

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANTÃO RODRIGO VALENTIM

**UMA METODOLOGIA BASEADA EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA
SELEÇÃO DE MATERIAIS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DE FORNOS DE
PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL**

**PONTA GROSSA
2023**

ANTÃO RODRIGO VALENTIM

**UMA METODOLOGIA BASEADA EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA
SELEÇÃO DE MATERIAIS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DE FORNOS DE
PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL**

**A methodology based on multicriteria decision analysis for the selection of
materials used in the construction of charcoal kilns.**

Tese apresentada como requisito para obtenção do
título de Doutor em Engenharia de Produção da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Aldo Braghini Junior, Dr.

Coorientador: Prof. Jhon Jairo Ramírez Behainne, Dr.

PONTA GROSSA

2023



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

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ANTAO RODRIGO VALENTIM

**UMA METODOLOGIA BASEADA EM ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE
MATERIAIS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DE FORNOS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO
VEGETAL**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 28 de Agosto de 2023

Dr. Aldo Braghini Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Antonio Carlos De Francisco, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Joao Carlos Colmenero, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Martha Andreia Brand, Doutorado - Fundação Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc)

Dr. Thiago De Paula Protasio, Doutorado - Universidade Federal Rural da Amazônia (Ufra)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 08/09/2023.

*À memória de Dorlei Gomes, Joceli Mari Valentim e
Manuel Jonaldir de Oliveira, queridos e amados tios!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por ter-me dado as condições necessárias para, em conjunto com os meus orientadores, realizarmos esta tese. Sem o seu olhar e o seu amor para comigo e, por colocar no meu caminho pessoas especiais, não teria logrado êxito nesta jornada.

À minha esposa Edwiges, que tem sido, não somente durante o tempo de execução deste trabalho, mas na caminhada da vida, uma grande companheira, deixando muitas vezes os seus projetos e sonhos em prol do nosso lar.

Ao meu filho, Gabriel, pela paciência e serenidade com relação a este período de estudo, entendendo os momentos que tive que abdicar da sua companhia, para dedicar-me aos estudos.

Ao meu pai, Luis Alberto, pelo exemplo de caráter e de homem que é para mim; e que durante uma parte deste estudo, passou por um momento delicado, lutando e vencendo um câncer. À minha mãe, Maria Conceição, por ter-me gerado, educado e, principalmente, me amado em todos os momentos da minha vida. À minha irmã, Henryethe, que nos momentos que precisei, sempre esteve ao meu lado.

Agradeço à Igreja Católica - Capela Nossa Senhora de La Salette/Paróquia Nossa Senhora de Fátima, e à Paróquia Santa Rita Cássia, onde pude reavivar a chama da fé, por meio do Acampamento e da vivência celular.

Ao CEFET/PR e a UTFPR campus Ponta Grossa, por serem fundamentais na minha carreira acadêmica, inicialmente com o curso Técnico em Mecânica, na modalidade integrada ao ensino médio, passando pelos cursos de Tecnologia Mecânica, Especialização em Gestão da Produção, Mestrado em Engenharia de Produção, e agora, Doutorado em Engenharia de Produção.

Ao IFPR, que concedeu o período de afastamento para pós-graduação. E todos os amigos que fiz nesta instituição.

Agradeço aos meus orientadores, professores Aldo Braghini Junior e Jhon Jairo Ramírez Behainne, que com muita empatia e respeito conduziram-me durante esta jornada.

“Tudo sofro para que os seus corações sejam reconfortados e que, estreitamente unidos pela caridade, sejam enriquecidos de uma plenitude de inteligência, para conhecerem o mistério de Deus, isto é, Cristo, no qual estão escondidos todos os tesouros da sabedoria e da ciência”.
(*Colossenses 2, 2-3*).

RESUMO

O carvão vegetal tem papel fundamental na siderurgia brasileira, substituindo parcialmente o carvão mineral na produção de ferro-gusa. A substituição contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Por isso, é uma vantagem competitiva na comercialização do aço. No entanto, os custos envolvidos na produção do carvão vegetal são um dos entraves para que essa substituição atinja patamares ainda mais elevados. Parte desses custos está ligada ao uso de fornos rudimentares e de baixa tecnologia que proporcionam longos ciclos de produção. O presente estudo propõe uma metodologia de seleção de materiais para a construção de fornos de carbonização a fim de contribuir para a melhoria dos resultados do processo de produção de carvão vegetal. A metodologia considera quinze Critérios de Seleção de Materiais (CSM) que avaliam aspectos técnicos, econômicos e ambientais. O método multicritério TOPSIS estendido é usado para classificar as opções de materiais. Simulação numérica e termos linguísticos *fuzzy* são empregados para determinar os valores dos CSM. As ferramentas *Quality Function Deployment* (QFD) e *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL) são usadas para determinar os pesos dos CSM. Um exemplo de aplicação é conduzido usando a metodologia proposta, e a análise de sensibilidade multivariada é utilizada para avaliar a robustez do método. Adicionalmente, uma nova configuração construtiva para fornos de carbonização, denominada configuração III, foi proposta. Onde, pelo emprego de um sistema pivotante, é possível alterar a disposição das camadas de materiais que constituem a parede do forno, na fase de aquecimento e resfriamento. Esta configuração foi avaliada pela metodologia proposta, e mostrou-se superior aos materiais comumente utilizados na construção de fornos de produção de carvão vegetal, quando os materiais aço AISI 1020 envolto com manta lã de rocha são empregados.

Palavras-chave: fornos para produção de carvão vegetal; seleção de materiais; tomada de decisão multicritério; simulação numérica; análise térmica.

ABSTRACT

Charcoal plays a fundamental role in the Brazilian steel industry, partially replacing mineral coal in pig iron production. This substitution contributes to mitigating greenhouse gas emissions, making it a competitive advantage in the steel market. However, the costs involved in charcoal production are one of the barriers preventing further increases in this substitution. Part of these costs is linked to using rudimentary and low-technology kilns that result in prolonged production cycles. This study proposes a methodology for material selection in the construction of carbonization kilns, aiming to improve the results of the charcoal production process. The methodology considers fifteen Material Selection Criteria (MSC) that evaluate technical, economic, and environmental aspects. The extended TOPSIS multicriteria method is used to rank the material options. Numerical simulation and *fuzzy* linguistic terms are employed to determine the values of MSC. The Quality Function Deployment (QFD) and Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) tools are used to determine the weights of MSC. An application example is conducted using the proposed methodology, and multivariate sensitivity analysis is used to evaluate the method's robustness. Additionally, a new constructive configuration for carbonization kilns, which utilizes materials arranged in layers, is proposed, by using a pivoting system, it is possible to change the arrangement of the layers of materials that make up the furnace wall, during the heating and cooling phase. This configuration was evaluated using the proposed methodology, and proved to be superior to the materials commonly used in the construction of charcoal production furnaces, when AISI 1020 steel materials wrapped with a rock wool blanket are used.

