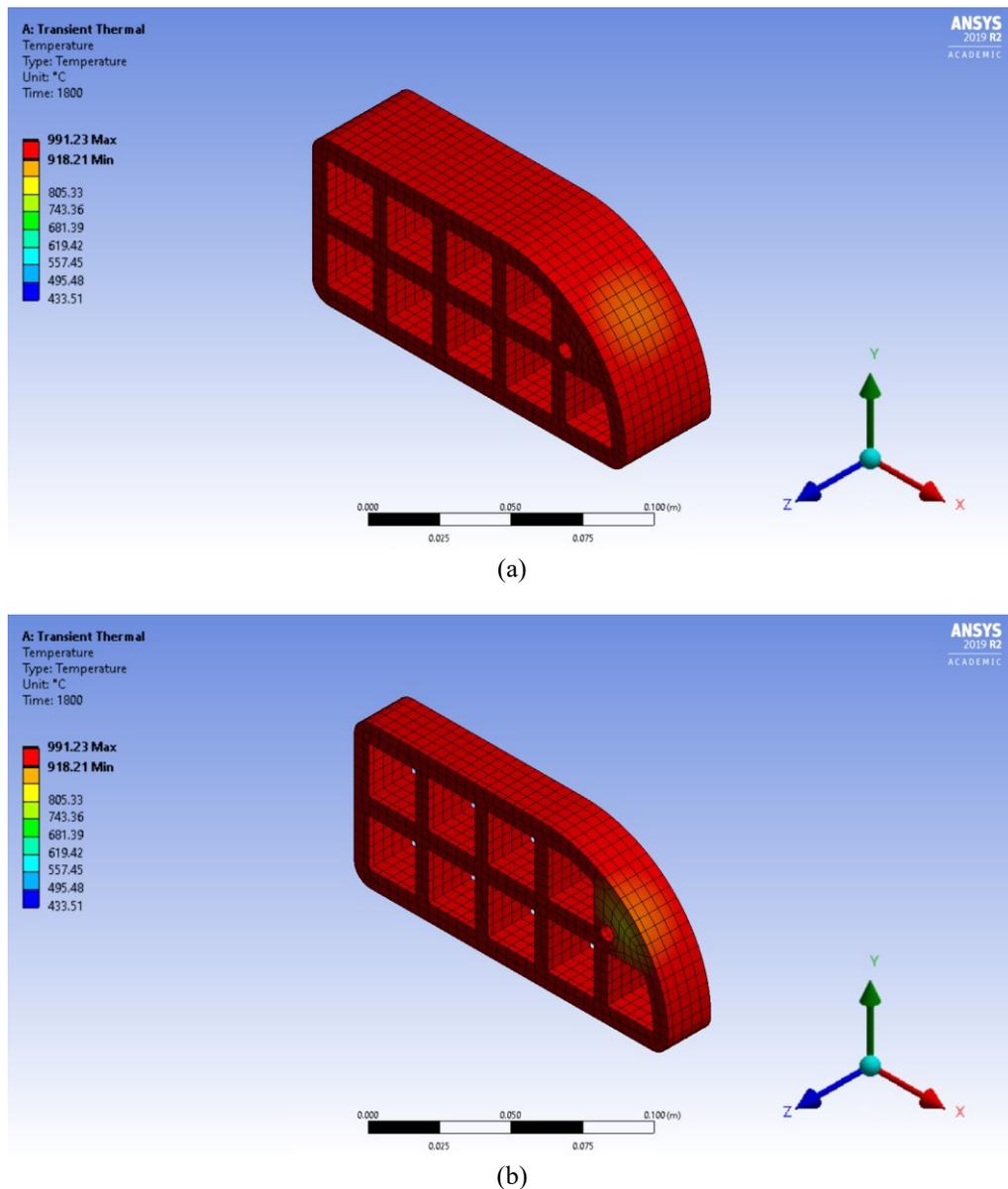


Figura 23 – Distribuição de temperatura no tijolo de canto na escala global – (a) inteiro, (b) seccionado.
Fonte: Elaboração própria.

A partir das Figuras 20, 21, 22 e 23 observa-se uma melhor distribuição de temperatura nas peças quando a relação área/volume é maior, evidenciando a influência da geometria no processo de queima. Para promover uma melhor transferência de calor nas peças no interior do forno deve-se expor as peças com menor relação área/volume a temperaturas mais elevadas, e vice-versa. Tendo como base o comportamento térmico do forno apresentado na Seção 4.1, para que a queima se desenvolva de forma mais uniforme torna-se coerente afirmar que as peças do grupo 1 deveriam ser alocadas na parte superior do forno; peças do grupo 2 na parte médio – superior; peças do grupo 3 na parte médio – inferior; e peças do grupo 4 na parte inferior.

4.4 Temperatura média das peças cerâmicas

A partir dos perfis de temperatura apresentados na seção 4.3 observou-se que a temperatura interna das peças não é uniforme, entretanto, notou-se que, dependendo do grupo, a variação de temperatura pode ser maior ou menor. Nas subseções seguintes são apresentadas as temperaturas médias das peças ao longo do tempo, quando expostas as quatro curvas de temperatura já mencionadas: termopar M4, termopar M1, termopar C1, e a uma temperatura fixa de 1000 °C por cerca de 111 horas (Figura 15).

4.4.1 Temperatura média das peças cerâmicas – termopar M4

Na seção 4.3 foi observado que as peças cerâmicas não apresentam uniformidade de temperatura em seu interior, entretanto, não foi avaliada a temperatura média destas peças. Na Figura 24 é possível observar as temperaturas médias das peças representativas de cada grupo quando expostas à curva de temperatura do termopar M4. Nota-se que, de forma geral, a temperatura média das peças acompanha a temperatura interna do forno e que, apesar de suas temperaturas internas não serem uniformes, suas temperaturas médias são similares. A maior diferença de temperatura ocorreu entre o tijolo maciço e o tijolo de canto devido, possivelmente, à geometria destas peças, conforme Batista, Nascimento e Lima (2009) e Santos (2001). Por volta de 42 horas de queima, essa diferença de temperatura correspondeu a cerca de 2,5 °C.

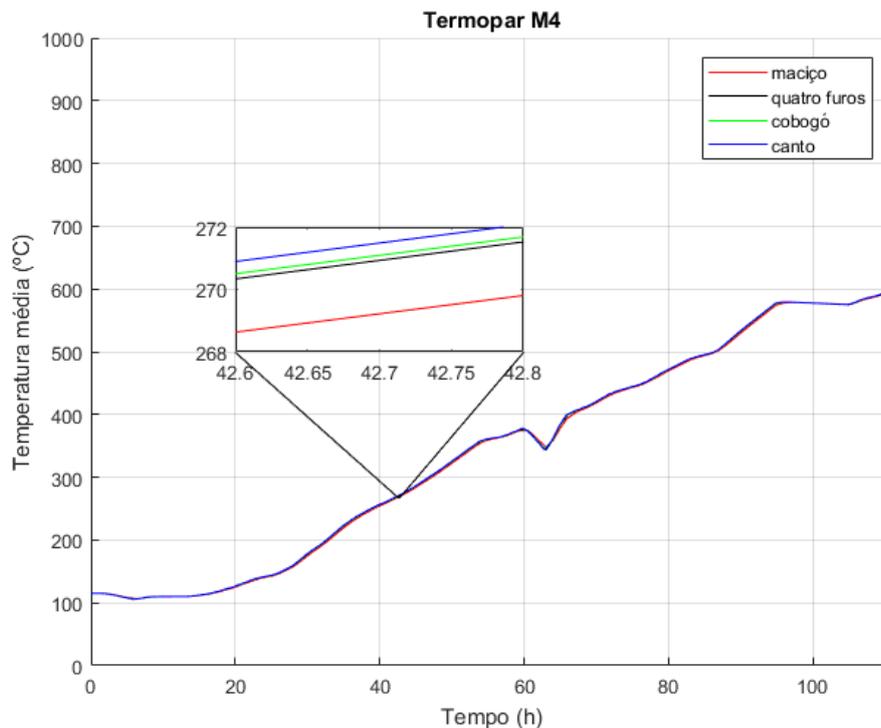


Figura 24 – Temperatura média das peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar M4.
Fonte: Elaboração própria.

4.4.2 Temperatura média das peças cerâmicas – termopar M1

De forma semelhante submeteu-se as peças cerâmicas à curva de temperatura correspondente ao termopar M1, sendo obtidas as correspondentes temperaturas médias. Observou-se, assim como na exposição à curva do termopar M4, que a temperatura média das peças acompanhou a temperatura do forno, e que a geometria das peças tem influência direta nos valores de temperatura alcançados, o que está de acordo com Santos (2001). Após 42 horas de queima, a maior diferença de temperatura média foi observada entre o tijolo maciço e o tijolo de canto, como esperado, situando-se em torno de 2,5 °C, como pode ser visto na Figura 25.

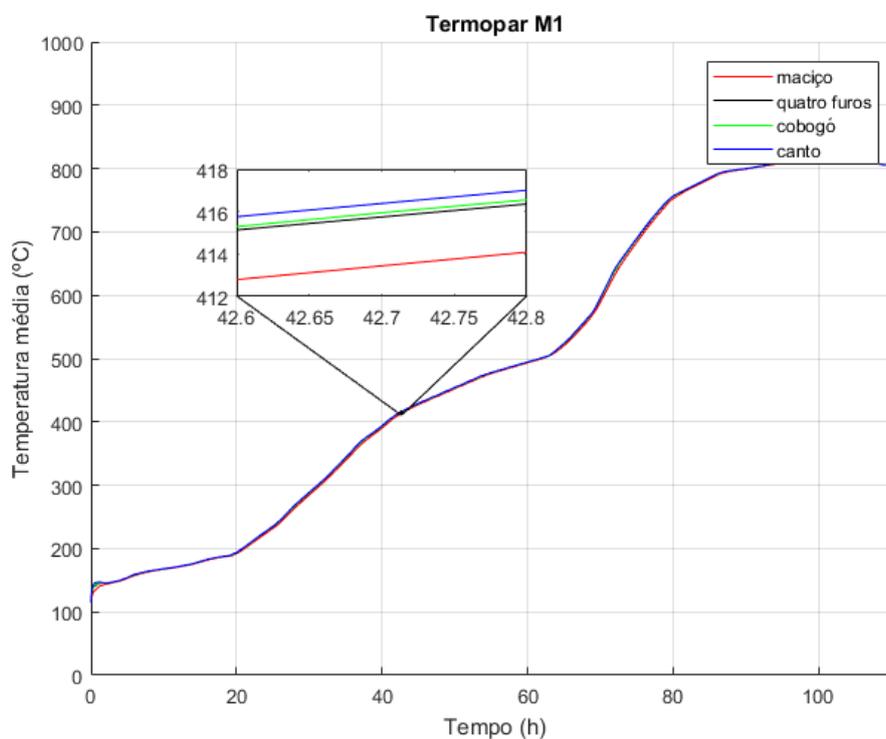


Figura 25 – Temperatura média das peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar M1.
Fonte: Elaboração própria.

4.4.3 Temperatura média das peças cerâmicas – termopar C1

Em seguida, as peças foram submetidas à curva de temperatura correspondente ao termopar C1, o qual apresenta temperaturas superiores às dos termopares M4 e M1, uma vez que se encontra instalado na parte superior do forno. Na Figura 26 é possível notar que, após 42 horas de queima, a maior diferença de temperatura média também ocorreu entre o tijolo maciço e o de canto, situando-se em torno de 4 °C, que ocorreu, provavelmente, devido ao fato das peças com maior relação área/volume atingirem mais facilmente temperaturas superiores, estando este fato diretamente atrelado à geometria das peças.

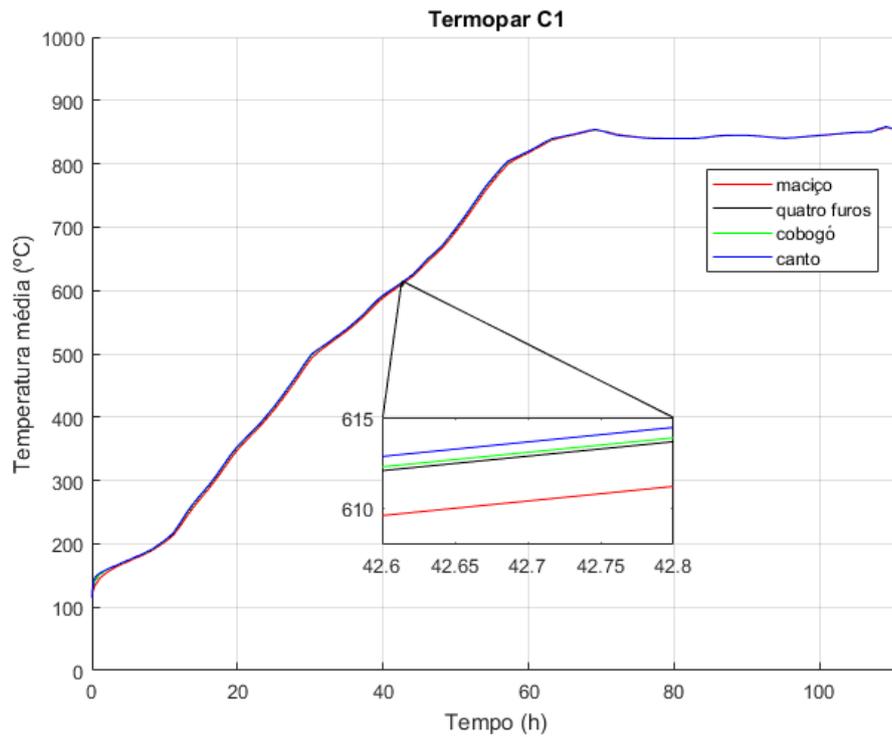


Figura 26 – Temperatura média das peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar C1.
Fonte: Elaboração própria.

4.4.4 Temperatura média das peças cerâmicas – temperatura fixa

Por fim, as peças foram submetidas à uma temperatura fixa de 1000 °C. Percebe-se, por meio da Figura 27, que quando expostas a uma temperatura fixa por um determinado intervalo de tempo, todas as peças alcançam a mesma temperatura final, entretanto, o tempo em que este valor é obtido é variável. Peças do grupo 4 possuem maior relação área/volume, alcançando mais rapidamente a temperatura de 1000 °C. Por outro lado, peças do grupo 1, com menor razão área/volume, precisam de mais tempo para isso.

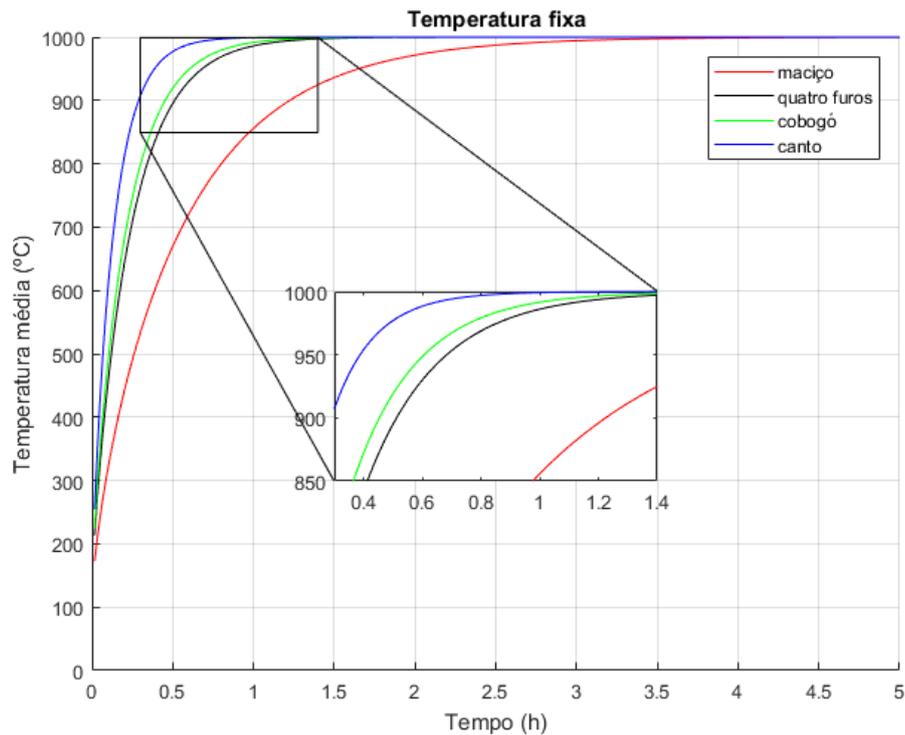


Figura 27 – Temperatura média das peças cerâmicas quando expostas a uma temperatura fixa.
Fonte: Elaboração própria.

4.5 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas

Para assegurar que as peças cerâmicas tenham uma boa qualidade após o processo de queima, é necessário que o gradiente interno de temperatura das peças seja o menor possível (NERY, 2010). Como forma de visualizar de forma mais clara as variações de temperatura nas peças ao longo do tempo, são apresentadas, nesta seção, as diferenças de temperatura máxima e mínima nas peças selecionadas para cada uma das curvas de temperatura – termopar M4, termopar M1, termopar C1, e a uma temperatura fixa de 1000 °C (Figura 15).

4.5.1 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas – termopar M4

Conforme esperado, as peças pertencentes ao grupo 4, por possuir maior relação área/volume apresentaram as menores variações de temperatura em seu interior, quando expostas à curva do termopar M4. Como pode ser observado na Figura 28, a diferença de temperatura no interior das peças varia ao longo do tempo, dependendo do tipo de peça que está sendo queimada. Nota-se que a variação mais expressiva de diferença de temperatura ocorreu quando o forno atingiu cerca de 350 °C com uma peça representante do grupo 1, como esperado. Em relação as demais peças, a diferença de temperatura situou-se entre 2 °C e 5 °C,

caracterizando uma distribuição de temperatura praticamente uniforme, o que é desejável no processo de queima, conforme Nery (2010) e Tagliafico e Senarega (2004).