Keywords: kilns for charcoal; material selection; multiple attribute decision making; numerical simulation; thermal analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da tese	21
Figura 2 – Etapas do processo de produção do carvão vegetal.....	22
Figura 3 – Forno superfície (sistema forno-fornalha)	25
Figura 4 – Forno tipo rabo-quete.....	25
Figura 5 – Forno tipo terra.....	26
Figura 6 – Forno metálico tipo tambor.....	27
Figura 7 – Forno metálico DPC	28
Figura 8 – Perfil térmico do forno durante resfriamento por convecção natural	28
Figura 9 – Etapas típicas do processo de seleção de materiais.....	32
Figura 10 – Procedimentos metodológicos	37
Figura 11– Relação entre as etapas na fase de definição dos materiais	38
Figura 12 – Fluxograma do processo de triagem dos materiais utilizados na construção do forno.....	40
Figura 13 – Exemplo de configurações de materiais utilizados no projeto do forno..	41
Figura 14 – Etapas para definição dos CSM, peso valores.....	43
Figura 15 – Estrutura da matriz QFD utilizada no estudo.....	47
Figura16 – Classificação dos CSM utilizados.....	50
Figura17 – Número <i>fuzzy</i> trapezoidal.....	54
Figura18 – Variáveis linguísticas utilizadas na avaliação	55
Figura 19 – a) Perspectiva do forno, indicando o plano de corte; b) Corte com as dimensões internas do forno utilizado na aplicação	61
Figura 20– Pesos dos CSM.....	66
Figura 21 – Inserção do módulo <i>Transient Thermal</i> na área de projeto do ANSYS <i>Workbench</i>	68
Figura 22 – Modelo do forno realizado no módulo <i>Geometry</i> /ANSYS	69
Figura 23 – Exemplo de malhas empregadas no estudo: (a) parede do forno; (b) teto do forno	69
Figura 24 – Curvas da fase de aquecimento para alguns materiais utilizados na construção do forno.....	70
Figura 25 – Árvore de hierarquia utilizada nas simulações módulo <i>Thermal/Mechanical Transient</i> do ANSYS, para etapa de aquecimento.....	71

Figura 26 – Regiões de atuação das condições de contorno na fase na aquecimento	72
Figura 27 – Regiões de atuação das condições de contorno na fase de aquecimento	73
Figura 28 – Configuração do <i>Initial temperature</i> para simulação da fase de resfriamento	73
Figura 29 – Regiões selecionadas para a coleta dos resultados das simulações na fase de resfriamento.....	75
Figura 30 – Curvas da fase de resfriamento para alguns materiais utilizados na construção do forno.....	76
Figura 31 – Análise de sensibilidade CSM 1 ao CSM 7	86
Figura 32 – Análise de sensibilidade CSM 8 ao CSM 15	88
Figura 33 – a) Variação do CSM 2 de cada material em relação a I1; b) Variação do CSM 4 de cada material em relação a I1	92
Figura 34 – Etapas do Método RBS <i>Roadmap</i>	106
Figura 35 – Árvore de hierarquia modulo <i>Mechanical</i>	114
Figura 36 – Configuração da malha do modelo da parede do forno	115
Figura 37 – Comandos adicionados para gerar a malha da parede do forno.....	116
Figura 38 – Face inferior do corpo do modelo da parede do forno.....	116
Figura 39 – Configuração do <i>internal number of divisions</i> para a parede do forno .	116
Figura 40 – Configuração do <i>edge sizing</i> para malhada da parede do forno	117
Figura 41 – Malha do modelo do corpo da parede do forno.....	117
Figura 42 – Configuração da malha do modelo do teto do forno.....	118
Figura 43 – Face externa do teto do forno	119
Figura 44 – Configuração do <i>face meshing</i> para a malha do teto do forno	119
Figura 45 – Face da base do teto forno	119
Figura 46 – Configuração do <i>edge sizing</i> para o teto do forno.....	120
Figura 47 – Malha do modelo do teto do do forno.....	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Desdobramento dos RC em CSM	45
Quadro 2 – Critérios de seleção de materiais, objetivos e descrição	46
Quadro 3 – Perfis dos especialistas que realizaram o julgamento do questionário I e II	62
Quadro 4 – Critérios Condições de contorno utilizadas nas simulações na fase de aquecimento	71
Quadro 5 – Critérios Tipos de soluções utilizadas na simulação	72
Quadro 6 – Critérios Condições de contorno utilizadas nas simulações na fase de resfriamento	74
Quadro 7 – Tipos de soluções utilizadas na simulação.....	74
Quadro 8 – Julgamento dos especialistas dos CSM 10 a CSM15, utilizando termos linguísticos.....	79
Quadro 9 – Perfis dos especialistas que realizaram o julgamento do questionário III	80
Quadro 10 – Acrônico PICO.....	107
Quadro 11 – <i>Strings</i> utilizados nas buscas	108
Quadro 12 – Definição dos critérios de seleção de materiais	124
Quadro 13 – Termos linguísticos fuzzytrapezoidais	127
Quadro 14 – Definição dos CSM obtidos por termos linguísticos <i>fuzzy</i>	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis linguísticas e número <i>fuzzy</i> trapezoidal correspondente	55
Tabela 2 – Materiais e configurações utilizadas no processo de seleção	60
Tabela 3 – Matriz <i>A</i> de importância entre os RC	63
Tabela 4 – Matriz normalizada <i>X</i>	63
Tabela 5 – Matriz <i>T</i> de relação.....	64
Tabela 6 – Pesos dos RC.....	64
Tabela 7 – Matriz <i>Y</i> de relacionamento entre RC e CSM.....	65
Tabela 8 – Matriz <i>Y</i> normalizada e pesos finais dos CSM	66
Tabela 9 – Espessura dos materiais utilizados na simulação	68
Tabela 10 – Valores dos CSM - parâmetros de desempenho térmico	77
Tabela 11 – Valores dos CSM - Analíticos	78
Tabela 12 – Valores finais dos CSM 10 ao CSM 15, em números <i>fuzzy</i> trapezoidal	81
Tabela 13 – Valores finais dos CSM não numéricos	82
Tabela 14 – Matriz inicial com os valores dos CSM, pesos e objetivos	83
Tabela 15 – Ranqueamento final dos materiais que participaram do processo de seleção.....	84
Tabela 16 – Efeito do aumento do peso dos CSM na mudança de classificação do material melhor classificado	90
Tabela 17 – Resultados das buscas	109
Tabela 18 – Resultados da análise por filtro	109
Tabela 19 – Propriedades dos materiais utilizados no exemplo aplicação	112
Tabela 20 – Estatísticas das malhas para os modelos da parede e teto do forno ..	120
Tabela 21 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal - Aço AISI 1020 (M1)	130
Tabela 22 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal - Aço inoxidável AISI 316 L (M2)	130
Tabela 23 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal - Nimonic 75 (M3)	131
Tabela 24 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal - Incoloy 800 (M4).....	131

Tabela 25 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal -Tijolo maciço (argila comum) (I1).....	132
Tabela 26 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal -Tijolo refratário (I2).....	132
Tabela 27 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal – Tijolo isolante (I3)	133
Tabela 28 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal - Argamassa com cimento, areia e pedra (I4).....	133
Tabela 29 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal – Manta cerâmica (I5)	134
Tabela 30 – Conversão de termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal – Lã de rocha (I6)	134
Tabela 31 – Matriz r_{ij}	136
Tabela 32 – Matriz v_{ij}	137
Tabela 33 – Matriz PIS	138
Tabela 34 – Matriz NIS.....	139
Tabela 35 – Matriz C_i	140

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CSM	Critério de Seleção de Materiais
DEMATEL	<i>Decision Making Trial and Evaluation Laboratory</i>
ELECTRE	<i>ELimination Et Choix Traduisant la REalité</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MAUT	<i>Multi-Attribute Utility Theory</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i>
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
RC	Requisito dos Clientes
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UFRA	Universidade Federal Rural da Amazônia
UFSC-	Universidade Federal de Santa Catarina
UFT	Universidade Federal de Mato Grosso
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VIKOR	<i>VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje</i>
WSM	<i>Weighted Sum Model</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	18
1.2	Justificativa.....	18
1.3	Estrutura da pesquisa.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1	Processo de produção do carvão vegetal.....	22
2.2	Fornos para produção de carvão vegetal	24
2.2.1	Resfriamento de fornos de produção de carvão vegetal	28
2.3	Seleção de materiais	30
2.4	Métodos de tomada de decisão multicritério aplicados à seleção de materiais.....	32
2.4.1	Método TOPSIS estendido.....	34
2.5	Implantação da função qualidade integrada ao MCDM.....	35
3	METODOLOGIA	37
3.1	Definição dos materiais que participarão do processo de seleção.	37
3.2	Definição dos critérios de seleção dos materiais, pesos e valores.	42
3.2.1	Definir os critérios de seleção dos materiais	43
3.2.2	Determinar os valores dos pesos dos critérios de seleção dos materiais.....	47
3.2.2.1	Determinar o grau de importância entre os RC	48
3.2.2.2	Determinar o grau de relacionamento entre os requisitos do cliente e os critérios de seleção dos materiais	49
3.2.2.3	Determinar os pesos finais dos critérios de seleção dos materiais	49
3.2.3	Determinar os valores dos critérios de seleção dos materiais.....	50
3.2.3.1	Critério de seleção de materiais – Parâmetros de desempenho térmico.....	50
3.2.3.2	Critérios de seleção de materiais– Analíticos	52
3.2.3.3	Critérios de seleção de materiais - Termos linguísticos	53
3.3	Seleção dos materiais para construção do forno.....	57
3.3.1	Ranqueamento dos materiais.....	57
3.3.2	Análise de sensibilidade	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59

4.1	Cenário para aplicação da metodologia.....	59
4.1.1	Definição dos materiais que participarão do processo de seleção	59
4.1.2	Definição dos critérios de seleção dos materiais, pesos e valores	61
4.1.2.1	Determinar os valores dos pesos dos critérios de seleção dos materiais.....	61
4.1.2.2	Determinar os valores dos critérios de seleção dos materiais	67
4.1.3	Seleção dos materiais para construção do forno	82
4.1.3.1	Ranqueamento dos materiais.....	82
4.1.3.2	Análise de sensibilidade	85
4.1.4	Avaliação da utilização da configuração III em fornos de produção de carvão vegetal	91
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS.....	96
	APÊNDICE A - Revisão Bibliográfica Sistemática.....	105
	APÊNDICE B - Propriedades dos materiais utilizados no exemplo de aplicação.....	111
	APÊNDICE C - Etapas para construção das malhas dos modelos utilizados no exemplo de aplicação.....	113
	APÊNDICE D - Questionários I e II -Determinação dos pesos dos critérios de seleção de materiais	121
	APÊNDICE E - Questionário III - Determinação dos Critérios de Seleção não numéricos	126
	APÊNDICE F - Tabelas com as conversações dos termos linguísticos para números <i>fuzzy</i> trapezoidal para os materiais utilizados no exemplo de aplicação	129
	APÊNDICE G - Etapas do processo de ranqueamento dos materiais do exemplo de aplicação	135

1 INTRODUÇÃO

De toda a madeira usada como combustível no mundo, cerca de 17% é convertida em carvão vegetal. No ano de 2021, a produção de carvão vegetal foi de aproximadamente 53,9 milhões de toneladas, das quais, quase 65% ficaram concentradas no continente africano, seguida da participação de 30% distribuída equitativamente entre a Ásia e a América Latina. Nesse cenário, o Brasil aparece como o país com a maior produção mundial de carvão vegetal, disponibilizando aproximadamente 6,3 milhões de toneladas no ano de 2021 (FAO, 2023).

O carvão vegetal é um material extremamente importante, que possui diversas aplicações. Pode ser utilizado como combustível doméstico. Como produto químico, é empregado como carvão ativado, devido ao seu alto poder de absorção; também é utilizado como fonte de carbono na produção de sulfeto e tetracloreto de carbono, cianeto, por exemplo. Na agricultura, pode ser aplicado no solo e, além disso, é uma importante fonte de bioenergia. Já na indústria, o carvão vegetal é utilizado como combustível em caldeiras e possui um papel de destaque nas indústrias de cimento, cal, cerâmica, energia térmica, metalurgia e construção civil (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019b).

No Brasil, a indústria siderúrgica apresenta como diferencial, em relação aos demais países, a utilização do carvão vegetal em substituição parcial ao carvão mineral na produção do ferro-gusa e do aço, resultando em maiores benefícios ambientais e sociais (CGEE, 2015; SANTOS *et al.*, 2017; IBÁ, 2020).

Esta substituição é vantajosa do ponto de vista ambiental, principalmente, devido ao sequestro de carbono e liberação de oxigênio, pela fotossíntese, que ocorrem nas florestas plantadas para produção do carvão vegetal. Para a produção de 1 tonelada de ferro-gusa via carvão mineral, são emitidas 1,9 toneladas de CO₂ para atmosfera e consumidas 1,3 toneladas de oxigênio, ao utilizar o carvão vegetal são sequestradas aproximadamente 1,1 toneladas de CO₂. Com geração de 164 kg de oxigênio. Isto representa um ganho ambiental de 3 toneladas de CO₂ por tonelada de ferro-gusa produzido (LOPES *et al.*, 2018). Assim, ao utilizar o carvão vegetal, a produção do aço torna-se mais sustentável e, do ponto de vista comercial, pode ser utilizado como um diferencial em relação aos produtos siderúrgicos produzidos a partir do carvão mineral (PINTO; SZKLO; RATHMANN, 2018).