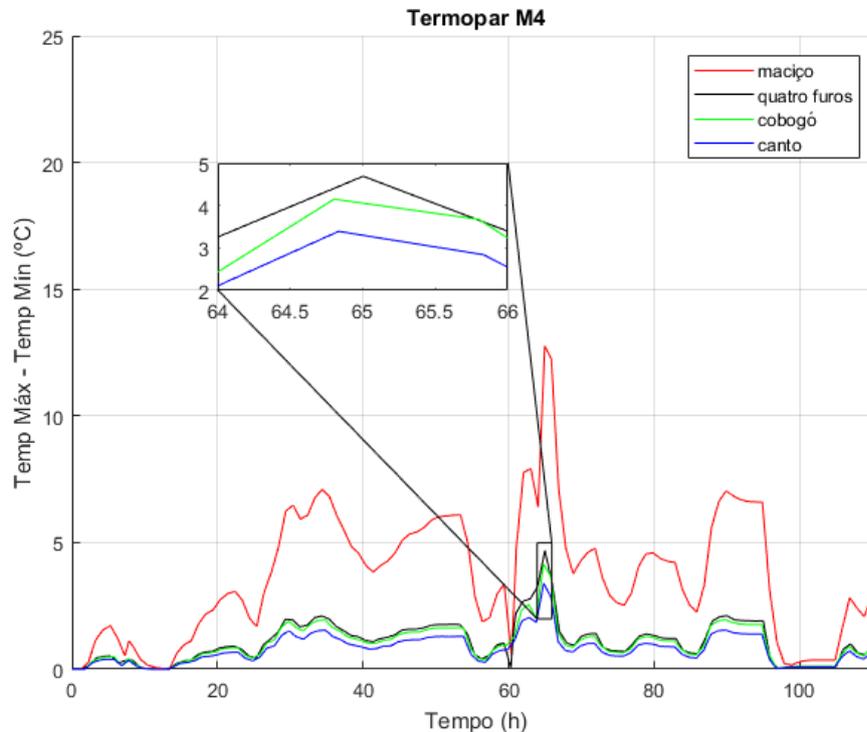


Figura 28 – Diferença de temperatura nas peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar M4. Fonte: Elaboração própria.

4.5.2 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas – termopar M1

Em relação à exposição das peças a curva de queima do termopar M1, como pode ser visto na Figura 29, peças do grupo 1, que não possuem cavidades internas, apresentaram as maiores diferenças de temperatura em seu interior, conforme esperado, caracterizando que o processo de queima não se desenvolve de forma uniforme, sendo este influenciado pela geometria da peça. As maiores diferenças de temperatura foram observadas após cerca de 70 horas de queima, quando o forno atingiu cerca de 600 °C, tendo o tijolo maciço variação de temperatura em torno de 16 °C, e as demais peças de 2 °C à 5 °C.

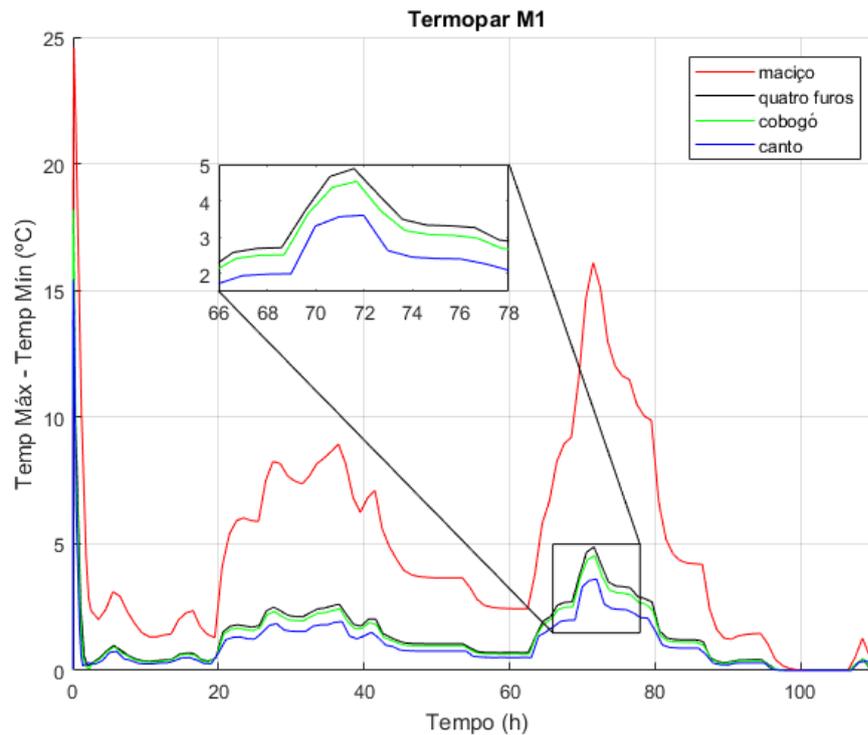


Figura 29 – Diferença de temperatura nas peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar M1.
Fonte: Elaboração própria.

4.5.3 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas – termopar C1

De acordo com Nery (2010), para que a queima se desenvolva de forma uniforme é preciso que a diferença de temperatura máxima e mínima nas peças em cada instante de tempo seja a menor possível. A partir da Figura 30, pode-se notar que as peças apresentam maior uniformidade em sua temperatura quando expostas à curva do termopar C1, que está situado na parte superior do forno.

A maior diferença na temperatura interna das peças foi observada após 28 horas de queima, quando o forno alcança cerca de 500 °C. Neste momento, a variação de temperatura no tijolo maciço é de cerca de 12 °C, e das demais peças de 2,5 °C à 4 °C. Observa-se que as maiores diferenças de temperatura entre as peças, neste caso, são similares às de sua exposição à curva de temperatura do termopar M1, entretanto, o intervalo de tempo em que este fato ocorre é 2,5 vezes menor devido às maiores temperaturas registradas por C1. Percebe-se também que, a partir de 70 horas de queima, a temperatura interna das peças é praticamente uniforme.

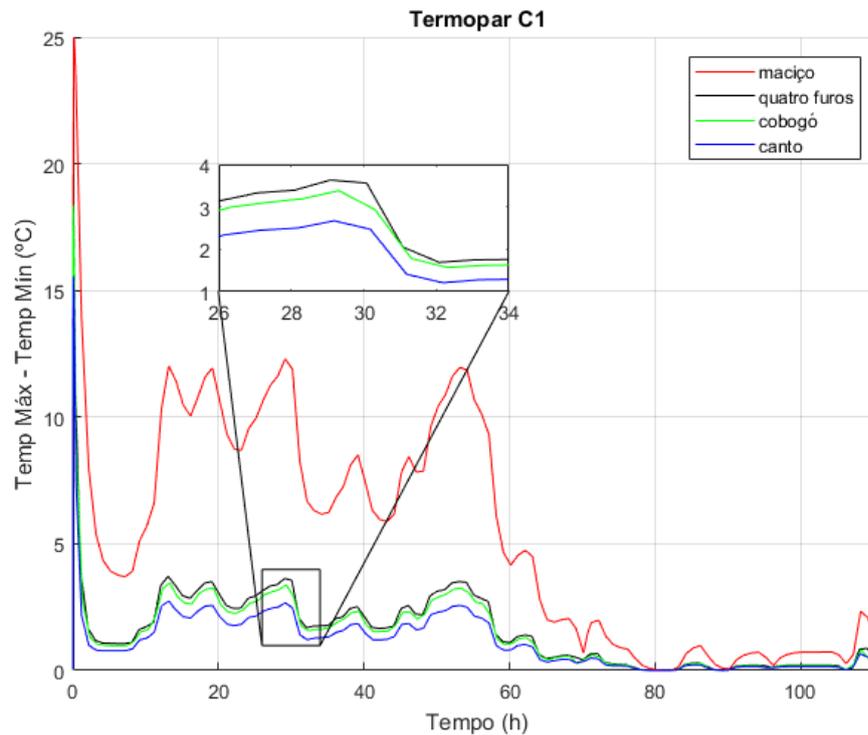


Figura 30 – Diferença de temperatura nas peças cerâmicas quando expostas à curva de queima do termopar C1.
Fonte: Elaboração própria.

Ressalta-se que, apesar das demais regiões do forno, média e baixa, não apresentarem um desempenho tão bom quanto a da região superior, pode-se observar que peças que apresentam maior relação área/volume também possuem uma boa uniformidade em sua temperatura interna nestas regiões (média e baixa).

4.5.4 Diferença de temperatura nas peças cerâmicas – temperatura fixa

Por último, analisou-se as diferenças de temperatura interna das peças quando submetidas a temperatura de 1000 °C. Como pode ser visto na Figura 31, a temperatura interna das peças tende à uniformização, entretanto os intervalos de tempo em que isto acontece são diferentes, sendo dependentes do tipo da peça que está sendo queimada. As peças dos grupos 2, 3 e 4, por possuírem maior relação área/volume tem a temperatura interna uniforme a partir de pouco mais de 1 hora de queima, enquanto peças do grupo 1 precisam de cerca de 4 horas para tal.

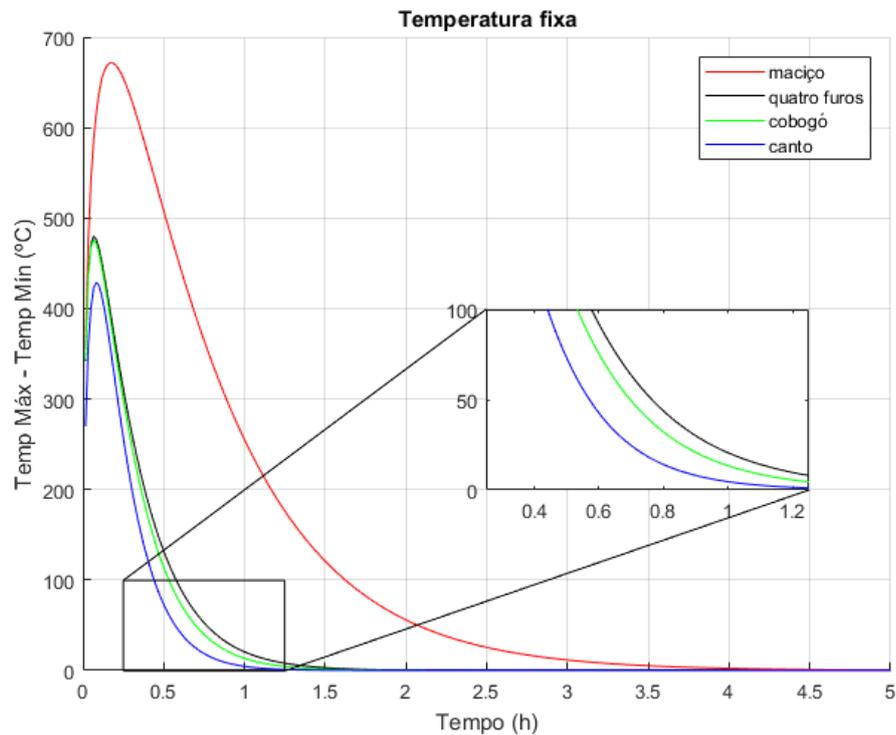


Figura 31 – Diferença de temperatura nas peças cerâmicas quando expostas a uma temperatura fixa.
Fonte: Elaboração própria.

Assim, a partir das análises térmicas conduzidas, pode-se afirmar que é mais interessante alocar as peças do grupo 1 na parte superior do forno; peças do grupo 2 na parte médio – superior; peças do grupo 3 na parte médio – inferior; e peças do grupo 4 na parte inferior do forno, considerando-se apenas os perfis de temperatura obtidos das peças. Vale ressaltar que a estrutura física do forno em que esta pesquisa é desenvolvida também interfere no processo de queima, sendo necessário também avaliar o fluxo de gases em seu interior para promover uma melhor uniformização da queima.

4.6 Fluxo dos gases no interior do forno

A distribuição de temperatura, bem como o fluxo de gases no interior do forno não é homogêneo. A região central apresenta temperaturas mais elevadas devido à disposição das fornalhas, que concentra o gás aquecido na parte do centro. A forma com que os dutos subterrâneos de exaustão dos gases estão dispostos também corrobora para este perfil térmico, uma vez que estabelece um caminho preferencial para escoamento dos gases na região central.

Uma vez que a estrutura física do forno, em estudo, dificulta o processo de queima das peças cerâmicas alocadas em suas laterais, buscou-se por meio da alteração do espaçamento entre as peças melhorar o fluxo dos gases em seu interior, favorecendo as trocas de calor. A

estratégia utilizada foi analisada por meio de quatro configurações de carga, conforme Seção 3.2.6, não sendo necessária nenhuma alteração na estrutura do forno que pudesse incorrer em custos ao empresário. A partir das informações apresentadas na Tabela 1, Seção 3.2.3, elaborou-se a geometria do forno (Figura 32) em que as configurações de carga foram inseridas.

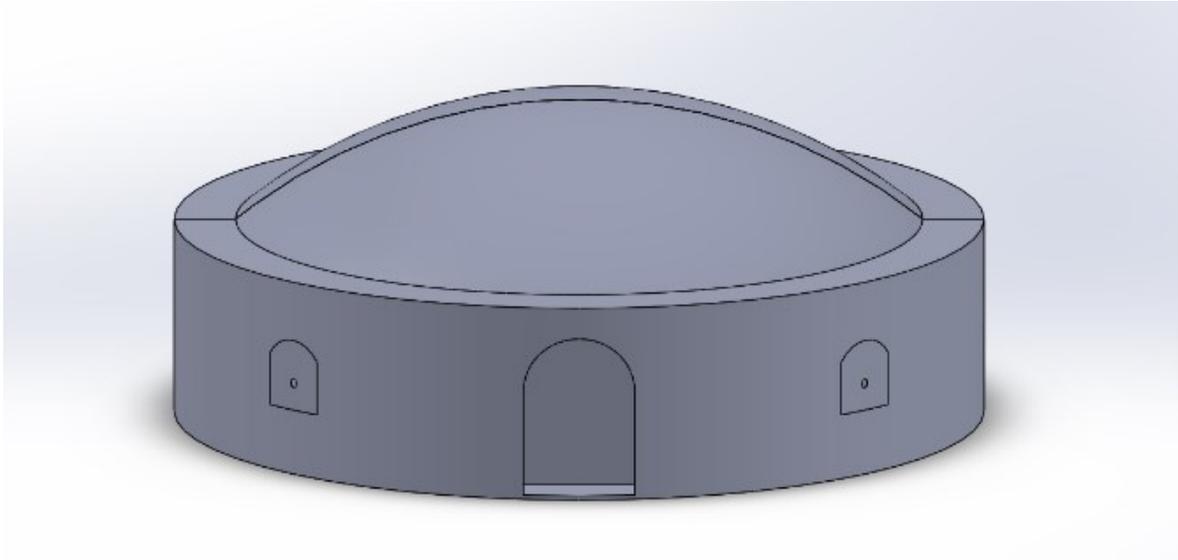
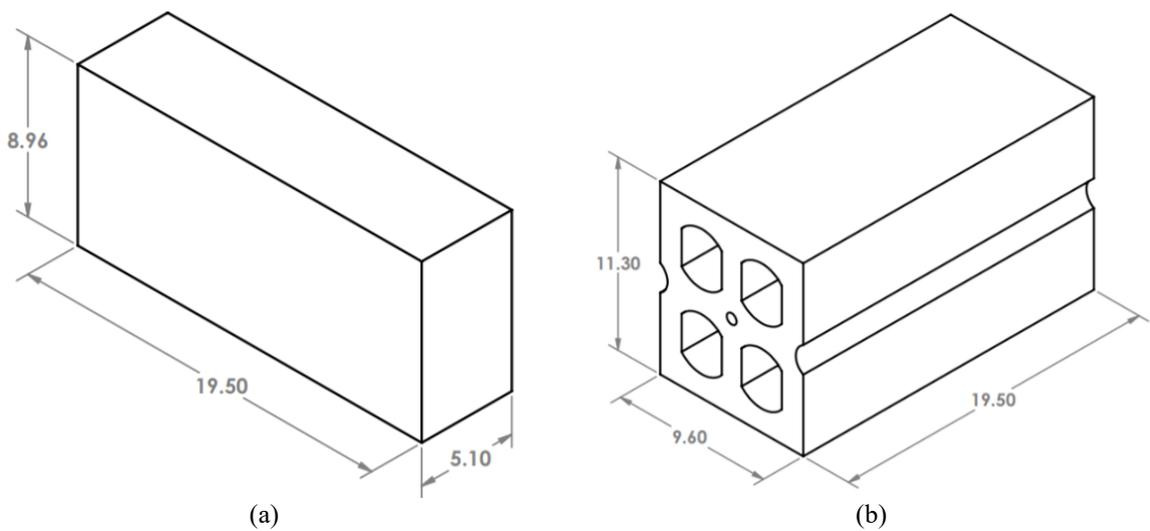


Figura 32 – Geometria do forno.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme Seção 4.2, as peças cerâmicas foram divididas em quatro grupo, sendo escolhidas as peças de tijolo maciço, quatro furos, cobogó e canto para representar cada uma das categorias. Na Figura 33 é possível observar algumas das dimensões reais das peças selecionadas.



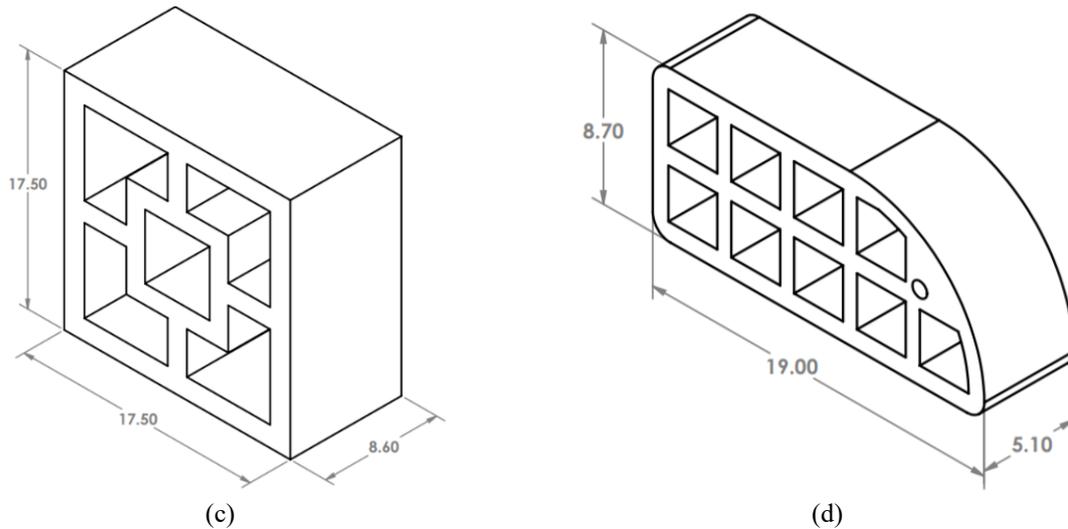


Figura 33 – Dimensões das peças selecionadas – (a) maciço, (b) quatro furos, (c) cobogó 1, (d) tijolo de canto.
Fonte: Elaboração própria.