O carvão vegetal apresenta outras vantagens, em relação ao carvão mineral, como menores teores de enxofre, nitrogênio, chumbo, mercúrio e cinzas; elementos que podem afetar adversamente a qualidade do aço (PELÁEZ-SAMANIEGO *et al.*, 2008; NAKAHARA *et al.*, 2015). Porém, devido as suas propriedades, como baixa densidade, baixa resistência à compressão, alta reatividade, o carvão vegetal não consegue substituir completamente o carvão mineral no processo de produção do ferro-gusa (ADAM, 2009; SUOPAJÄRVI; PONGRÁCZ; FABRITIUS, 2013).

Para produção do ferro-gusa, o carvão vegetal representa em média 40% a 50% do custo de produção (CGEE, 2015). Nesse sentido, é de extrema importância melhorar o aproveitamento dos meios de produção, o que é possível com o aumento do rendimento gravimétrico do processo de carbonização ou diminuição do tempo do ciclo de produção (MORELLO, 2015; CGEE, 2015; PINTO; SZKLO; RATHMANN, 2018). Indo na contramão disso, grande parte da sua produção ocorre em fornos de carbonização que empregam tecnologias de baixa eficiência, resultando em perdas substanciais de madeira e energia (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019b).

No Brasil, cerca de 80% da produção de carvão vegetal é realizada predominantemente em fornos do tipo “*hot-tail*” ou “*rabo-quente*” (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Estes fornos possuem baixo rendimento gravimétrico, entre 24% e 29%, com ciclo de carbonização que podem variar de 7 a 12 dias. São fornos fabricados com tijolos cerâmicos convencionais e possuem capacidade de carga entre 7 m³ a 70 m³ (CGEE, 2015). Desse modo, é preciso propor soluções sustentáveis para os desafios do setor produtivo do carvão vegetal.

Apesar da abundância de materiais existentes, poucos são os estudos que avaliaram a influência dos materiais utilizados na construção de fornos na produção de carvão vegetal (DANIEL; VANEGAS, 2018).

A seleção de material para uma finalidade específica é um fator extremamente importante para um produto cumprir os requisitos para o qual foi projetado. Neste processo, diversos critérios podem ser considerados, como por exemplo: ciclo de vida do produto, usabilidade, propriedades físico-químicas e custos.

Para dar suporte a esse processo, os métodos de tomada de decisão multicritério (*Multi-Criteria Decision Making* ou MCDM) se desenvolveram consideravelmente, tanto na teoria, quanto na prática, especialmente nas áreas de projeto e fabricação (JAHAN; EDWARDS, 2015).

Diante do exposto, visando encontrar melhores soluções para projeto e construção de fornos de produção de carvão vegetal, é importante utilizar um processo de seleção de materiais que considere diferentes critérios.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Propor uma metodologia de seleção de materiais para construção de fornos de produção de carvão vegetal baseada em análise multicritério.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar metodologias de seleção de materiais aplicadas na construção de fornos que utilizam como fonte de energia: biomassas ou carvão vegetal;
- Identificar os principais requisitos que devem ser empregados na seleção de materiais utilizados na construção de fornos de carbonização;
- Propor uma metodologia para seleção de materiais utilizados na construção de fornos de carbonização;
- Avaliar o desempenho da metodologia por meio de um exemplo de aplicação e análise de sensibilidade dos resultados obtidos.

1.2 Justificativa

Em 2015, por meio da adoção da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e o Acordo de Paris sobre mudanças climáticas, países comprometeram-se a avançar em ações para garantir um futuro mais sustentável. São acordos ousados, que exigem o comprometimento efetivo por parte dos países, organizações e da população, de modo geral (FAO, 2017).

O setor siderúrgico responde por cerca de 8% da demanda global de energia e 7% do total de emissões de gases de efeito estufa. Para que a indústria do aço siga uma trajetória compatível com as metas do Acordo de Paris, suas emissões diretas de CO₂ devem cair em pelo menos 50% até 2050 (IEA, 2020).

No Brasil, o carvão vegetal é utilizado no setor siderúrgico para substituir o carvão mineral na produção do ferro-gusa. Esta substituição é vantajosa no aspecto ambiental, pois no balanço das emissões do processo de produção do ferro-gusa, ocorre a captura de CO₂ e não há emissões de SO₂ para a atmosfera (LOPES *et al.*,

2018). Em 2022, a indústria siderúrgica brasileira produziu cerca de 7,7 milhões de toneladas de ferro-gusa utilizando o carvão vegetal, correspondendo a 24% da produção nacional (SINDIFER, 2023).

Outro benefício da substituição do carvão mineral pelo vegetal é a geração de créditos de sequestro de carbono, que podem ser transformados em commodities para futura comercialização (CHEN, 2003; NORGATE *et al.*, 2012; PELÁEZ-SAMANIEGO *et al.*, 2008)

Nessa perspectiva, para aumentar a substituição do carvão de origem mineral pelo de origem vegetal, além das vantagens ambientais apontadas, é necessário que o preço do carvão vegetal seja menor. Uma das maneiras de atingir este objetivo é reduzir os custos que envolvem o processo de produção do carvão vegetal.

No entanto, a vanguarda da tecnologia para produção de carvão vegetal pertence às grandes empresas, pois, sistemas mais modernos de carbonização necessitam de investimento inicial elevado, devido à necessidade de equipamentos de controle de processo; equipamentos periféricos, como por exemplo, bombas, compressores e trocadores de calor; e implementos para mecanização da carga e descarga do forno (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019b).

Segundo Zola (2020), as tecnologias mais modernas de carbonização, onde, geralmente, são obtidas melhoras na produtividade e na qualidade do carvão vegetal, acabam tornando-se inviáveis para grande parte dos produtores, devido aos custos de aquisição, ou então, pelos custos envolvendo a mão de obra qualificada para operação e manutenção destes sistemas.

Outro quesito que demanda atenção, pois impacta nos custos de produção do carvão vegetal, é o calor dissipado através da parede do forno para o ambiente externo durante a fase endotérmica do processo de pirólise da madeira. Nesta fase, a madeira é aquecida lentamente até temperaturas próximas a 450°C. Oliveira *et al.* (2013) destacam que, independentemente da forma de aquecimento utilizada, interna ou externa ao forno, uma quantidade de combustível será consumida (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Estudos realizados por Bustos-Vanegas *et al.* (2018), que envolveram modelagem e simulação matemática de fornos fabricados em alvenaria, destacaram que a utilização de materiais com menores valores de condutividade térmica para construção dos fornos, minimizam as perdas de energia durante a fase de

aquecimento da carbonização, mas, de modo inverso, estende o tempo de resfriamento.