O forno apresenta a altura de 2,2 m do solo até a carga, sendo as peças dispostas, normalmente, em 22 fileiras de cerca de 10 cm de altura. Devido ao elevado esforço computacional observado nesta etapa, ocasionado pela alta quantidade de elementos no interior do forno, complexidade das malhas e, elevado número de nós, optou-se por escalar as peças cerâmicas e, conseqüentemente, reduzir a quantidade de nós e fileiras no forno.

Pelo fato de as peças terem sido agrupadas em quatro categorias, optou-se por criar apenas quatro fileiras de tijolos no forno, de forma a reduzir o esforço computacional. Assim, considerando a Situação 1 e Situação 2, as quais apresentam o mesmo tipo de peça, tem-se o valor de, aproximadamente, 55 cm de altura para cada fileira, uma vez que a altura do solo até a carga é de 2,2 m. Sendo a altura do tijolo maciço equivalente a cerca de 9 cm, escalou-se esta peça em 6x, assim, cada fileira apresentou o valor de cerca de 54 cm de altura. Observa-se que, nesta escala, a altura do solo até a carga foi de, aproximadamente, 2,16 m.

Ademais, tendo as peças de tijolo maciço a largura de, aproximadamente, 5,1 cm na escala real, optou-se por deixar um espaço entre as peças correspondente a metade de sua largura, assim, definiu-se o valor de 2,55 cm, escala real, para este espaçamento. A partir desta informação, as peças foram alocadas em 14 fileiras no sentido horizontal. Optou-se, também, em deixar um espaço de cerca de 5 cm, escala real, entre a carga e as paredes do forno. Na Figura 34 pode ser visto o carregamento do forno conforme a Situação 1.

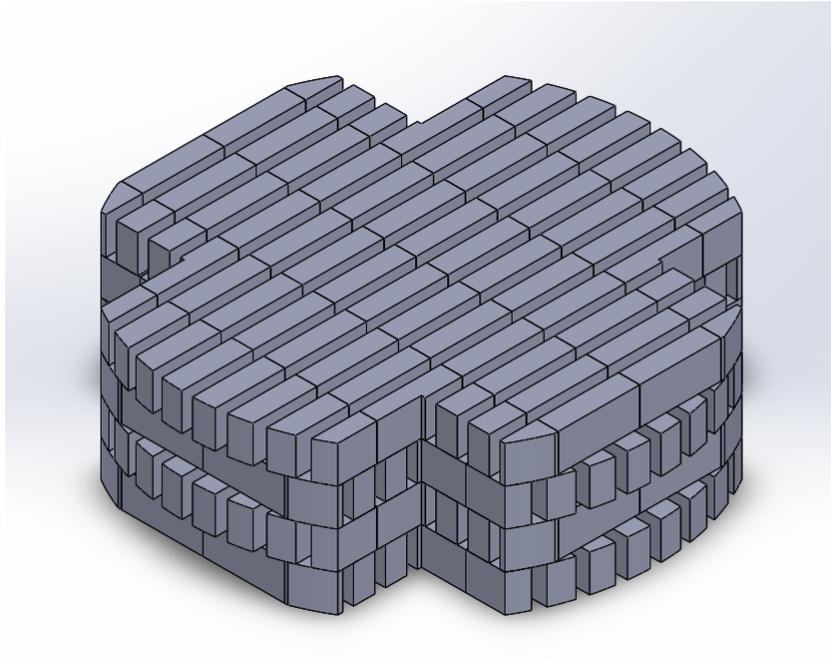


Figura 34 – Forno carregado com tijolo maciço, considerando igual espaçamento entre as fileiras.
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 34 é possível observar, no sentido horizontal, a presença de 13 espaçamentos entre as fileiras de tijolos, com a largura de 15,3 cm cada um, na escala adotada. O somatório dos espaçamentos equivale, neste caso, ao valor de 198,9 cm. Na configuração de carga, proposta na Situação 2, o forno é carregado somente com tijolo maciço, entretanto, neste o espaçamento entre as peças é diferente. Conforme Seção 3.2.7, optou-se por manter o valor total de espaço entre as peças (198,9 cm), estabelecendo uma simetria entre os espaçamentos a partir do centro do forno, sendo estes múltiplos de um valor base. Considerou-se, também, o valor zero para o espaçamento entre as fileiras do centro. O espaçamento entre as fileiras foi calculado de acordo com a equação (8):

$$198,9 = 2 \times (0 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6) \times \text{esp}_{\text{base}}$$

$$\text{esp}_{\text{base}} = 4,736 \text{ cm}$$

Na Figura 35 pode-se observar os espaçamentos (cm) utilizados entre as fileiras, considerando uma simetria do centro para as laterais do forno.

28,416	23,680	18,944	14,208	9,472	4,736	4,736	9,472	14,208	18,944	23,680	28,416
--------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------

Figura 35 – Valores de espaçamento entre as fileiras de tijolos.
Fonte: Elaboração própria.

O objetivo de aumentar o espaçamento entre as peças que estão distantes do centro é possibilitar um aumento no fluxo de gases nas laterais do forno, uma vez que sua estrutura física favorece a passagem dos gases na parte central. A configuração de carga proposta na Situação 2 pode ser vista na Figura 36.

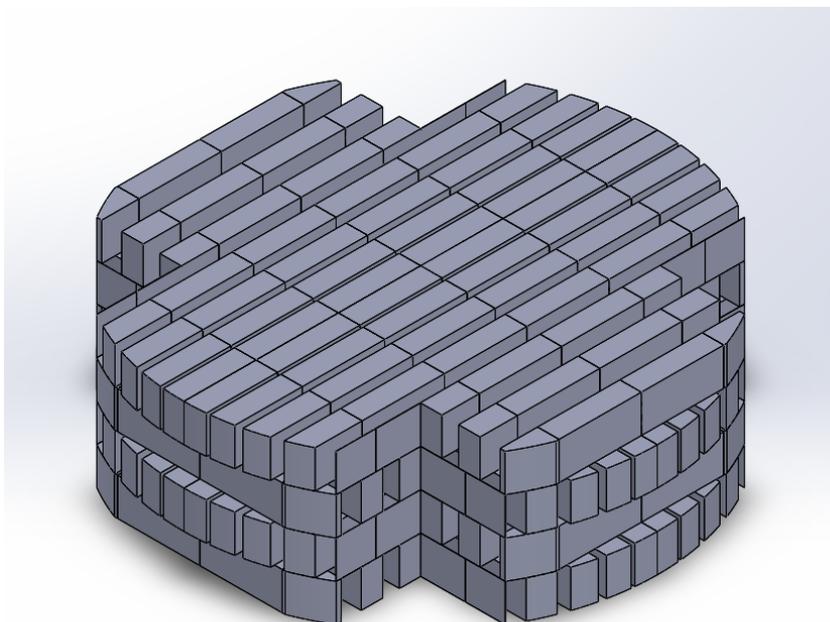


Figura 36 – Forno carregado com tijolo maciço, considerando diferente espaçamento entre as fileiras.
Fonte: Elaboração própria.

Em relação à Situação 3 e Situação 4, optou-se por alocar cada um dos tipos de peças em uma fileira, de acordo com a análise térmica promovida na Seção 4.3. Pelo fato de as peças possuírem alturas diferentes, não foi utilizada a mesma escala das situações anteriormente apresentadas. Se tal escala fosse utilizada a altura do solo até a carga ultrapassaria o limite de 2,2 m.

Nas simulações referentes a estas situações as peças foram dispostas na forma que, normalmente, são queimadas no forno, sendo que as peças de tijolo maciço e quatro furos também podem ser organizadas de forma perpendicular à apresentada. As peças, nestas situações, foram escaladas em 5x, sendo alcançado o valor de 2,14 m de altura do solo até a carga. Para a Situação 3, em cada fileira, foi utilizado o mesmo padrão de espaçamento definido para a Situação 1, metade da largura da peça.

Na escala adotada os valores de espaçamento foram, respectivamente, 21,75 cm (fileira 1 – tijolo de canto); 21,5 cm (fileira 2 – cobogó 1); 24 cm (fileira 3 – quatro furos); e 12,75 cm (fileira 4 – maciço), sendo esta proposição de carga apresentada nas Figuras 37a, 37b, 37c, e 37d, respectivamente.

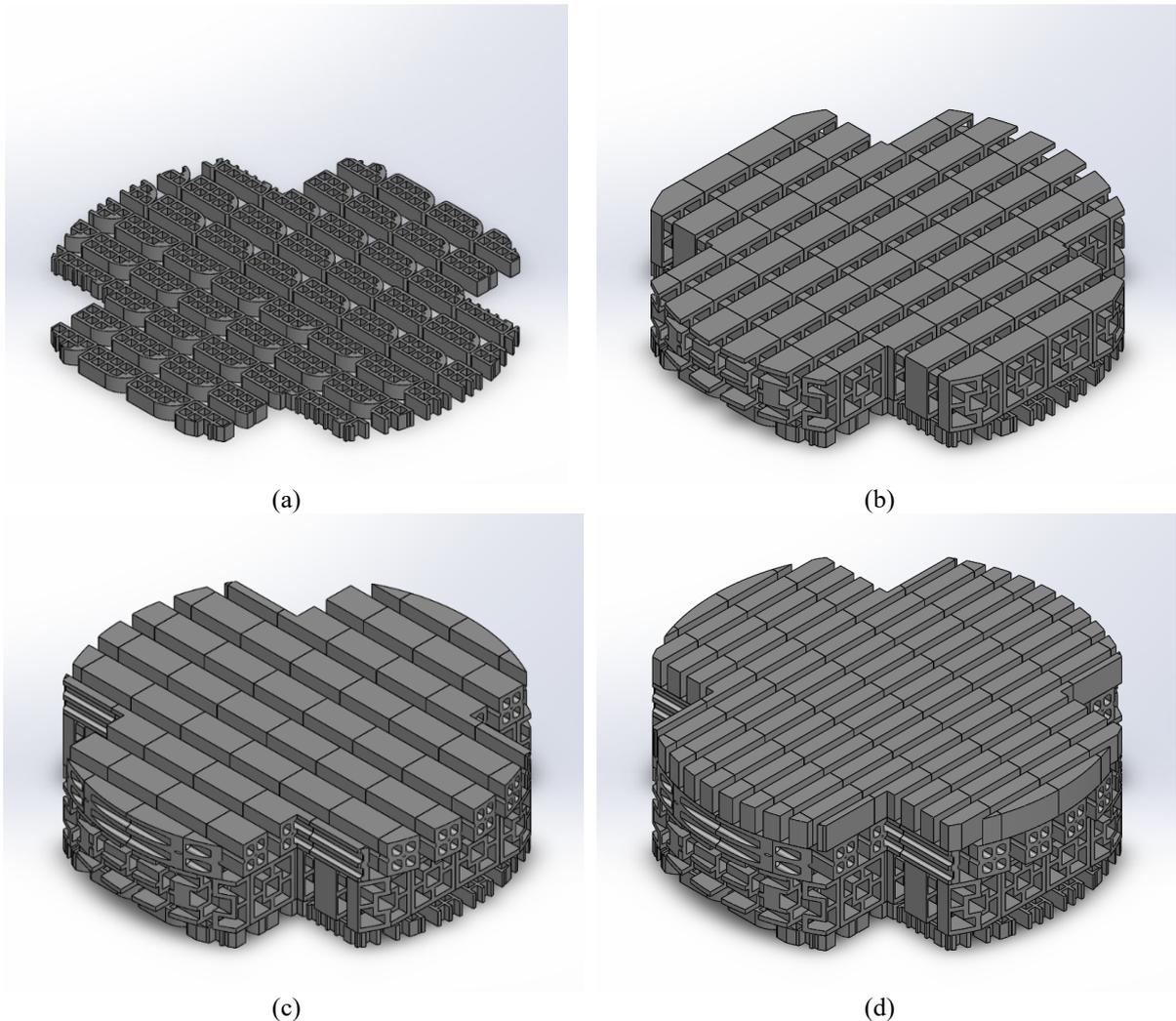


Figura 37 – Forno carregado com os quatro tipos de peças, considerando igual espaçamento entre as fileiras – (a) fileira 1 – tijolo de canto, (b) fileira 2 – cobogó 1, (c) fileira 3 – quatro furos, (d) fileira 4 – maciço.
Fonte: Elaboração própria.

Por fim, em relação à Situação 4, os quatro tipos de peças, assim como na Situação 3, foram organizados no forno no percentual de 25% cada, entretanto, o espaçamento entre as peças seguiu o padrão definido para a Situação 2. O cálculo do espaçamento base de cada uma das fileiras, na escala adotada, é apresentado abaixo, conforme equação (8), e a sequência de preenchimento do forno para esta situação pode ser observada na Figura 38.

Fileira 1 – tijolo de canto:

$$21,75 * 9 = 2 * (0 + 1 + 2 + 3 + 4) * \text{esp}_{\text{base}}$$

$$\text{esp}_{\text{base}} = 9,7875 \text{ cm}$$

Fileira 2 – cobogó 1:

$$21,5 * 9 = 2 * (0 + 1 + 2 + 3 + 4) * \text{esp}_{\text{base}}$$

$$\text{esp}_{\text{base}} = 9,675 \text{ cm}$$

Fileira 3 – quatro furos:

$$24 * 9 = 2 * x (0 + 1 + 2 + 3 + 4) * \text{esp}_{\text{base}}$$

$$\text{esp}_{\text{base}} = 10,8 \text{ cm}$$

Fileira 4 – maciço:

$$12,75 * 17 = 2 * x (0 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8) * \text{esp}_{\text{base}}$$

$$\text{esp}_{\text{base}} = 3,01 \text{ cm}$$

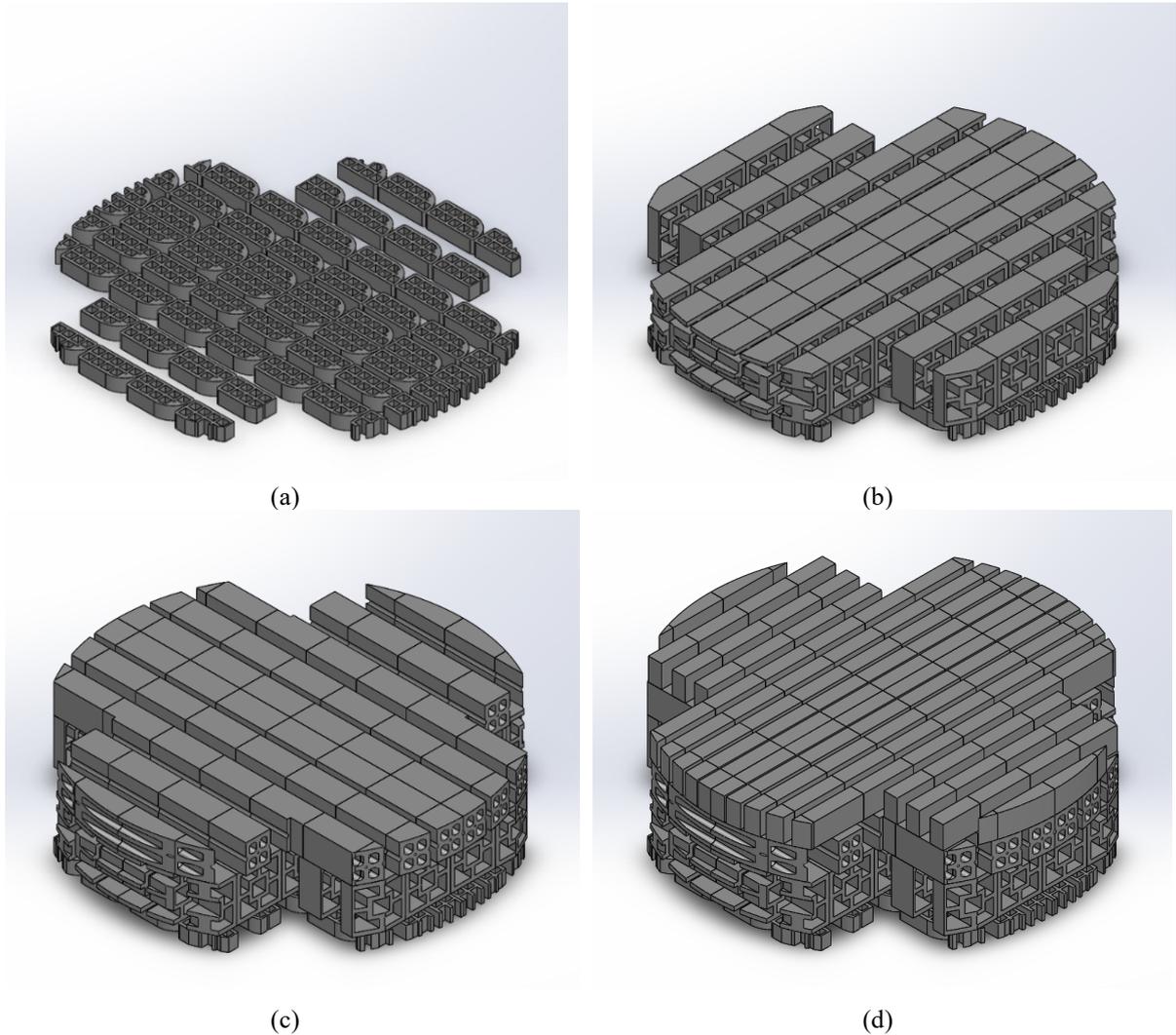


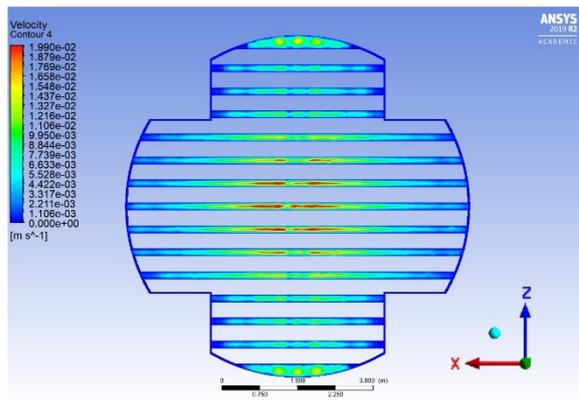
Figura 38 – Forno carregado com os quatro tipos de peças, considerando diferente espaçamento entre as fileiras – (a) fileira 1 – tijolo de canto, (b) fileira 2 – cobogó 1, (c) fileira 3 – quatro furos, (d) fileira 4 – maciço.
Fonte: Elaboração própria.

Após a elaboração, a geometria de cada uma das situações apresentadas foi importada no *ANSYS Fluent*, sendo possível gerar as malhas correspondentes, às quais foram utilizadas para avaliar o fluxo dos gases no interior do forno.