Conforme apresentado, é desejável que os fornos de produção de carvão vegetal retenham calor na fase de aquecimento. Inversamente, durante a fase de resfriamento, dissipem o calor armazenado na carga de carvão e da própria estrutura do forno. Como não há materiais comercialmente conhecidos que possuam tais características, é necessário avaliar e selecionar criteriosamente os materiais empregados na construção de fornos de produção de carvão vegetal.

De modo geral, o projeto de engenharia é um processo muito complexo, envolvendo vários estágios. Além disso, no projeto de um produto várias são as restrições e requisitos que devem ser considerados, podendo estas serem conflitantes entre si. Por exemplo, funções estruturais e interações entre os componentes materiais, exercem influência no desempenho do equipamento/produto projetado. Nesse sentido, não é possível que uma única teoria, modelo ou metodologia aborde, de modo satisfatório, a seleção de materiais para projetos de engenharia (EDWARDS; DENG, 2007).

Com o objetivo de encontrar metodologias empregadas na seleção de materiais para construção de forno de produção de carvão vegetal, uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) foi realizada, empregando o *framework* método Roadmap (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011). O Apêndice A, apresenta em detalhes a aplicação da RBS.

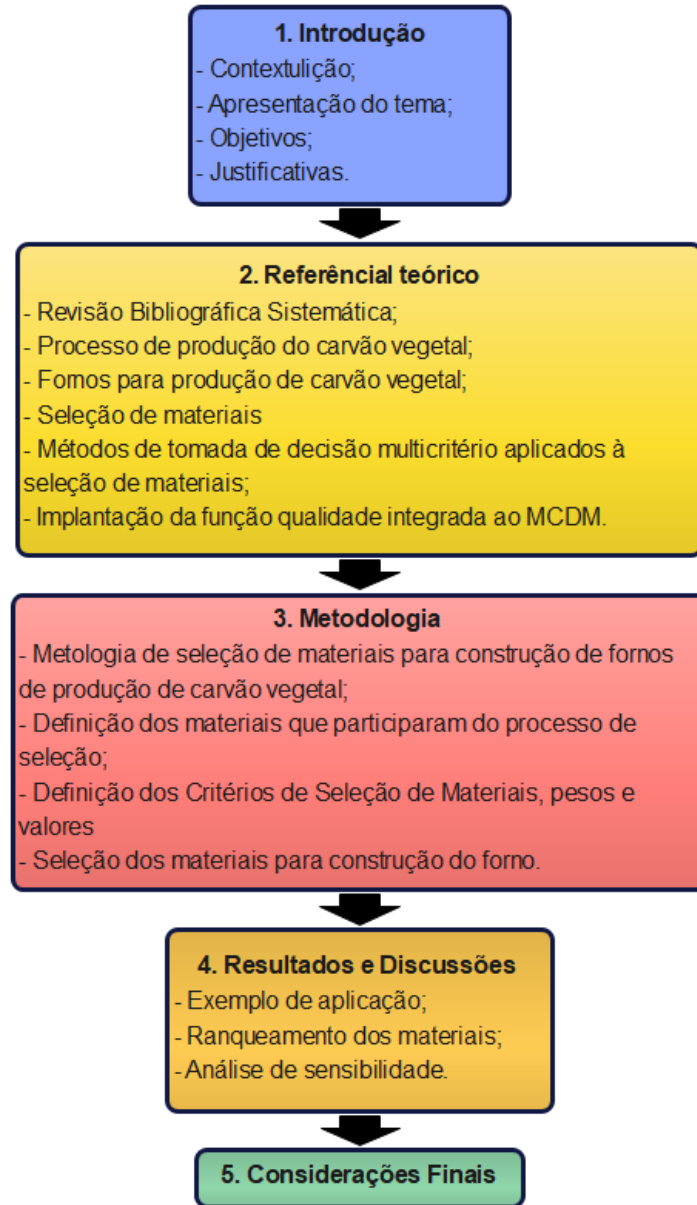
Como resultado da revisão, não foi encontrado nenhum artigo científico que abordasse a seleção de materiais para fornos de produção de carvão vegetal. Este fato dá indícios sobre o ineditismo da pesquisa proposta.

Nessa perspectiva, o presente estudo propõe uma metodologia para seleção de materiais de construção de fornos de produção de carvão vegetal, considerando parâmetros térmicos atuantes nos materiais do forno, obtidos por meio de simulação numérica, bem como critérios técnicos, econômicos e ambientais, relatados na literatura, com o propósito de contribuir com a melhoria da sustentabilidade do processo de produção do carvão vegetal.

1.3 Estrutura da pesquisa

A Figura 1 apresenta o fluxograma com a estrutura da tese.

Figura 1 – Estrutura da tese



Fonte: Autoria própria (2023)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

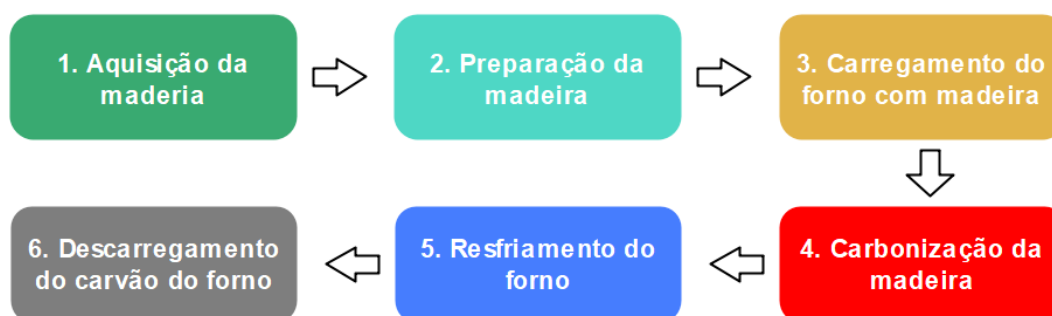
O Referencial Teórico abordou o processo produtivo do carvão vegetal e os principais fornos utilizados neste processo. Serão tratados também, os métodos de seleção de materiais e os métodos de tomada de decisão multicritério, em inglês *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM), utilizados para auxiliar o processo de seleção de materiais.

Ainda, será tratada a implementação da função qualidade nos métodos multicritérios.

2.1 Processo de produção do carvão vegetal

O processo de produção do carvão vegetal, tradicionalmente empregado nas Unidades Produtoras de Carvão (UPC), é composto das etapas apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Etapas do processo de produção do carvão vegetal



Fonte: Elaborado com base em Rodrigues e Braghini Junior (2019b); Zola et al. (2020)

Na primeira etapa, tem-se a aquisição da madeira, por meio de florestas plantadas ou proveniente do manejo florestal de mata nativa e de projetos de reflorestamento. Na segunda etapa, a madeira é seca. Para secagem da madeira no ambiente são necessários aproximadamente 120 dias. Isso contribui para um bom rendimento do processo de carbonização e a qualidade do carvão produzido. Ainda na etapa de preparação, a madeira deve ser cortada no tamanho adequado para ser acondicionada no interior do forno (BRITO, 1990).