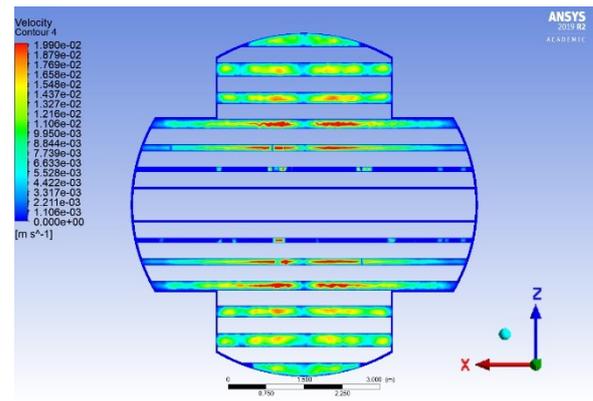
4.6.1 Fluxo dos gases no forno – Situação 1 e Situação 2

Uma melhor acomodação das peças no forno facilita a circulação dos gases quentes, contribuindo para uma melhor distribuição de temperatura e troca de calor em seu interior (DADAM *et al.*, 2004). Conforme mencionado na Seção 3.2.6, na Situação 1 e na Situação 2, o forno é preenchido somente com tijolo maciço, considerando espaçamento igual entre as peças na Situação 1 (2,55 cm, escala real), e espaçamento diferente na Situação 2 (Figura 35).

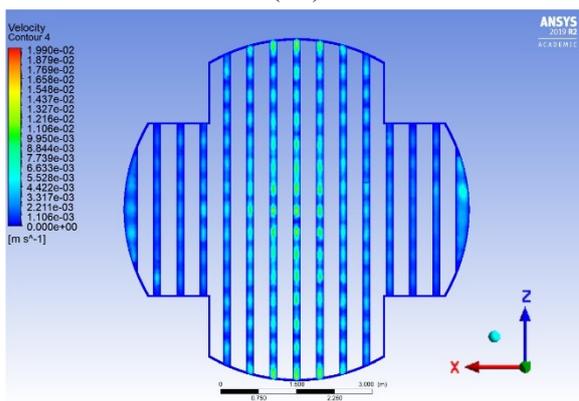
Para compreender como ocorre o fluxo de gases no forno é apresentada, na Figura 39, a visão superior no forno, sendo possível observar o fluxo dos gases no meio de cada uma das fileiras que, na escala adotada para estas situações, possui a altura de 53,76 cm. Assim, a velocidade dos gases pode ser observada, respectivamente, nas seguintes alturas: 26,88 cm (Figura 39a.1 e 39b.1); 80,64 cm (Figura 39a.2 e 39b.2); 134,40 cm (Figura 39a.3 e 39b.3); e 188,16 cm (Figura 39a.4 e 39b.4) em relação ao solo.



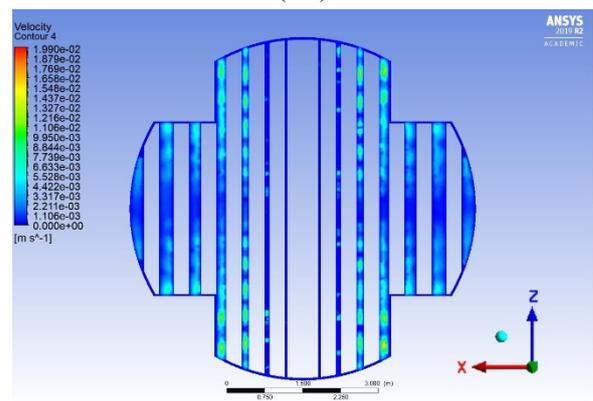
(a.1)



(b.1)



(a.2)



(b.2)

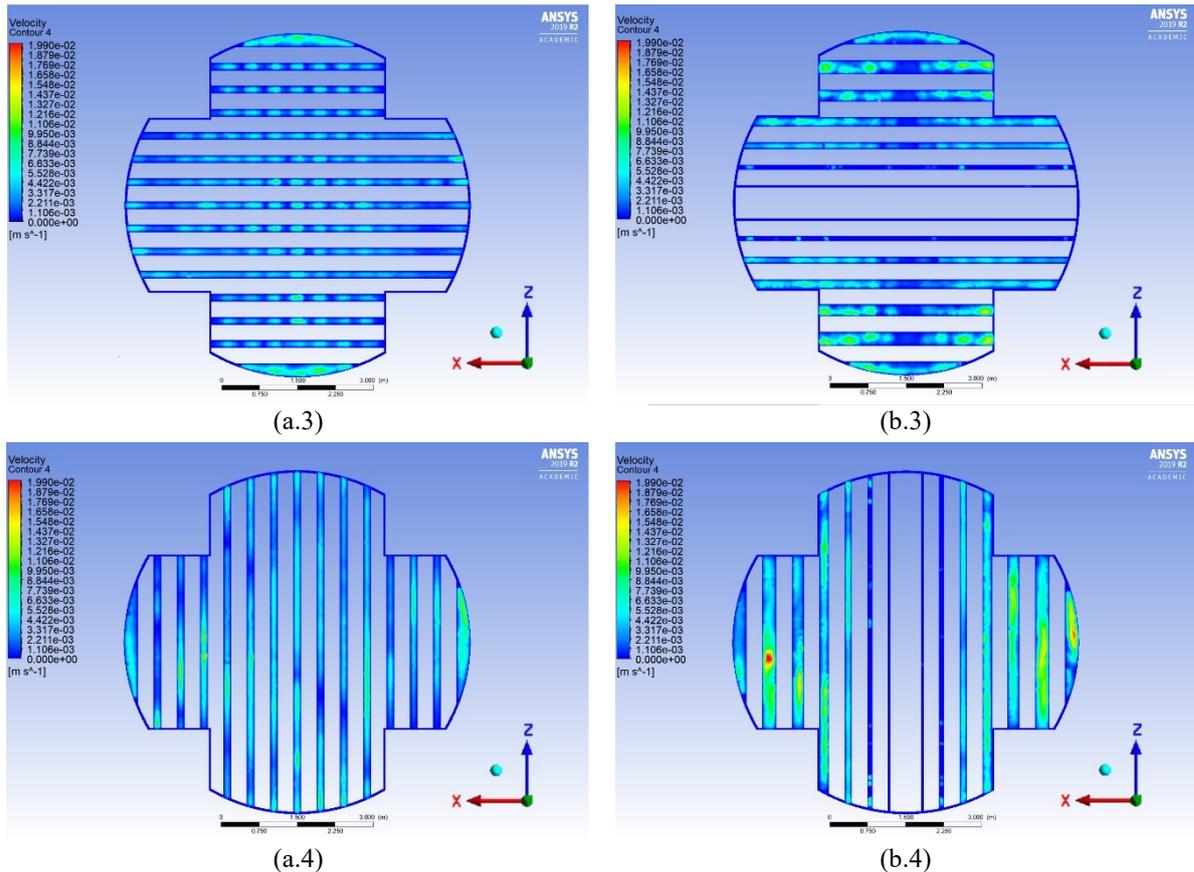


Figura 39 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço – (a.1) Situação 1 – fileira 1, (a.2) Situação 1 – fileira 2, (a.3) Situação 1 – fileira 3, (a.4) Situação 1 – fileira 4, (b.1) Situação 2 – fileira 1, (b.2) Situação 2 – fileira 2, (b.3) Situação 2 – fileira 3, (b.4) Situação 2 – fileira 4
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 39 é possível observar que a região mais próxima ao solo, fileira 1, apresenta um fluxo de gás mais intenso (Figura 39a.1 e Figura 39b.1). Esse fenômeno ocorre, pois, é na região inferior do forno que ocorre a retirada dos gases de combustão para o meio externo, bem como a alimentação da fornalha com oxigênio (NERY, 2010).

Percebe-se, na Figura 39a.1, um maior fluxo de gás na parte central do forno devido à disposição dos dutos subterrâneos, que forçam a passagem dos gases nesta região. Ao ser utilizado um diferente espaçamento entre as peças (Figura 39b.1) nota-se um aumento no fluxo dos gases nas laterais do forno, o que pode melhorar a queima nestas regiões.

Em relação ao fluxo dos gases na fileira 2 (Figura 39a.2 e 39b.2) percebe-se uma maior uniformidade no fluxo nas duas situações, entretanto, é possível notar que a alteração no espaçamento entre as peças melhora a circulação dos gases nas laterais do forno (Figura 39b.2). O comportamento dos gases na fileira 3 (Figura 39a.3 e 39b.3) é similar ao da fileira 2, entretanto, neste caso, a fileira está mais próxima das fornalhas, sendo, provavelmente, essa a razão para o aumento mais significativo do fluxo dos gases nas laterais.

Por fim, na fileira 4 (Figura 39a.4 e 39b.4) o comportamento dos gases devido à variação do espaçamento entre as peças se repete (Figura 39b.4). Assim como na fileira 3, a variação é mais significativa devido, possivelmente, à disposição das fornalhas. Nas Figuras 40, 41, 42 e 43 é possível visualizar, de forma mais clara, a velocidade dos gases ao longo do forno em cada uma das fileiras, tanto no eixo X, quanto no eixo Z, sendo a abscissa '0' utilizada para denotar o centro do forno em cada um dos eixos.

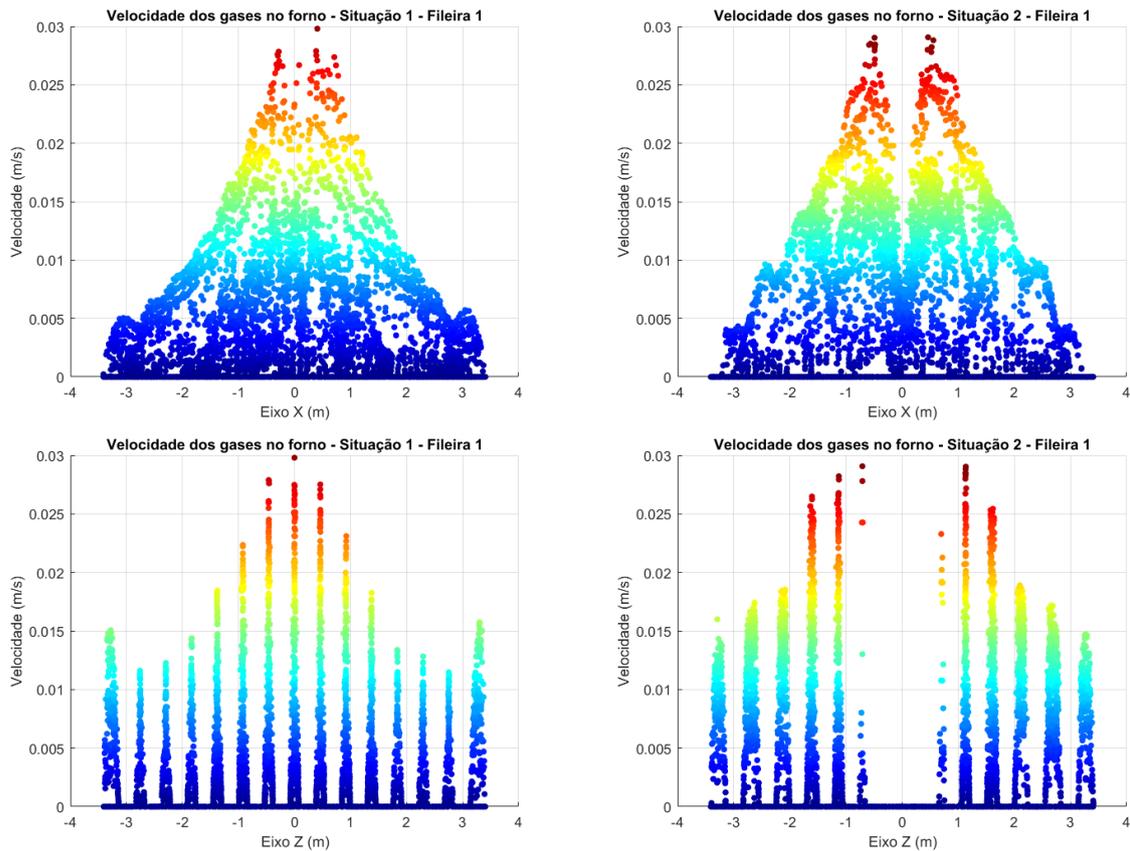


Figura 40 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço – fileira 1.
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 40 pode-se observar, no eixo X, a velocidade dos gases em todos os espaçamentos, de forma conjunta, enquanto no eixo Z, é apresentada a velocidade dos gases em cada um dos espaçamentos, de forma individual. Percebe-se, que quando o espaçamento é mantido constante, o fluxo dos gases é mais intenso na região do centro do forno, entretanto, à medida que o espaçamento entre as peças aumenta em direção às laterais, o fluxo dos gases passa a ser mais distribuído, uniformizando a queima.

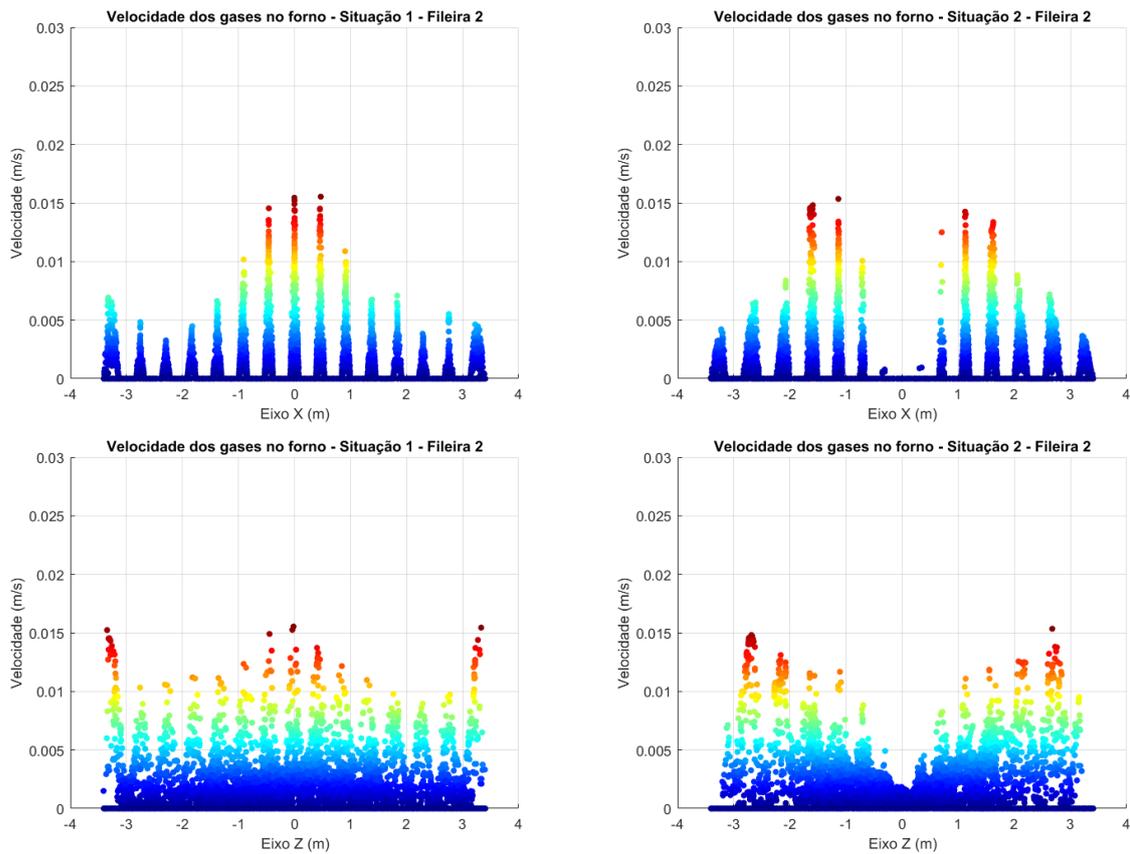
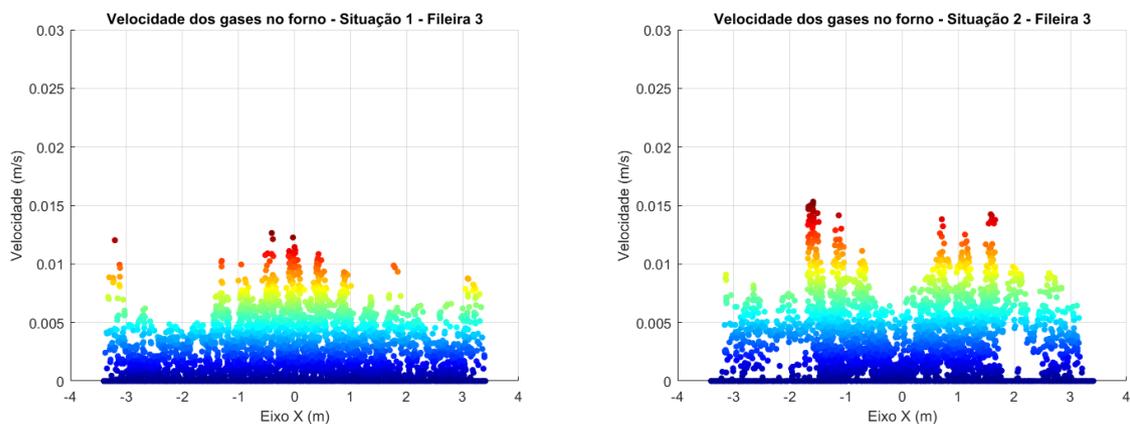


Figura 41 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço – fileira 2.
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 41 pode-se notar que a apresentação da velocidade dos gases nos eixos X e Z é realizada de forma oposta ao da Figura 40. Isso ocorre, pois, as peças da fileira 2 estão organizadas de forma perpendicular às da fileira 1. Ao se utilizar igual espaçamento entre as peças, percebe-se que o fluxo dos gases está concentrado na região central, tal como na fileira 1, e quando o espaçamento é alterado, nota-se uma melhoria na distribuição dos gases, o que pode melhorar o processo de queima, contribuindo para as trocas de calor.



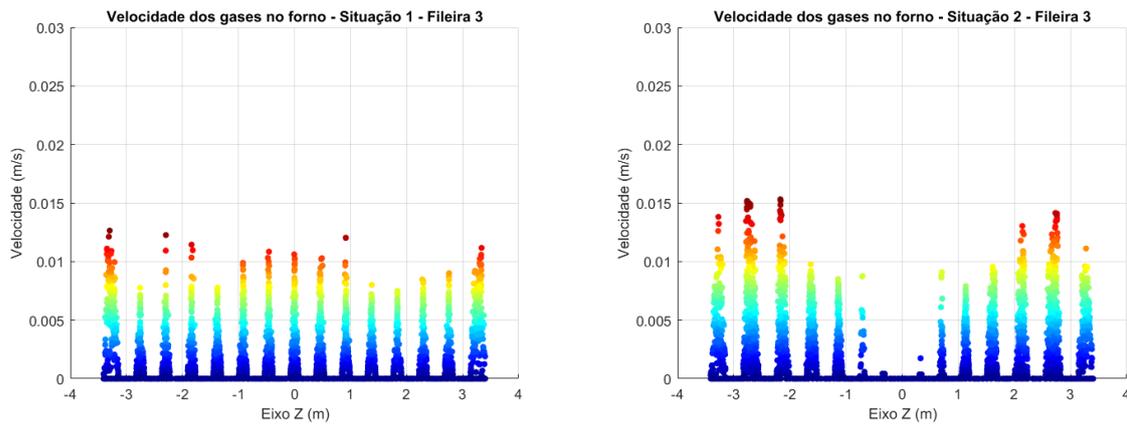


Figura 42 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço – fileira 3.
Fonte: Elaboração própria.

A velocidade dos gases na Figura 42 é apresentada da mesma forma que na Figura 40. Nota-se que, mesmo utilizando igual espaçamento entre as peças, o fluxo dos gases não é concentrado na região central, e que quando os gases são forçados a passar nas regiões laterais, o perfil de distribuição se torna menos uniforme, apresentando na região central velocidades semelhantes às alcançadas quando foi utilizado igual espaçamento entre as peças, e velocidades superiores nas regiões laterais.

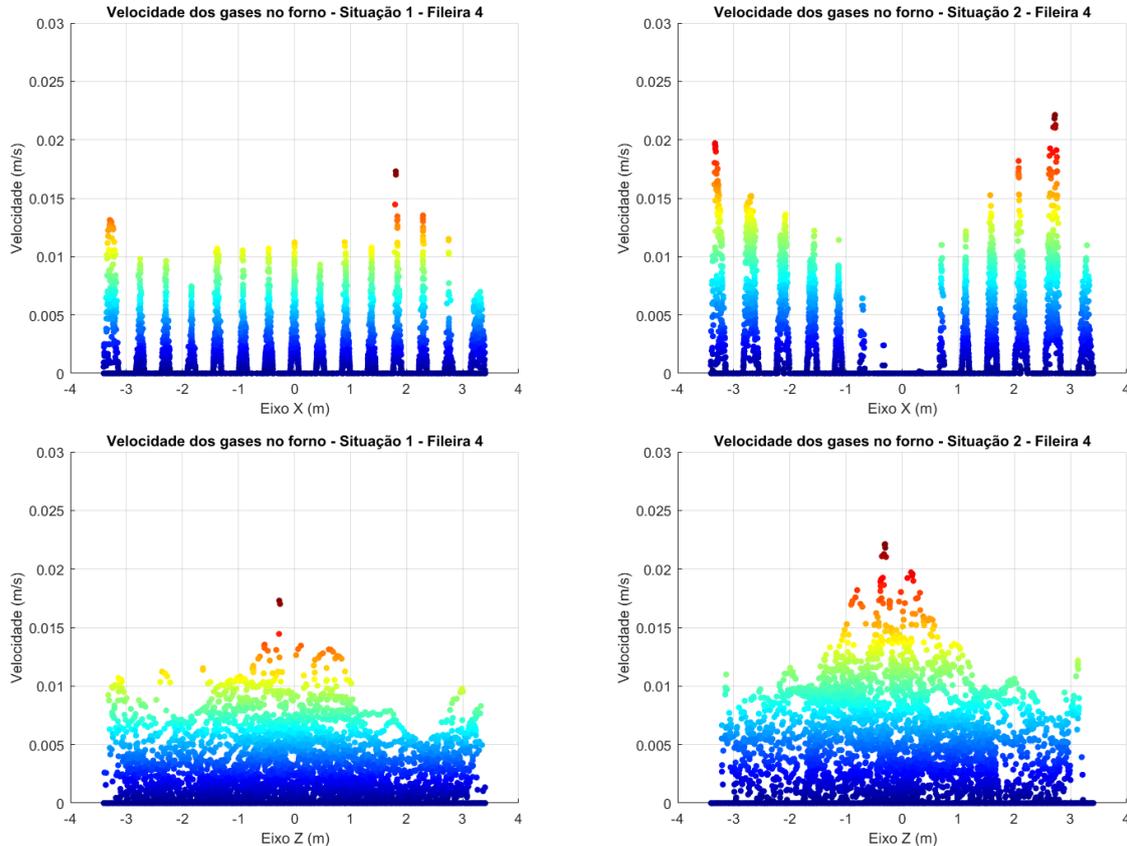
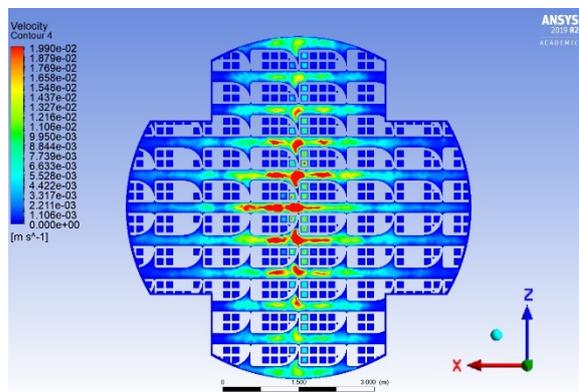


Figura 43 – Velocidade dos gases no forno carregado com tijolo maciço – fileira 4.
Fonte: Elaboração própria.

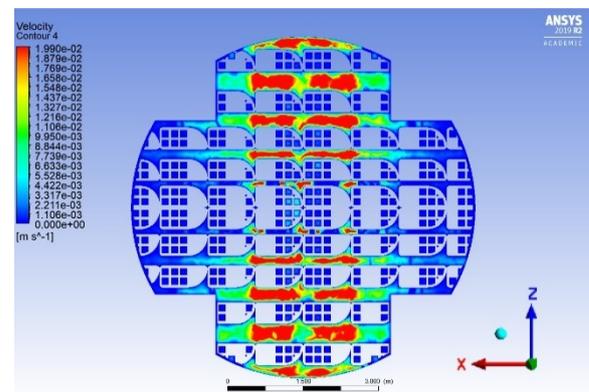
Finalizando, na Figura 43, a velocidade dos gases é apresentada tal como na Figura 41. O comportamento dos gases é similar ao da fileira 3. Pode-se notar, a partir das Figuras 40, 41, 42 e 43 que a alteração no espaçamento entre as peças aumentou ligeiramente a velocidade dos gases nas fileiras 3 e 4, principalmente nas regiões laterais. Em relação à fileira 1, esta variação contribuiu para uma melhor distribuição dos gases em sua região central. Nas fileiras 2, 3 e 4 observou-se que o fluxo de gases foi deslocado para as laterais do forno, sendo na fileira 4 notado um aumento significativo na velocidade dos gases.

4.6.2 Fluxo dos gases no forno – Situação 3 e Situação 4

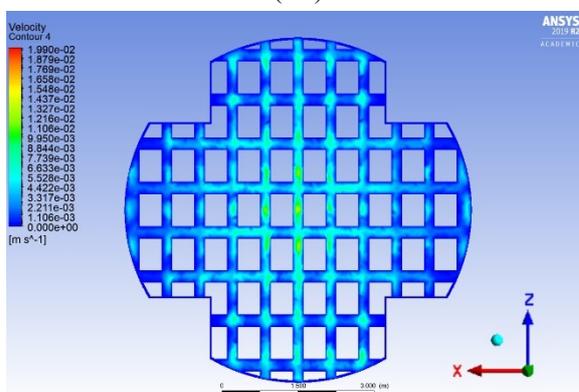
De forma semelhante, também foi avaliado o fluxo dos gases quando o forno foi carregado com os quatro tipos de peças cerâmicas, sendo avaliado o efeito da variação de espaçamento entre elas, conforme Seção 3.2.6. Na Figura 44 é possível observar a velocidade dos gases no meio de cada uma das fileiras, tanto para a Situação 3, quanto para a Situação 4, sendo apresentada a visão superior do forno, nas seguintes alturas: 12,75 cm (Figura 44a.1 e 44b.1); 69,25 cm (Figura 44a.2 e 44b.2); 141,25 cm (Figura 44a.3 e 44b.3); e 191,90 cm (Figura 44a.4 e 44b.4) em relação ao solo.



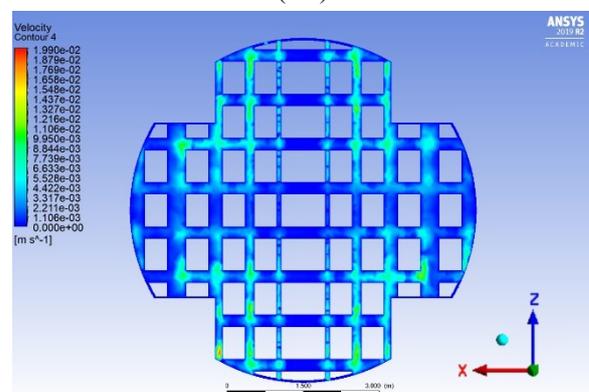
(a.1)



(b.1)



(a.2)



(b.2)

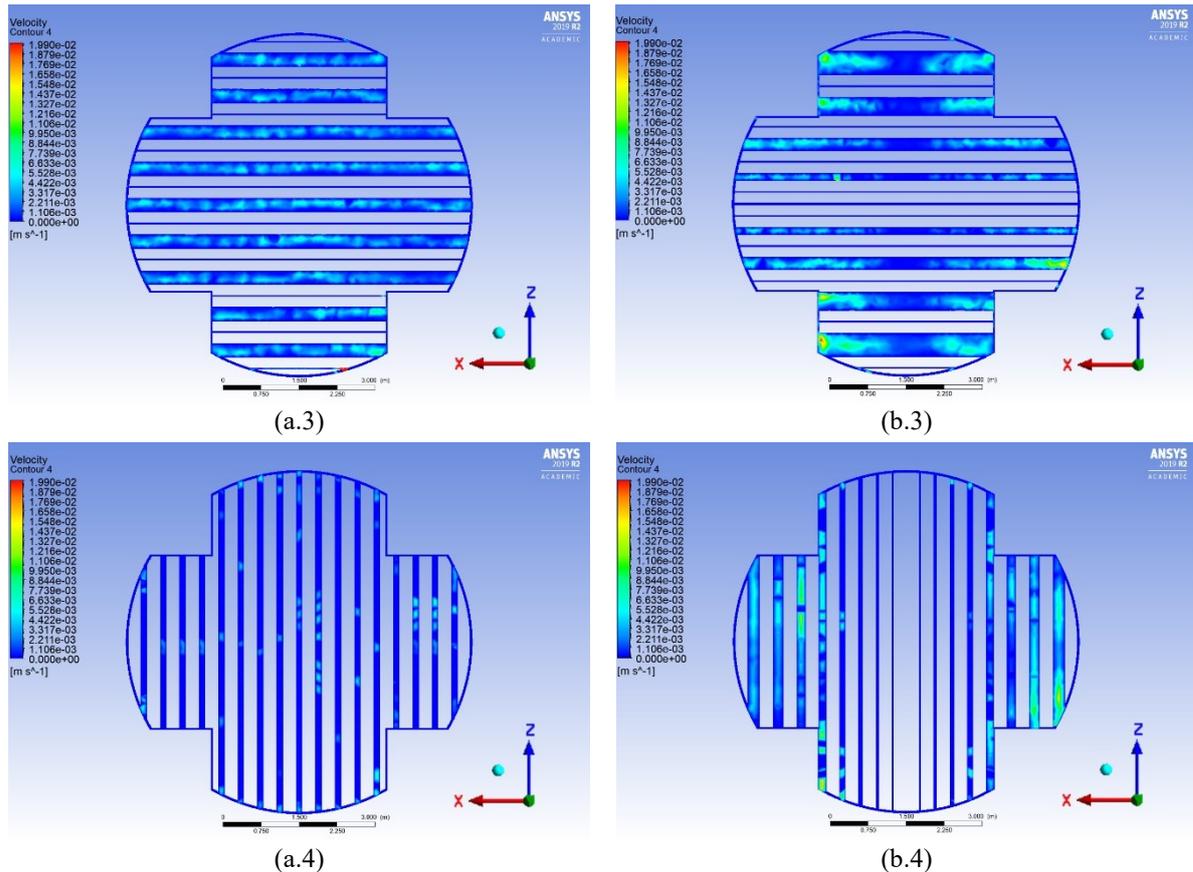


Figura 44 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças – (a.1) Situação 3 – fileira 1, (a.2) Situação 3 – fileira 2, (a.3) Situação 3 – fileira 3, (a.4) Situação 3 – fileira 4, (b.1) Situação 4 – fileira 1, (b.2) Situação 4 – fileira 2, (b.3) Situação 4 – fileira 3, (b.4) Situação 4 – fileira 4
 Fonte: Elaboração própria.

O carregamento do forno na Situação 3 e Situação 4 considerou os quatro tipos de peças (maciço, quatro furos, cobogó, e tijolo de canto) sob análise nesta pesquisa. Dentre estas, apenas o tijolo maciço possui uma estrutura inteiriça, sem cavidades em seu interior, que dificultam a passagem dos gases. Na Figura 44 o efeito causado pela variação no espaçamento entre as peças no fluxo dos gases é significativo, sendo percebido um aumento na velocidade dos gases nas regiões laterais do forno.

Na Figura 44a.1, fileira 1, o fluxo dos gases é mais intenso na região central, devido à proximidade da fileira com os dutos subterrâneos. Ao se alterar o espaçamento entre as peças o fluxo é intensificado nas regiões laterais (Figura 44b.1). Pelo fato desta fileira ter sido preenchida com tijolo de canto, que possui uma maior quantidade de cavidades, percebe-se que a intensidade dos gases nesta fileira é maior quando comparada com as Figuras 39a.1 e 39b.1.

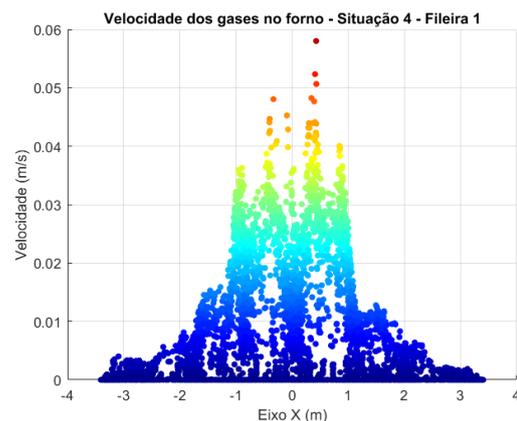
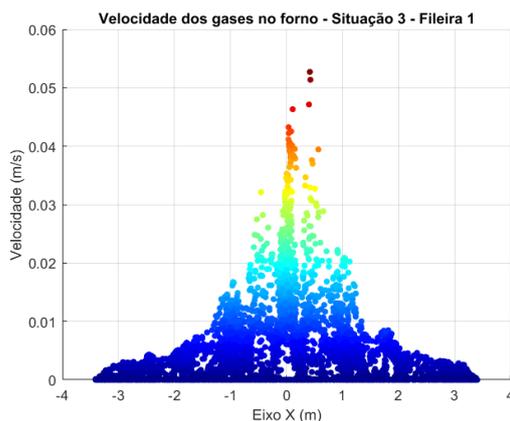
O comportamento dos gases na fileira 2 (Figura 44a.2 e Figura 44b.2) é similar ao da fileira 1. Ao se utilizar o mesmo valor de espaçamento tem-se uma concentração no fluxo na região central, e quando o espaçamento é alterado percebe-se uma melhor distribuição dos gases

nas regiões laterais. Ao se comparar a Figura 39a.2 com a Figura 44a.2, percebe-se que, na última, o fluxo dos gases é mais intenso no centro. Esse efeito ocorre, provavelmente, devido ao diferente tipo de peça que foi alocado na fileira 2. Enquanto na primeira, a fileira foi preenchida com tijolo maciço, na última o preenchimento foi realizado com o tijolo cobogó.

Em relação à fileira 3, percebe-se uma uniformidade no fluxo dos gases quando é utilizado o mesmo valor de espaçamento entre as peças (Figura 44a.3) e um aumento no fluxo quando o espaçamento entre as peças é alterado (Figura 44b.3). Tal como na Figura 39b.3, o aumento no fluxo percebido na fileira 3 pode ter ocorrido devido à proximidade da fileira com as fornalhas, e ao fato da fileira ter sido preenchida com o tijolo quatro furos, que apresenta espaços vazios em sua estrutura física.

Na fileira 4, o comportamento dos gases foi similar ao das demais fileiras, sendo intensificado nas regiões laterais devido a alteração do espaçamento entre as peças e ao fato da fileira estar mais próxima às fornalhas (Figura 44b.4).

Com o intuito de facilitar a visualização, são apresentados nas Figuras 45, 46, 47 e 48 os gráficos que relacionam a velocidade dos gases ao longo do forno, tanto no eixo X, quanto no eixo Z, sendo o centro do forno representado pela abscissa '0'. A apresentação da velocidade dos gases em cada uma das fileiras é realizada da mesma forma que nas Figuras 40, 41, 42 e 43, respectivamente. O comportamento dos gases, por sua vez, é similar ao da Situação 1, quando utilizado igual espaçamento entre as peças, e ao da Situação 2, quando utilizado diferente valor de espaçamento.



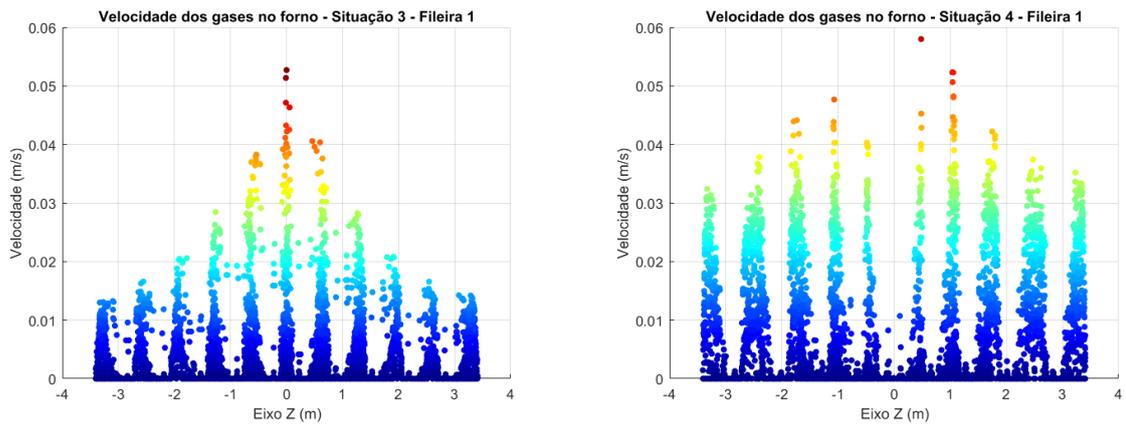


Figura 45 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças – fileira 1.
Fonte: Elaboração própria.