A terceira etapa é o carregamento do forno com madeira. Sendo que este pode ser realizado de forma manual ou mecanicamente (BRITO, 1990; RODRIGUES, 2020).

A quarta etapa, processo de carbonização da madeira, inicia-se com a ignição do forno, passando pelas etapas de secagem e degradação da madeira até atingir a

temperatura final de carbonização. Nesta etapa, o controle da taxa de aquecimento do forno, comumente, é realizado por carvoeiros de forma empírica, avaliando a cor da fumaça emitida pelo processo de carbonização (ASSIS, *et al.*, 2012).

Segundo Rodrigues (2019), bons resultados, de modo a obter um carvão apto para ser utilizado no processo de produção do ferro-gusa e com bom rendimento gravimétrico, é alcançado com taxas de aquecimento menores que 1,67 °C/min. Além disso, o aumento da taxa de aquecimento favorece o aumento da friabilidade, do teor de carbono fixo e do teor de cinzas do carvão vegetal. Inversamente, diminui o rendimento, em massa, do processo de carbonização, a densidade aparente e a quantidade de material volátil (ASSIS *et al.*, 2012; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019b).

Ainda, Rodrigues e Braghini Junior (2019a) destacam que nesta etapa, a temperatura final de carbonização é um parâmetro importante do processo de produção do carvão. Semelhantemente ao ocorrido com o aumento da taxa de carbonização, o aumento da temperatura final da carbonização favorece o aumento da friabilidade, do poder calorífico, do teor de carbono fixo e do teor de cinzas do carvão produzido. Porém, o aumento da temperatura final de carbonização, resulta em uma diminuição do rendimento da produção e do conteúdo de material volátil do carvão vegetal. Boas propriedades físico-químicas do carvão vegetal para aplicação na produção do ferro-gusa e bons rendimentos de produção foram obtidos em laboratório, com temperatura final de carbonização na faixa de 450 °C.

Na etapa de aquecimento, é preciso fornecer energia ao sistema. Segundo Brito (1990), no processo de carbonização, com aquecimento interno, a energia requerida na etapa de aquecimento é obtida pela queima parcial da carga de madeira, consumindo entre 10% e 20% da biomassa colocada no forno (BRITO, 1990). Segundo Peláez-Samaniego *et al.* (2008), em forno de alvenaria, até 20% em massa da madeira é sacrificada para gerar energia para o processo, e cerca de 60% da massa da madeira é convertida em gases e vapores. Assim, quanto menor a quantidade de calor perdida para o ambiente, menor a quantidade energia/combustível consumida durante o processo de carbonização. Tal redução pode ser alcançada com a utilização de materiais isolantes.

Na quinta etapa, resfriamento do forno, ocorre o fechamento dos orifícios do forno, para impedir a entrada de ar. Na maioria dos fornos, o resfriamento é lento, podendo levar vários dias até que o interior do forno atinja a temperatura interna de

aproximadamente 50 °C, possibilitando a abertura do forno e o manuseio do carvão vegetal com segurança (OLIVEIRA *et al.*, 2013; SANGSUK; SUEBSIRI; PUAKHOM, 2018; SILVA; ATAÍDE, 2019). Nesta fase, não há a necessidade de controlar a taxa de redução da temperatura do forno. Ou seja, quanto mais rápido acontecer o resfriamento do forno, melhor, pois ocorrerá a redução do tempo total do processo (OLIVEIRA *et al.*, 2015; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019a).

Por fim, na sexta etapa, ocorre o descarregamento do carvão vegetal produzido, realizada manual ou mecanicamente (BRITO, 1990; OLIVEIRA, 2012; RODRIGUES, 2020; ZOLA *et al.*, 2020).

A quarta etapa deste processo, a carbonização da madeira, pode ser descrita em sete estágios: (i) A temperatura é elevada de 20 °C para 110 °C: a madeira absorve energia térmica e libera vapor de água; (ii) A temperatura permanecerá igual ou ligeiramente acima de 100 °C até que toda a umidade seja eliminada; (iii) A temperatura é elevada de 110 °C até 270 °C: a madeira começa a se decompor, liberando alguns gases, como monóxido de carbono e dióxido de carbono, e líquidos, como ácido acético e metanol; (iv) A temperatura é elevada de 270 °C até 290 °C; (v) As temperaturas permanecem acima de 270 °C; (vi) A temperatura é elevada de 290 °C até 400 °C: a decomposição adicional da madeira permite que vários gases sejam liberados, como monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e metano, além de vapores condensáveis, como: água, ácido acético, metanol e acetona. alcatrões de madeira começam a predominar à medida que a temperatura aumenta; (vii) Níveis de temperatura em torno de 400 °C à 600 °C: o processo de carbonização está completo, tendo o carvão como produto principal (SYRED *et al.*, 2006).

Como o tempo do ciclo do processo de carbonização é elevado, devido às necessidades acima apresentadas, atuar na redução da fase de resfriamento contribui para redução do tempo total deste processo; bem como, a utilização de métodos para evitar a perda de energia para o meio externo durante a fase de aquecimento podem contribuir para redução dos custos de produção do processo de produção do carvão vegetal.

2.2 Fornos para produção de carvão vegetal

Rodrigues e Braghin (2019b) apontam em seu estudo que, entre os anos de 1990 e 2017, no mundo, foram depositadas 172 patentes, ou pedidos de patentes, de tecnologias aplicáveis à carbonização da madeira.

Apesar deste considerável número de patentes, a maioria do carvão vegetal produzido no mundo ocorre em fornos de carbonização que empregam tecnologias, como por exemplo: forno poço, forno monte de terra, forno casamance, forno de barro, *Adam-retort*, forno “rabo-quente”, forno de encosta, forno colméia (ou circular de superfície) (Figura 3) e forno “meia-laranja” argentino (FAO, 2017; RODRIGUES, 2019).