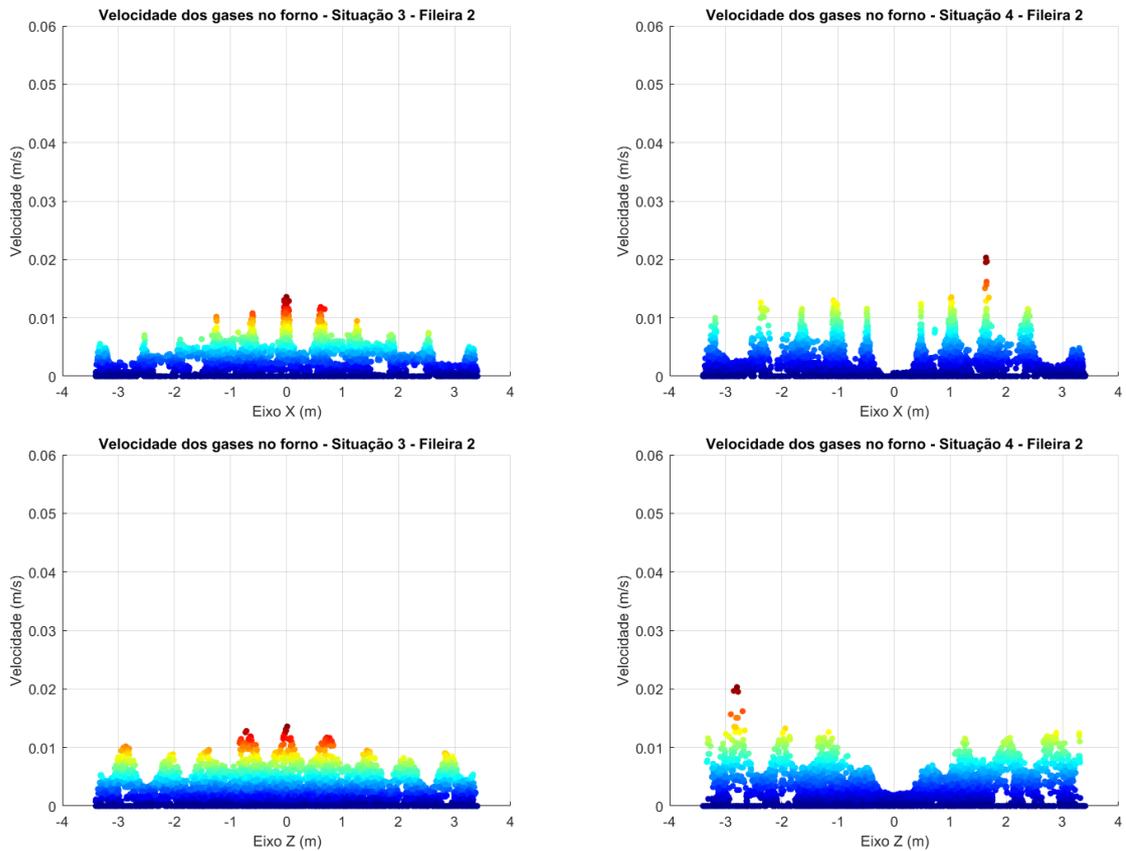


Figura 46 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças – fileira 2.
Fonte: Elaboração própria.

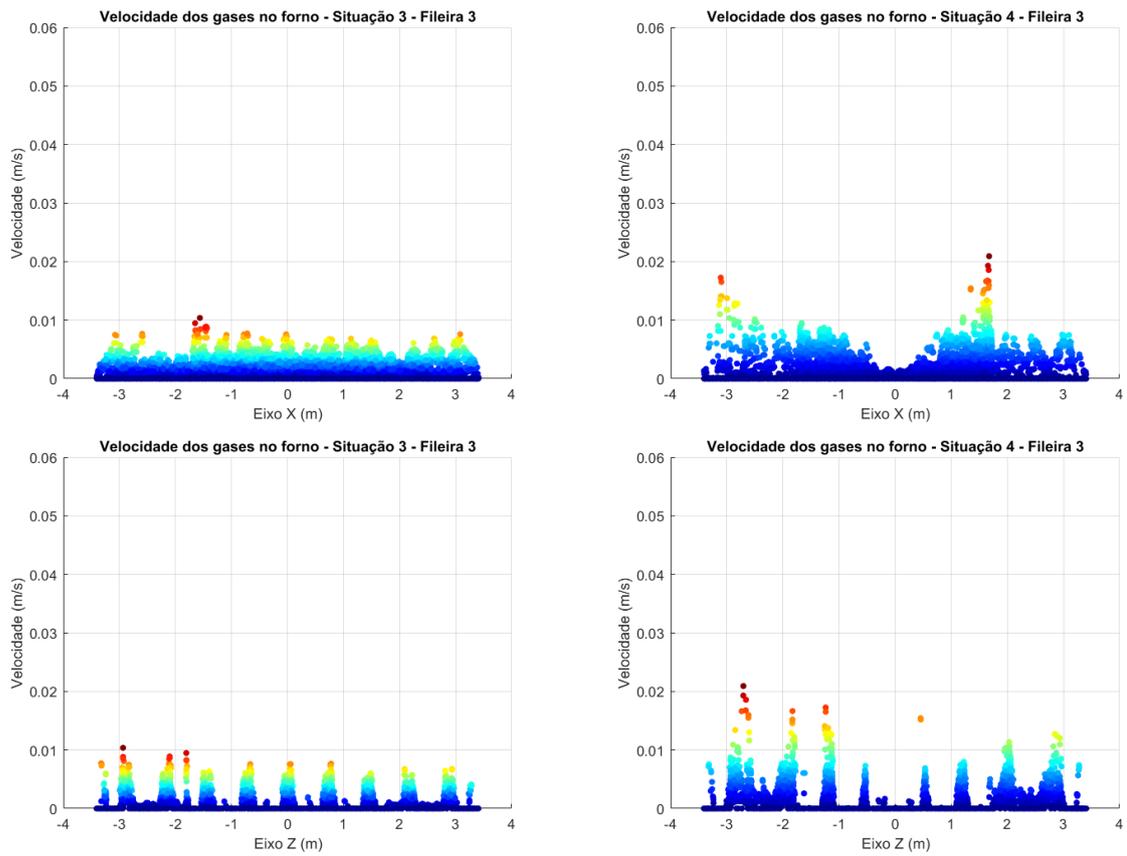
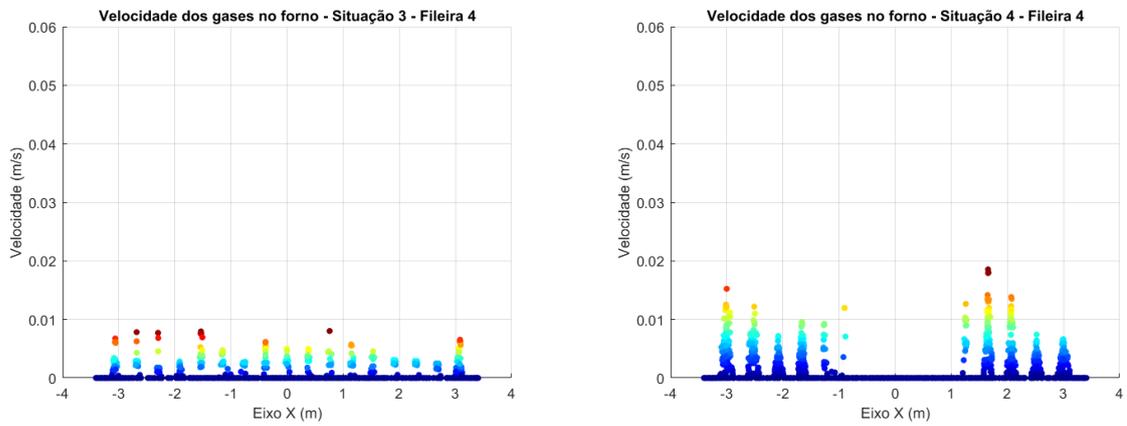


Figura 47 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças – fileira 3
 Fonte: Elaboração própria.



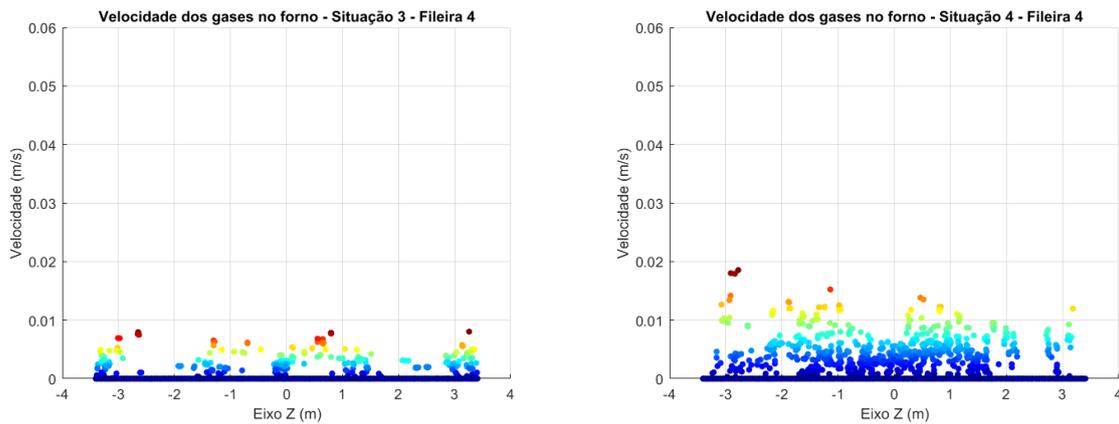


Figura 48 – Velocidade dos gases no forno carregado com os quatro tipos de peças – fileira 4.
Fonte: Elaboração própria.

4.7 Análise dos aspectos visuais e das propriedades tecnológicas das peças cerâmicas

Após a realização das simulações, amostras de tijolo maciço foram submetidas a ensaios físicos e de análise visual, e amostras de tijolo quatro furos, cobogó e canto à análise visual, conforme Seção 3.2.8. Os ensaios foram conduzidos com o forno preenchido com mais de 80% de tijolo maciço, devido à maior demanda de produção deste produto na cerâmica, o que o aproxima da configuração de carga proposta na Situação 1 (Seção 3.2.6).

A identificação das peças foi realizada por meio de uma inscrição em sua parte superior, de forma a diferenciá-las no processo de medição e, posteriormente, de comparação. Para a realização dos ensaios foram selecionadas 24 amostras de tijolo maciço, seis amostras de tijolo quatro furos, três amostras de tijolo cobogó, e seis amostras de tijolo de canto. Foram analisadas apenas três amostras de tijolo cobogó pois não havia na empresa, quando o teste foi realizado, mais peças deste tipo disponíveis para a queima (Figura 49).



(a)



(b)



Figura 49 – Amostras selecionadas para ensaio – (a) maciço, (b) quatro furos, (c) cobogó, (d) tijolo de canto.

Fonte: Autora (2020).

A disposição das amostras no forno foi realizada conforme a análise promovida na Seção 4.3, assim, os tijolos maciços foram alocados na parte superior do forno; quatro furos na parte médio-superior; cobogó na parte médio-inferior e tijolo de canto na parte inferior do forno. As amostras foram posicionadas próximo à porta do forno, de forma a facilitar a sua retirada quando a queima estivesse concluída.

A análise visual dos tijolos maciços foi realizada conforme a ABNT NBR 7170 (1983) sendo, neste caso, avaliados os seguintes aspectos: trincas, quebras, superfícies irregulares, deformações e desuniformidade de cor. Apesar de ter à disposição 24 peças de tijolo maciço, foram utilizadas apenas 20 peças neste ensaio, conforme a norma mencionada.

Como os tijolos maciços foram alocados na parte superior do forno, em muitos deles foi observada a desuniformidade de cor por estarem muito próximos às fornalhas, entretanto, apesar desta característica não ser desejável, este quesito não foi utilizado para reprovação, uma vez que as peças, apesar de mescladas, podem ser comercializadas (Figura 50). Foram observadas duas peças com trincas, sendo estas consideradas defeituosas (amostras 10 e 11). Como o número de peças defeituosas foi inferior a três, o lote foi considerado aprovado.



Figura 50 – Amostras de tijolo maciço após a queima.

Fonte: Autora (2020).

Na análise das características geométricas foram consideradas as formas e dimensões das 24 amostras de tijolos maciço. As peças foram dispostas em duas filas de 12 tijolos cada, sendo realizado o somatório das dimensões que, posteriormente, foi dividido por 24. Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos neste ensaio, bem como as dimensões nominais de acordo com a norma ABNT NBR 8041 (1983), considerando a tolerância de fabricação $\pm 3\text{mm}$ nos três parâmetros (ABNT NBR 15270-3, 2005).

Tabela 4 – Características geométricas do tijolo maciço.

Parâmetros	Dimensões nominais (mm)	Dimensões reais (mm)
comprimento (mm)	190 \pm 3	193
largura (mm)	90 \pm 3	88
altura (mm)	57 \pm 3	50

Fonte: Elaboração própria.

Conforme pode ser observado na Tabela 4, as peças apresentaram dimensões reais de comprimento e largura dentro dos limites aceitáveis pela norma, entretanto, a altura das peças encontra-se fora dos limites de aceitação. Como pode ser visto no APÊNDICE C, mesmo antes da peça ser queimada, as dimensões de altura da peça já estavam inferiores aos da norma, evidenciando que esta alteração não ocorreu devido ao processo de queima.

Para o ensaio de retração linear de queima, foram consideradas as dimensões das 24 amostras de tijolo maciço antes e após a queima, conforme a norma ABNT MB 305 (1987). No APÊNDICE C são apresentados os valores de comprimento, largura e altura das peças, bem como os correspondentes valores de retração linear. O valor médio de retração linear das peças situou-se em torno de 1,35%, evidenciando que não houve uma alteração significativa nas dimensões das peças, quando seu posicionamento foi realizado na parte superior do forno.

No ensaio de absorção de água foi utilizada a norma ABNT NBR 15270-3 (2005), sendo este realizado com seis amostras, que foram pesadas e, posteriormente, imersas em um recipiente com água por 24 horas. Decorrido este tempo, as peças foram retiradas e colocadas na posição vertical para que o excesso de água escorresse. Também foi utilizado um pano limpo para a retirada da água remanescente. Em seguida, procedeu-se a medição do peso da peça para o cálculo do nível de absorção de água. Os dados obtidos neste ensaio podem ser visualizados no APÊNDICE C. O nível de absorção médio das peças situou-se em 20,24%, dentro dos limites previstos pela norma ABNT NBR 15270-3 (2005), que é de 8% a 22%.

Em relação às demais peças, foi apenas analisado o aspecto visual, sendo observado se o posicionamento das peças sugeridos na Seção 4.3 seriam adequados. Notou-se que, de forma geral, a queima das peças foi satisfatória. Em algumas peças foi percebido o aspecto rosado, demonstrando que o calor fornecido pelo forno não foi suficiente para a queima. Na Figura 51 é possível observar os resultados de queima das peças mencionadas.



(a)



(b)



(c)

Figura 51 – Amostras de tijolo após a queima – (a) quatro furos, (b) cobogó, (c) tijolo de canto.
Fonte: Autora (2020).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No processo de fabricação de produtos cerâmicos a etapa de queima é considerada crítica, uma vez que é responsável pela determinação das características finais do produto, além de contribuir, de forma significativa, pelos custos de produção e pela emissão de poluentes na atmosfera. Nesse contexto, nesta pesquisa foi discutida melhorias nesta etapa, sendo avaliados, através de simulações, os perfis de temperatura das peças cerâmicas e o fluxo de gases no forno quando diferentes organizações da carga foram propostas. O aspecto visual das peças e as propriedades tecnológicas também foram analisados com o intuito de verificar se a configuração de carga proposta foi adequada.

Observou-se, a partir das simulações que, quanto menor a relação entre a área superficial da peça e seu volume, maior será a quantidade de calor necessária para a sua queima. Este resultado foi utilizado para determinar a melhor posição das peças no forno no sentido vertical, uma vez que este, por ser do tipo intermitente, chama invertida, apresenta temperaturas maiores na parte superior e menores na parte inferior. Assim, para uma melhor transferência de calor, peças com maior relação área/volume foram posicionadas na parte inferior do forno, e com menor relação área/volume na parte superior.

Além disso, a estrutura física do forno estudado favorece a passagem dos gases pela região central devido à disposição das fornalhas e dos dutos subterrâneos. Desta forma, o espaçamento entre as peças também foi considerado na proposição das organizações de carga, sendo este menor no centro e maior nas laterais do forno. Observou-se que a alteração no espaçamento entre as peças contribuiu para uma melhor distribuição dos gases no forno, favorecendo os processos de transferência de calor em seu interior.

Para avaliar se a organização das peças, no sentido vertical, estava adequada foram avaliados os aspectos visuais e as propriedades tecnológicas das peças. Observou-se que o posicionamento das peças proposto foi adequado, sendo as características físicas e estéticas das peças situadas dentro dos limites de aceitação pelas normas técnicas.

As melhorias propostas na organização das peças têm potencial para melhorar a eficiência energética do processo de queima, bem como para elevar a qualidade final dos produtos e a receita da empresa, contribuindo para o aumento da competitividade entre as empresas do segmento de cerâmica vermelha.

A partir dos resultados deste estudo, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros: levantamento de dados de forma empírica das propriedades (condutividade, densidade e calor específico); uso da versão comercial dos *softwares* de simulação *ANSYS Transient*

Thermal e *ANSYS Fluent*, uma vez que a versão estudantil possui limitação no número de elementos; proposição de novas configurações de carga, e posterior comparação dos resultados obtidos por simulações com os dados reais; alteração da geometria do forno, tais como, disposição das fornalhas e dos dutos subterrâneos, e posterior avaliação do fluxo de gases no interior do forno nestas condições.

REFERÊNCIAS

ABCERAM. **Informações Técnicas**, 2018. Disponível em: <https://abceram.org.br/>. Acesso em: 24 out. 2019.

ABDI. **Estudo Técnico Setorial da Cerâmica Vermelha. Subsídios para a Elaboração do Plano de Desenvolvimento Sustentável da Cadeia Produtiva de Cerâmica Vermelha**. Brasília, 2016. Disponível em: https://old.abdi.com.br/Estudo/05prova_p%C3%A1gina%20%C3%BAnica%20-%20Cer%C3%A2mica%20Vermelha.pdf. Acesso em: 27 nov. 2018.

ABNT MB 305. **Argila, argamassas, concreto e cimento refratário determinação da retratação linear, após secagem**. 1987.

ABNT NBR 7170. **Tijolo maciço cerâmico para alvenaria**. Rio de Janeiro. 1983.

ABNT NBR 8041. **Tijolo maciço cerâmico para alvenaria - Forma e dimensões - Padronização**. 1983.

ABNT NBR 15270-3. **Componentes cerâmicos parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro. 2005.

ALEXANDRE, J. **Análise de matéria-prima e composições de massa utilizada em cerâmicas vermelhas**. 2000. 188f. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia com ênfase em Geotecnia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2000. Disponível em: http://www.uenf.br/Uenf/Downloads/POS-ENGPRODUCAO_2397_1189799457.pdf.

AMELOTI, G. B.; CARVALHO, S. R. Simulação numérica do processo de aquecimento e dinâmica dos gases no interior de um forno industrial. **Horizonte Científico**, v. 6, n. 1, 2012. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/14672>.

ANICER. **Relatório Anual**. 2015. Disponível em: https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2016/11/relatorio_2015.pdf. Acesso em: 24 out. 2018.

ANICER. **Dados do Setor**, 2018. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/>. Acesso em: 24 out. 2018

ANSYS. **ANSYS Fluent Theory Guide**, 2019a.

ANSYS. **Transient Thermal Analysis**. Disponível em: https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v194/wb_sim/ds_transient_thermal_analysis_type.html. Acesso em: 29 out. 2019b.

ATHAYDE, M. **Modelamento Fluidodinâmico da Zona de Queima de Fornos de Grelha Móvel para Pelotização de Minério de Ferro**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1117M.PDF>.

AZEVEDO, N. T. **Reaproveitamento energético em forno intermitente na indústria cerâmica vermelha**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Macaé, 2017.

BAPTISTA JR., I. P. **Modelagem Térmica de Modelo Reduzido de Pequena Central Hidrelétrica (PCH)**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. **Revista Matéria**, v. 14, n. 4, p. 1088-1100, 2009.

BERGMAN, T. L. *et al.* **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2011.

BERNI, M. D.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. **Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório setorial: setor cerâmico**. Brasília: CNI, 2010.

BRAGA, W. A.; SANTOS, M. W. L. C.; SALES, J. C. Qualidade na Indústria de Cerâmica Vermelha: Medidas e Alternativas para o Controle Dimensional. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 5-6, p. 40-43, 2016. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/doi/10.4322/cerind.2016.031>.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAMARA, V. F. *et al.* Levantamento das emissões atmosféricas da indústria da cerâmica vermelha no sul do estado de Santa Catarina, Brasil. **Cerâmica**, v. 61, p. 213-218, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v61n358/0366-6913-ce-61-358-00213.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2019.

CAVALCANTI, D. E. S. **Estudo Fluidodinâmico Computacional de um Forno Piloto Rotativo Contínuo a Gás Natural para Produção de Gesso Beta**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10340>. Acesso em: 21 jul. 2019.

CBIC. **Banco de Dados - PIB 2016**. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/home/pib-2016>. Acesso em: 29 out. 2019.

DADAM, A. P. *et al.* Instrumentação e medição de temperaturas em uma carga de tijolos no interior de um forno túnel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 48., 2004, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2004.

DADAM, A. P. **Análise Térmica de um Forno Túnel Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102363>. Acesso em: 05 jul. 2019.

DUTRA, R. P. S. **Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica vermelha**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) -

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/12870>.

FIEMG; FEAM. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <http://www.sindicermg.com.br/estudante/GuiaAmbientaCeramicaVermelha.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2019.

FRANCHI, C. M. **Instrumentação de Processos Industriais: princípios e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015.

GASCH, J. G. M. Controle e Automação na Indústria Cerâmica: Evolução e Perspectivas. **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 3, p. 15–26, 2007. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876572f7f8c9d6e028b471a>. Acesso em: 07 maio 2019.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRIGOLETTI, G. C.; SATTLER, M. A. Estratégias ambientais para indústrias de cerâmica vermelha do Estado do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, v. 3, n. 3, p. 19–32, 2003. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3492>. Acesso em: 07 maio 2019.

HASSAN, A.; HAMED, M. S. Optimization of Energy Utilization and Productivity of Heat Treating Batch-Type Furnaces. **Journal of ASTM International**, v. 5, n. 1, 2008.

HENRIQUES JR, M. F.; RODRIGUES, J. A. **Cerâmica Vermelha - Projeto EELA no Brasil**. Rio de Janeiro: INT/MCTIC, 2017.

HOTZA, D. Etimologia e Uso em Diferentes Línguas de Alguns Termos Técnicos Empregados na Fabricação Cerâmica Tradicional. **Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 4, p. 17–21, 2007.

INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ISHIDA, H. K. *et al.* **Análise da Eficiência Energética em Segmentos Industriais Selecionados. Segmento Cerâmica**. Qualitec-Appplus, 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36144/472854/Produto+6.pdf>. Acesso em: 07 maio 2019.

JAHN, T. G. **Levantamento de Dados Experimentais e Simulação Térmica de um Forno a Rolos a Gás Natural**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/89606>. Acesso em: 19 jul. 2019.

JEONG, W.; SEONG, J. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 78, p. 19–26, 2014.

- KAWAGUTI, W. M. *et al.* Análise numérica e experimental de um forno intermitente para a queima de produtos cerâmicos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS*. 2. 2003, Rio de Janeiro.
- KAWAGUTI, W. M. **Estudo do Comportamento Térmico de Fornos Intermitentes tipo “paulistinha” utilizados na Indústria de Cerâmica Vermelha**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/101786>. Acesso em: 07 maio 2019.
- KOHL, C. A.; MEDTLER, M. B.; SANTOS, V. S. A importância do ciclo da queima nas propriedades mecânicas e físicas da cerâmica vermelha. **Revista Tempo Técnico**, v. 4, n. 4, p. 06–20, 2015.
- KUMAR, A. **CFD Modeling of Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed**. Department of Chemical Engineering National Institute of Technology. 2008.
- LEHMKUHL, W. A. **Análise Numérica e Experimental de um Secador Contínuo tipo Túnel utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87792>. Acesso em: 07 maio 2019.
- LIMA, W. M. P. B. **Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: Modelagem e simulação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/371>.
- LIMA, Y. R. S. **Sistema de Controle de Alimentação para Fornos Intermitentes em Indústria de Cerâmica Vermelha**. 2018. Dissertação (Mestrado em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2018.
- MARTÍN, F. L. Processos Produtivos em Revestimentos Cerâmicos: Variáveis de Processo e Possíveis Causas de Defeitos. **Cerâmica Industrial**, v. 9, n. 5–6, p. 7–20, 2004.
- MARTINS, I. O. **Modelagem da Secagem Convectiva em Contracorrente de Cerâmicas Vermelhas: Aspectos fenomenológicos e de consumo de energia**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/175075>. Acesso em: 14 jul. 2019.
- MESSIAS, L. S. Recuperação de Gases Quentes em Fornos Intermitentes. Aplicação na Indústria de Cerâmica Industrial. **Cerâmica Industrial**, v. 1, n. 2, p. 31–37, 1996.
- MINEROPAR. **A preparação de argilas para a produção de telhas e blocos cerâmicos**. Curitiba: MINEROPAR, 2007. Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/Prepara_Argilas_Producao_Telhas_Blocos_Ceramicos_2007.pdf. Acesso em: 07 maio 2019.
- MME. **Perfil de argilas para Cerâmica Vermelha**. J Mendo Consultoria, 2009. Disponível em:

http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P23_RT32_Perfil_da_Argila.pdf/b6fc71dc-3c0a-4eb1-b2a5-df62b2c3bec0. Acesso em: 07 maio 2019.

MME. **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos**, 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732813/ANU%C3%81RIO+N%C3%83O-METALICOS+2018+21.08.2018.pdf/62490d76-b923-4592-98a7-10e2bd98279b>. Acesso em: 07 maio 2019.

NERY, G. G. **Estudo do desempenho térmico de fornos catenários para queima de cerâmica artesanal**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2010. Disponível em: https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/mestradoenergia/Dissertacoes/2008/Gustavo_Nery.pdf. Acesso em: 14 jul. 2019.

NICOLAU, V. P. A Importância da Curva de Queima em Fornos Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 17, n. 2, p. 28–31, 2012.

NICOLAU, V. P.; DADAM, A. P. Numerical and experimental thermal analysis of a tunnel kiln used in ceramic production. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 31, n. 4, p. 297–304, 2009.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2015.

PEIRÓ, J.; SHERWIN, S. J. (PDF) Finite Difference, Finite Element and Finite Volume Methods for Partial Differential Equations. **Handbook of Materials Modeling**, v. 1, p. 1–32, 2005.

PINHEIRO, P. C. DA C.; VALLE, R. M. Controle de Combustão: Otimização do Excesso de Ar. *In*: CONGRESSO DE EQUIPAMENTOS E AUTOMAÇÃO DA INDÚSTRIA QUÍMICA E PETROQUÍMICA. 2. 1995, Rio de Janeiro: **Anais...** Automação Industrial São Paulo: ABIQUIM, 1995. Disponível em: <http://www.geocities.ws/paulocpinheiro/papers/excesso.pdf>. Acesso em 07 maio 2019.

PINTO, M. F.; SOUSA, S. J. G.; HOLANDA, J. N. F. Efeito do ciclo de queima sobre as propriedades tecnológicas de uma massa cerâmica vermelha para revestimento poroso. **Cerâmica**, v. 51, p. 225–229, 2005.

RAMOS, I. DE S.; ALVES, M. DA G.; ALEXANDRE, J. Diagnóstico do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes - RJ. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 1, p. 28–32, 2006.

RIBEIRO, A. P. *et al.* Desenvolvimento de massa cerâmica com argilas de Campos dos Goytacazes e Itaboraí. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. 56. 2012, Curitiba.

ROCHA, A. F.; PALMA, M. A. M. Gestão da inovação e capacidade competitiva: uma análise não paramétrica no setor cerâmico de Campos dos Goytacazes, RJ. **Cerâmica**, v. 58, p. 244–252, 2012.

SANTOS, G. M. D. **Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/81583>. Acesso em: 14 jul. 2019.

SCHULLER, D.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência de defeitos e diferentes processos de fabricação nas propriedades mecânicas finais de cerâmicas. **Cerâmica**, v. 54, p. 435–442, 2008.

SEBASTIÃO, R. B.; FERNANDES, P.; NANDI, V. S. Melhoria da Eficiência Energética de um Forno Cerâmico Através da Troca de Queimadores. **Cerâmica Industrial**, v. 18, n. 3, p. 24–30, 2013.

SEBRAE. **Indústria de Cerâmica. Ideias de Negócios Sustentáveis**. 2012. Disponível em: <http://extranet2.pr.sebrae.com.br/portal/sustentabilidade/Ind%C3%BAstria%20de%20Cer%C3%A2mica.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2019.

SEBRAE. **Boletim de Inteligência**. 2015. Disponível em: [http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/\\$File/5846.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf). Acesso em: 05 jul. 2019.

SEBRAE; ESPM. **Estudos de Mercado: Relatório Completo**. 2008. Disponível em: <http://www.sebraemercados.com.br/wp-content/uploads/2015/09/ESTUDO-CERAMICA-VERMELHA.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2019.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

TAGLIAFICO, L. A.; SENAREGA, M. A simulation code for batch heat treatments. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 43, n. 5, p. 509–517, maio 2004.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F. DE; PINATTI, D. G. Characterization of red ceramic body used in the production of bricks in the region of Campos dos Goytacazes - RJ. **Cerâmica**, v. 46, n. 297, p. 14–17, 2000.

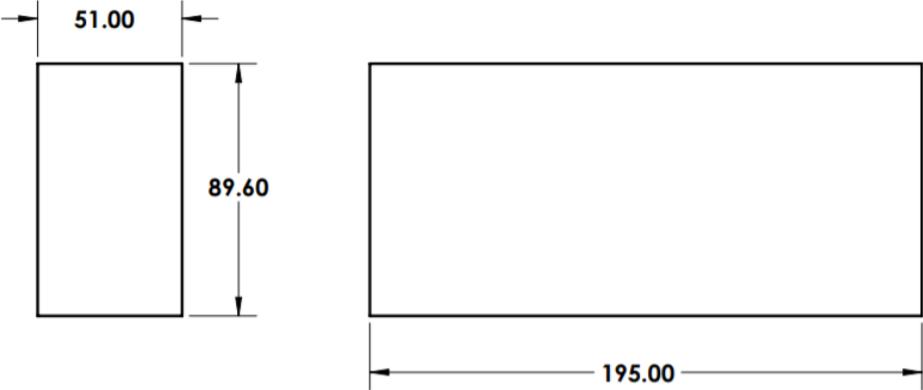
APÊNDICE A

Tabela A1 – Curvas de temperatura do forno

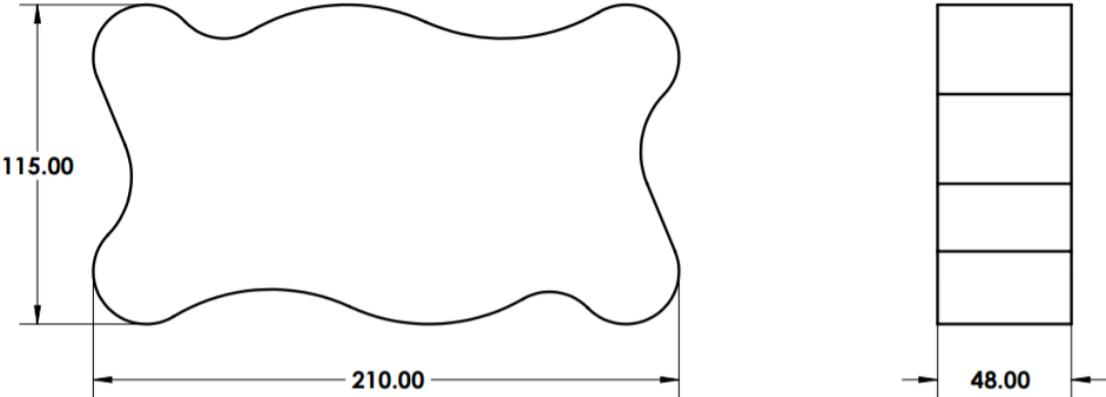
Tempo		Temperaturas (°C)		
Horas	Segundos	M4 (Baixo)	M (Meio)	C (Alto)
0	0	115	150	150
2	7200	115	145	160
4	14400	110	150	170
6	21600	105	160	180
8	28800	110	165	190
11	39600	110	170	215
13.5	48600	110	175	260
16.5	59400	115	185	300
19.5	70200	125	190	350
23	82800	140	220	390
25.5	91800	145	240	425
28	100800	160	270	465
30	108000	180	290	500
32	115200	195	310	515
35	126000	225	345	540
37	133200	240	370	560
39.5	142200	255	390	590
41.5	149400	265	410	605
44	158400	280	425	625
46	165600	295	435	650
48	172800	310	445	670
51	183600	335	460	715
54	194400	360	475	765
57	205200	365	485	805
60	216000	380	495	820
63	226800	340	505	840
65.5	235800	400	530	845
69	248400	415	575	855
72	259200	435	645	845
76.5	275400	450	715	840
79.5	286200	470	755	840
83	298800	490	775	840
86.5	311400	500	795	845
90	324000	535	800	845
95	342000	580	810	840
105	378000	575	810	850
107	385200	585	810	850
109	392400	590	805	860
111	399600	600	810	850