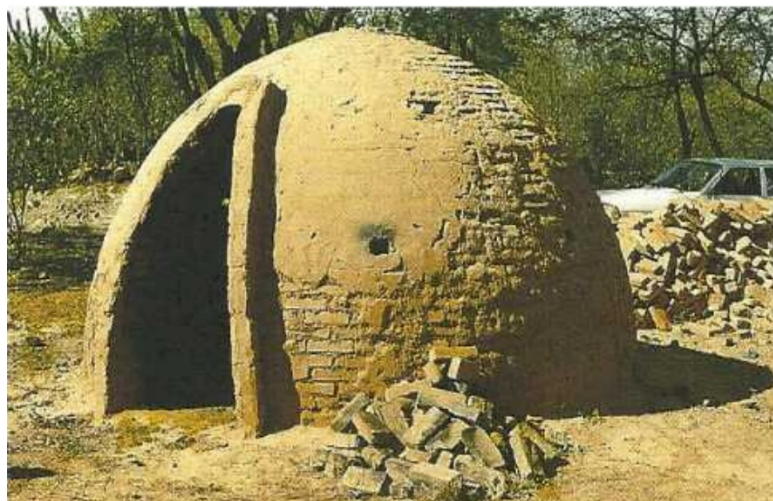
Figura 3 – Forno superfície (sistema forno-fornalha)



Fonte: Brasil (2019)

No Brasil, a produção de carvão vegetal é realizada predominantemente em fornos do tipo “rabo-quente” (Figura 4), com ciclo de carbonização que podem variar de 7 a 12 dias (CGEE, 2015). Apresentando rendimentos gravimétricos entre 20% a 27% (massa úmida), podendo variar até 27%, em decorrência do excesso de queima da madeira (LATORRE *et al.*, 2017; MENDES; GOMES; OLIVEIRA, 1982; SANTOS, 2007).

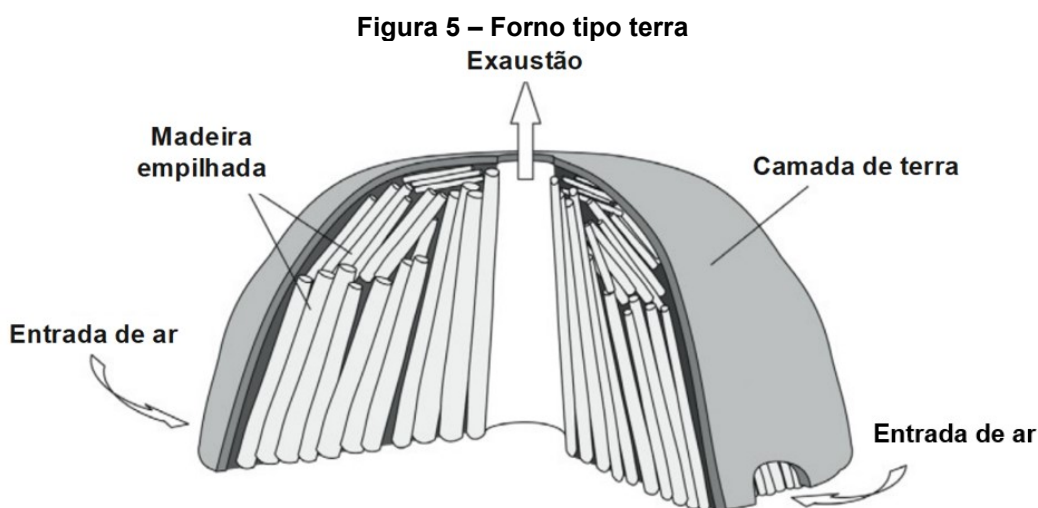
Figura 4 – Forno tipo rabo-quete



Fonte: IBAMA (1999)

Os tipos de fornos de carbonização podem ser classificados de várias formas. Em relação ao material utilizado na sua construção: i) fornos de terra; ii) fornos metálicos; iii) fornos de alvenaria; e iv) fornos de retorta, sendo este último, o menos utilizado (CGEE, 2015). Em relação ao processo de produção de carvão vegetal, pode ser classificado em: i) descontínuo (também conhecido como batelada); ii) semicontínuo; e iii) contínuo. No que se refere ao método de aquecimento do forno, podem ser categorizados em: i) pirólise por combustão parcial, onde a energia do processo é obtida pela queima de parte da carga de biomassa; ii) pirólise por injeção de um gás quente, onde a energia do processo é proveniente de gás inerte aquecido, externamente; e iii) pirólise em um reator fechado, onde a carga está encapsulada e a energia do processo é externa (FOURNIER, 2009).

Fornos tipo terra (Figura 5) e alvenaria apresentam um menor custo de construção em relação ao das outras categorias. Estes são construídos com materiais que proporcionam um melhor isolamento térmico da carga, se comparados com os fornos metálicos, por exemplo. No entanto, como o resfriamento ocorre naturalmente, somado a característica isolante dos materiais de construção do forno, a transferência de calor do interior para o exterior do sistema acaba sendo dificultada, ocasionando um resfriamento lento da massa de carvão produzido (SANTOS, 2013).



Fonte: adaptado de Ronsse, Nachenius e Prins (2015)

Fornos metálicos (Figura 6) apresentam as desvantagens de serem mais caros e de possuir menor vida útil, se comparado aos fornos do tipo terra e alvenaria (ODUOE; GITBIOMI; CHIKAMAI, 2006). Por exemplo, fornos metálicos do tipo Mark V têm vida útil que oscila entre dois e quatro anos (GIZ 2021; PINTO; SZKLO; RATHMANN, 2018; SARDINHA, 2008). No entanto, o tempo menor do ciclo de

produção dos fornos metálicos torna estes interessantes em relação aos de alvenaria (ODUOE; GITBIOMI; CHIKAMAI, 2006).

Figura 6 – Forno metálico tipo tambor



Fonte: Tintner et al. (2020)

Fornos metálicos do tipo Isomóvel, Bicarbras e VRM, consistem, basicamente, em contêineres metálicos, carregados com biomassa a ser carbonizada, e são posteriormente transportados para o interior de câmaras de combustão, fabricada em um material com característica isolante. Após a fase de aquecimento da carbonização, os recipientes metálicos são retirados das câmaras de combustão e colocados ao ar livre, visando acelerar o processo de resfriamento. Estes fornos apresentam a vantagem de possuir um melhor controle do processo de carbonização (SANTOS *et al.*, 2017; SANTOS, 2007).

No entanto, estes fornos necessitam de equipamentos periféricos para seu funcionamento, como por exemplo, sistemas de elevação de carga, trocadores de calor e sistema de exaustão. Isso torna os custos de aquisição, operação e manutenção mais elevados, se comparados aos fornos do tipo terra e alvenaria. Estes fornos possuem um tempo de vida útil de cerca de dez anos e ciclo de produção perto de 24 horas (CGEE, 2015; GARCIA-PEREZ; *et al.*, 2013; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019a, 2019b).

Outro tipo de forno metálico, o DPC possui gaiolas fabricadas em aço, as quais são carregadas com a madeira e colocadas no interior do forno, onde ocorrem as etapas de secagem, carbonização e resfriamento. Especificamente, o resfriamento

ocorre pela aspersão do vapor de água, gerado durante a secagem da madeira (Figura 7). O tempo do ciclo de produção é de 72 horas (VILELA *et al.*, 2014).