APÊNDICE B

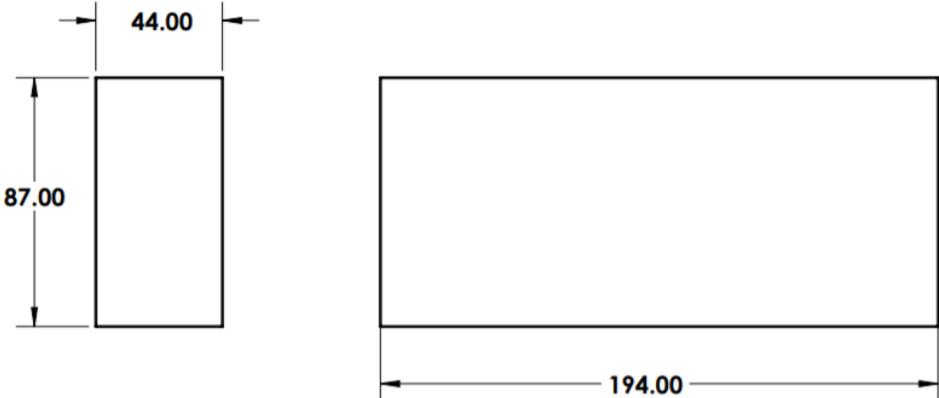
Maciço



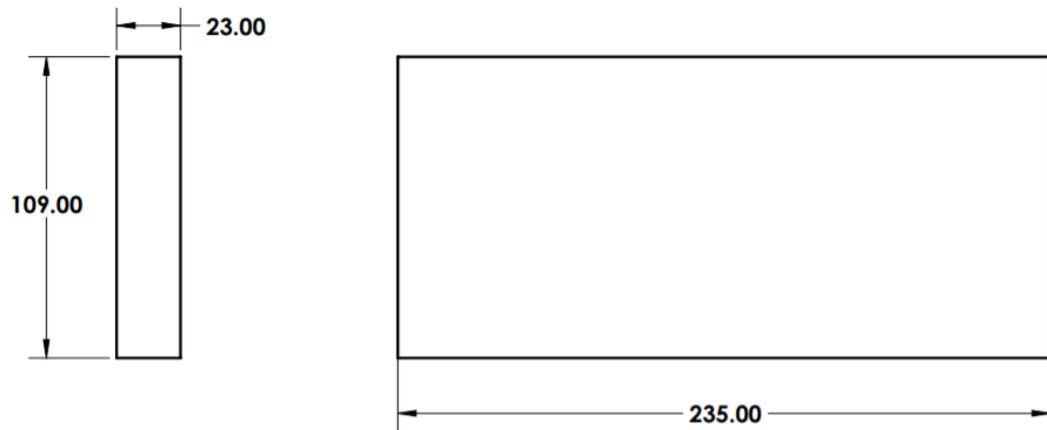
Adoquim



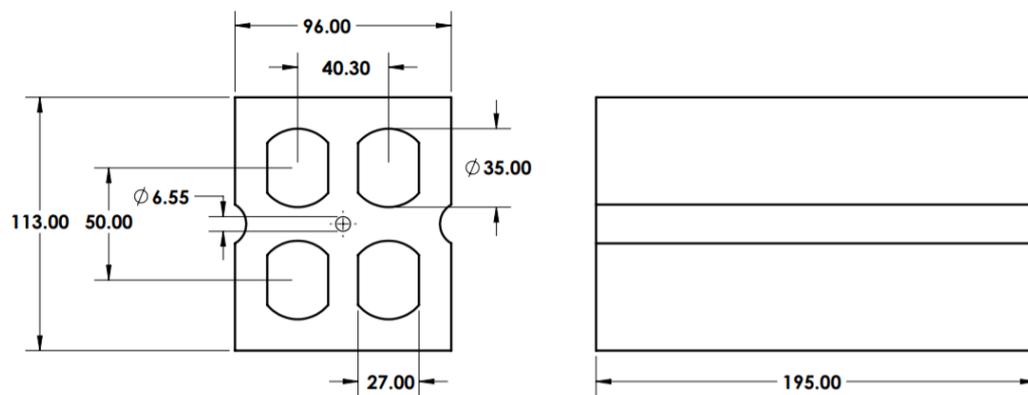
Maciço rústico 1



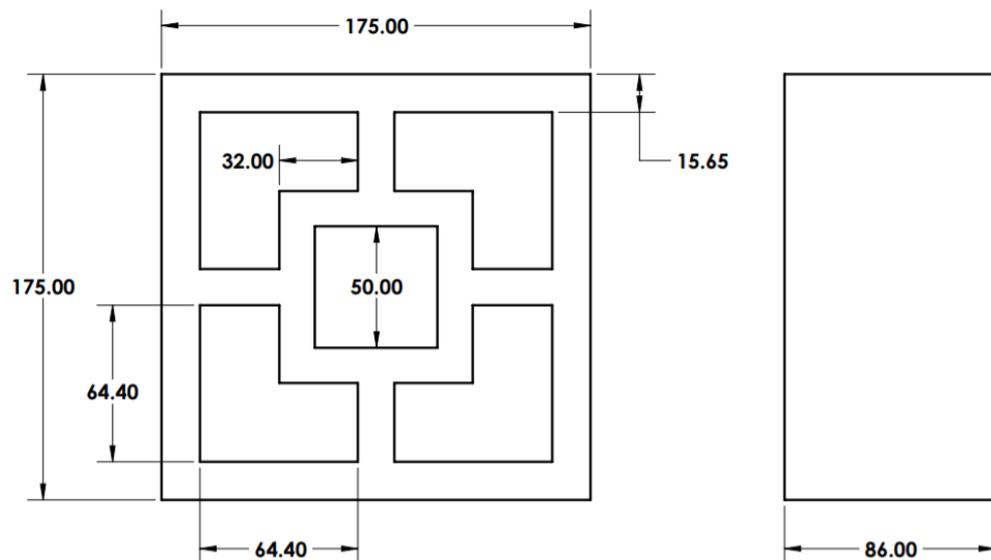
Maciço rústico 2



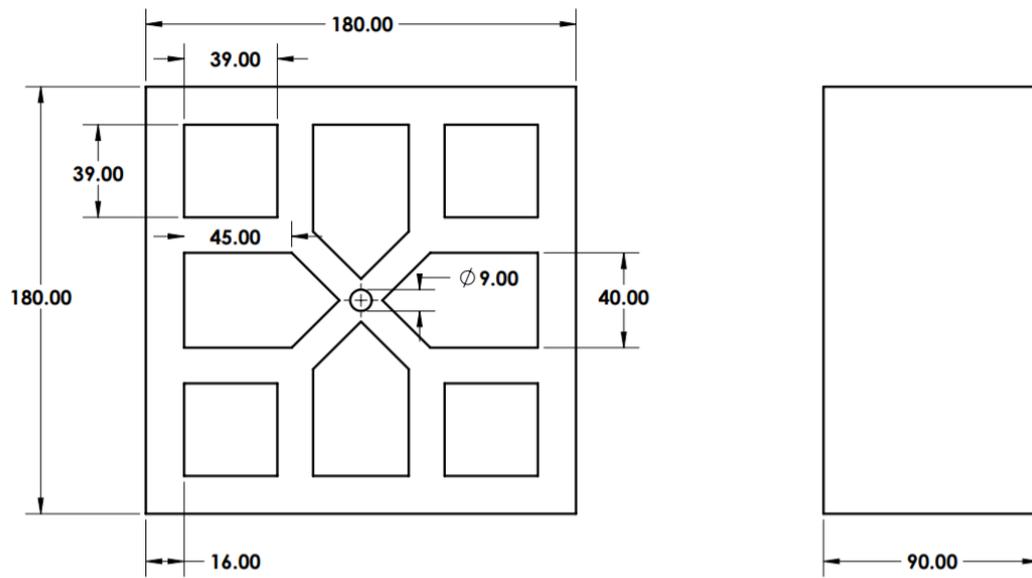
Quatro furos



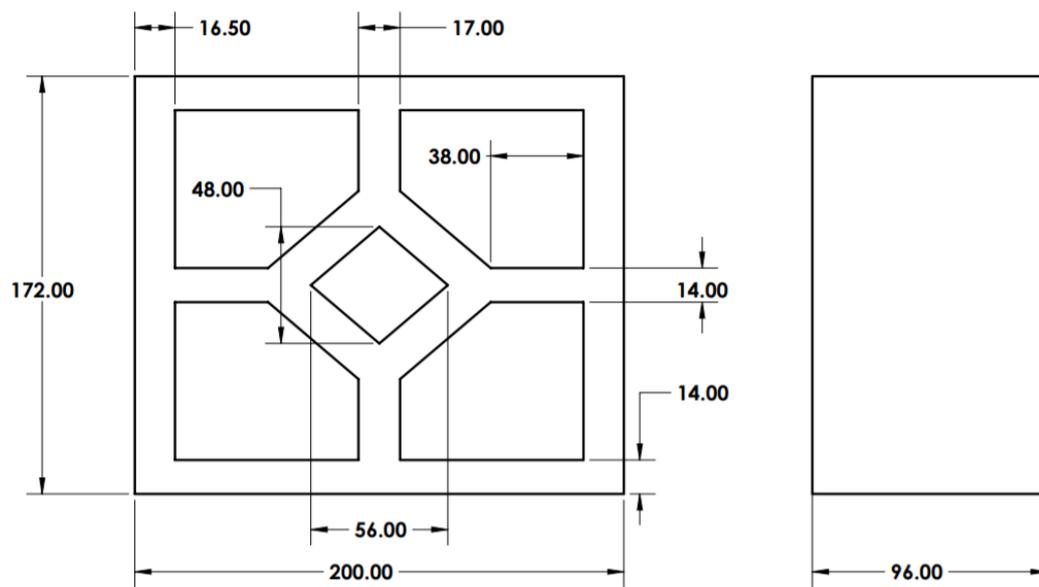
Cobogó 1



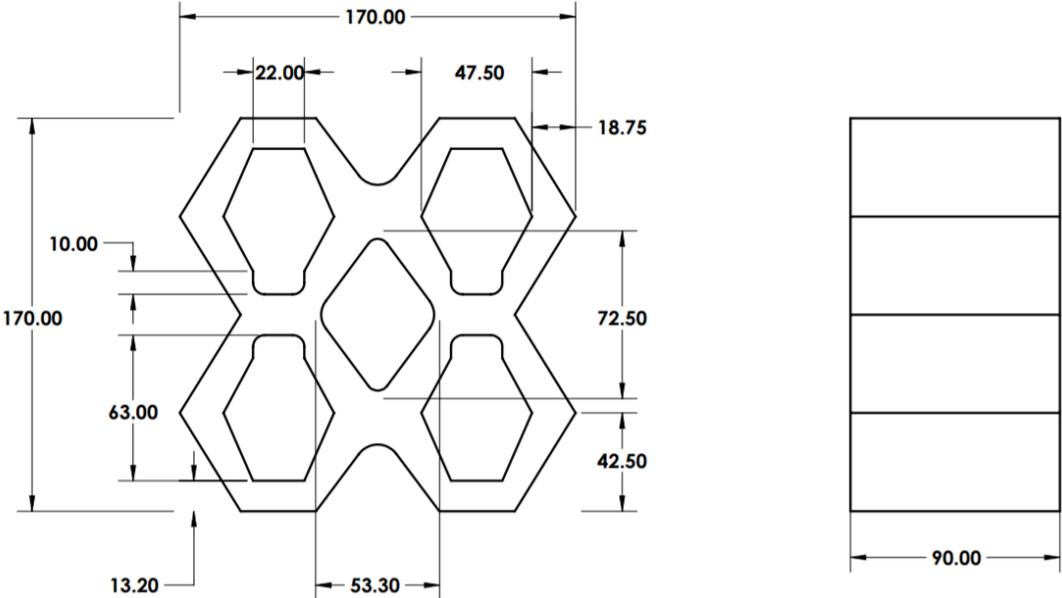
Cobogó 2



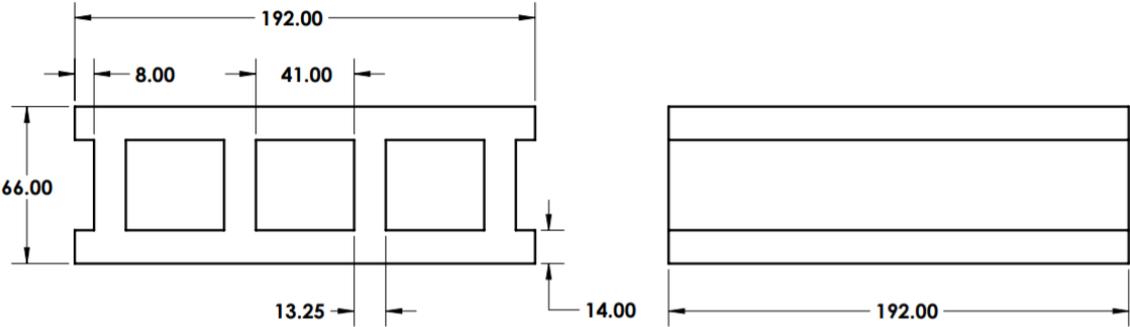
Cobogó 3



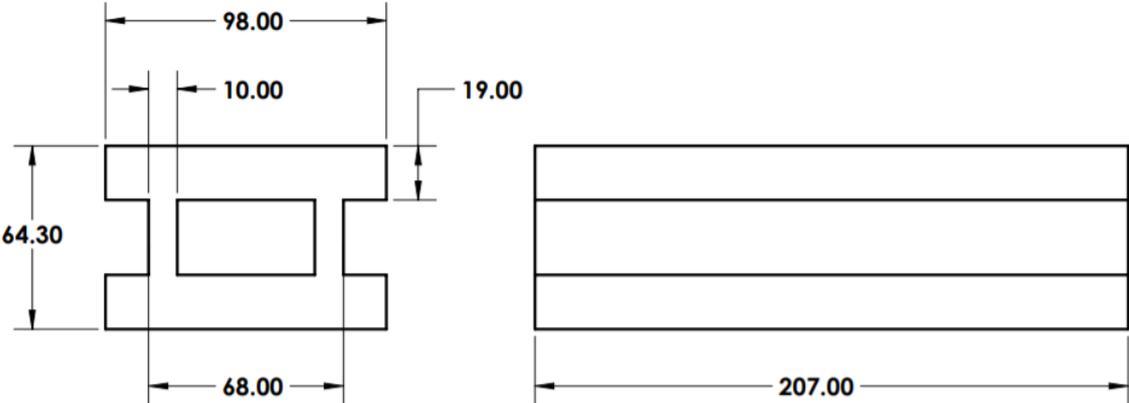
Cobogó 4



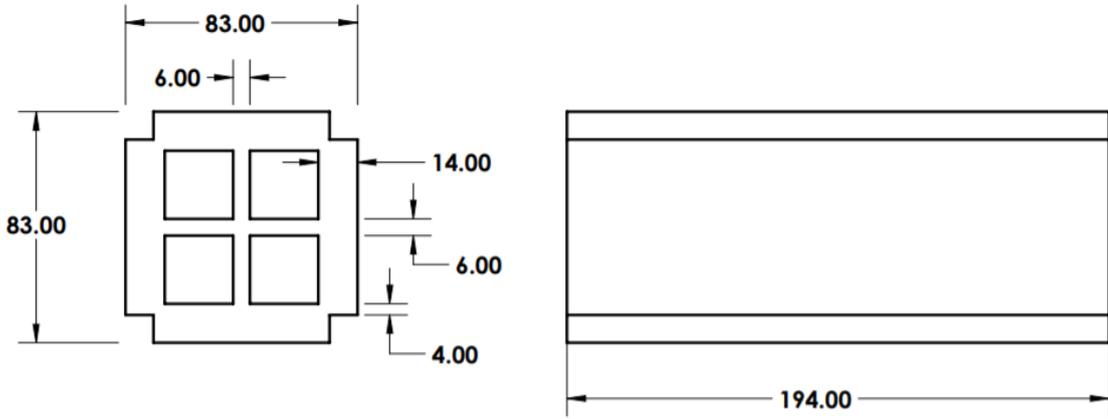
Ladrilho 1



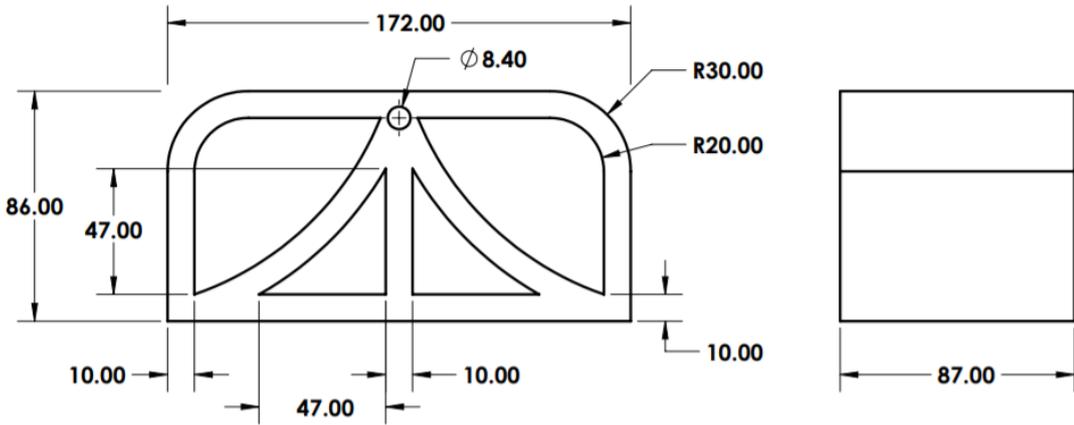
Ladrilho 2



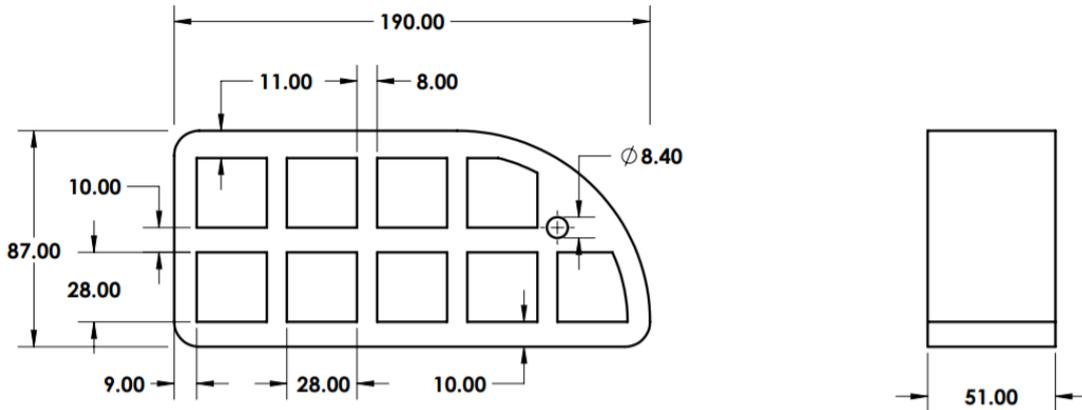
Plaqueta



Meio cobogó



Tijolo de canto



APÊNDICE C

Tabela C1 – Retração linear dos corpos de prova

CP	Comprimento (mm)		Largura (mm)		Altura (mm)		RL (%)
	Seco	Queima	Seco	Queima	Seco	Queima	
A1	198	195,5	90	88,3	51,8	50	1,263%
A2	197,5	194	90	88	52	49,8	1,772%
A3	195	191	89,45	88,1	51,7	50	2,051%
A4	197,5	195	89,3	87,5	51,5	50	1,266%
A5	194	192	89,4	88,1	52	50,3	1,031%
A6	196	192	89	87,6	51,9	50,7	2,041%
A7	196	193	88,6	88	51,6	50,7	1,531%
A8	195,5	193	88,5	88	52,2	50,5	1,279%
A9	195	193	89,2	87,4	51	50,2	1,026%
A10	196	193	88,7	88	51	51	1,531%
A11	196	193	89,1	88	53,1	51,1	1,531%
A12	197	193	89	88,1	52,1	50	2,030%
A13	194	191	89,5	87,6	52,1	50,5	1,546%
A14	197	195	89,45	87,5	52,1	50	1,015%
A15	197	195	89	87,8	51,8	50,25	1,015%
A16	196	193,5	89,2	87,8	51,9	50,8	1,276%
A17	197	195	89,2	87,5	52,1	50,6	1,015%
A18	195	193	89,2	87,6	52,2	50,3	1,026%
A19	195	191	89,2	87,4	51,8	50	2,051%
A20	197	195	89,2	88	52	50,4	1,015%
A21	197	194	88,8	87	52	49,4	1,523%
A22	195	194	88,5	86,8	52,1	49,6	0,513%
A23	195	193	88,9	86,9	52,1	49,5	1,026%
A24	195	193	89	87	51,9	50,3	1,026%
						Média	1,350%

Tabela C2 – Absorção de água dos corpos de prova.

CP	massa (g)		AA (%)
	Queima	Úmido	
A1	1475	1775	20,34%
A2	1495	1790	19,73%
A3	1440	1735	20,49%
A4	1425	1715	20,35%
A5	1435	1725	20,21%
A6	1425	1715	20,35%
		Média	20,24%