Figura 7 – Forno metálico DPC

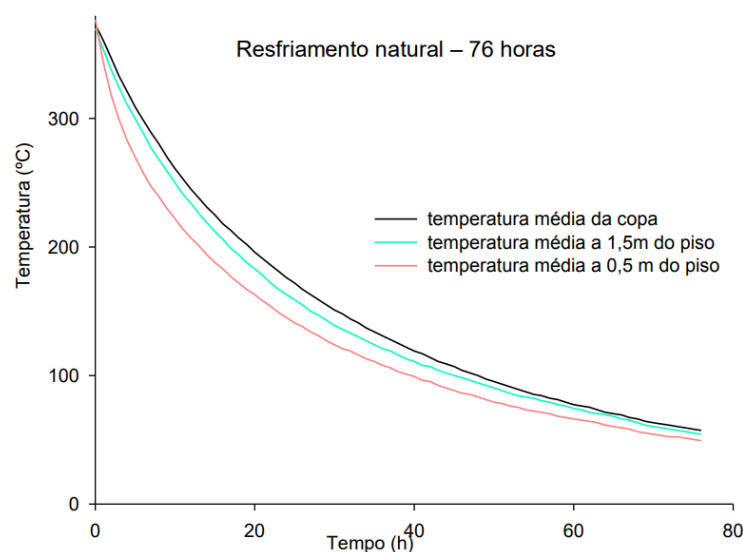


Fonte: Lúcio (2006)

2.2.1 Resfriamento de fornos de produção de carvão vegetal

O resfriamento do forno inicia-se ao final da fase de aquecimento do processo de carbonização, por volta de 450 °C. A temperatura final do processo de resfriamento está entre 40 °C a 60 °C (BRITO, 1990). A Figura 8 apresenta o perfil térmico de resfriamento de um forno retangular com capacidade para 10 estêreos de madeira durante o resfriamento natural por convecção (SANTOS, 2013).

Figura 8 – Perfil térmico do forno durante resfriamento por convecção natural



Fonte: Santos (2013)

Segundo Rodrigues e Braghini (2019b), de todas as patentes de novas tecnologias de fornos para produção de carvão vegetal encontradas em seu estudo, 37 delas propuseram a diminuição do tempo do ciclo de produção do carvão vegetal, pela diminuição do tempo de resfriamento do forno.

Segundo França e Campos (2002), o tempo da fase de resfriamento depende da geometria do forno, do material que é construído, da massa de carvão acondicionada no interior do forno e das condições climáticas do local onde o forno está instalado. Para Santos (2013), a maioria dos fornos utilizados no Brasil, apresentam uma fase de resfriamento lenta, pois empregam em sua construção materiais que contribuem para menor perda de calor para o meio externo, propriedade importante na fase de aquecimento.

Assis, *et al.* (2008) e Santos (2013), destacam que o resfriamento rápido não ocasiona grandes alterações em relação aos principais parâmetros de qualidade do carvão vegetal. Em seu estudo o parâmetro que apresentou maior variação foi a friabilidade.

Nesse sentido, algumas técnicas simples para contribuir para o resfriamento são utilizadas. Um exemplo é o barrelamento, que consiste em aspergir uma mistura de argila com água sobre a superfície externa do forno, auxiliando muito mais na vedação das possíveis trincas existentes do que efetivamente no resfriamento do forno (OLIVEIRA *et al.*, 2015; REIS, 2009).

Segundo Santos (2013), outras técnicas para resfriamento do forno, são: a adição de água no piso do forno após a carbonização e a utilização de trocadores de calor para recirculação dos gases quentes que saem do interior do forno, os quais são resfriados e retornam mais frios para o interior do forno.

Segundo Rodrigues e Braghin Junior (2019b), vários estudos estão sendo desenvolvidos buscando meios alternativos para o resfriamento artificial, com o propósito de reduzir o tempo da fase de resfriamento do processo de produção de carvão vegetal.

Estudos que tiveram como objetivo reduzir o tempo de produção, empregando formas de resfriamento forçado do forno:

- i) Injetando vapor de água ao final da fase de aquecimento, com redução do tempo de resfriamento em torno de 50% (FILHO *et al.*, 2010; REIS, 2009).
- ii) Por trocadores de calor acoplados ao forno de carbonização, com redução de 63% do tempo de resfriamento (OLIVEIRA *et al.*, 2015; SANTOS, 2013).

Estudo que avalia a troca térmica com ar ambiente:

- i) Forno contêiner metálico acondicionado no interior de uma câmara em alvenaria durante o ciclo de aquecimento, e posterior retirada desta câmara, para acelerar o processo de resfriamento (ASSIS; TRUGILHO, 2008; BARCELLOS, 2002; BARCELLOS *et al.*, 2004). Com redução de até 34% do tempo de resfriamento;
- ii) Forno construído em alvenaria, com sistema de abertura na parte inferior para saída do carvão vegetal por gravidade, após o término do processo de aquecimento para o interior de um contêiner metálico (LANA, 2018), alcançou 40% de redução do tempo da fase de resfriamento.
- iii) Forno tipo retorta de baixo custo (Adam-retort), construído em alvenaria, com o topo da câmara fechada por uma chapa metálica fina, coberta com isolante térmico, oferecendo melhor isolamento na etapa de aquecimento e, posteriormente, na fase de resfriamento o isolante pode ser retirado para acelerar o processo (ADAM, 2009).

2.3 Seleção de materiais

A seleção de materiais para projetos de engenharia não é um trabalho trivial, visto que existem aproximadamente 200 mil materiais disponíveis para utilização na engenharia (ASHBY, 2018). Comumente, a seleção de um novo material ou substituição de um material por outro, cujo foco é melhorar o desempenho em relação ao anterior, geralmente ocorre pelo método de “tentativa e erro” ou então pela experiência do(s) projetista(s) em situações anteriores. Estas formas de seleção de materiais resultaram em soluções muito distantes da ideal (JAHAN; EDWARDS, 2016).

Segundo Ashby (2018), a experiência é algo valioso no processo de seleção de materiais, porém, com a rápida evolução das informações sobre materiais, contar somente com experiência é limitar as possibilidades de materiais para determinada aplicação de engenharia. É necessário estabelecer procedimentos robustos com etapas definidas que auxiliem no processo de seleção de materiais.

Para seleção de materiais, diversos fatores/critérios podem ser considerados. Fatores como: propriedades mecânicas, propriedades físicas, propriedades magnéticas, elétricas, térmicas e de radiação; propriedades de fabricação, custo do material, confiabilidade, durabilidade, capacidade de reciclagem, impacto do material

no meio ambiente (ASHBY, 1999; JAHAN *et al.*, 2010; VAN KESTEREN; STAPPERS; DE BRUIJN, 2007).

Especificamente para seleção dos materiais utilizados na construção dos fornos, o custo, a funcionalidade e a durabilidade são parâmetros que orientam a escolha (BUSTOS-VANEGAS, 2018; BUSTOS-VANEGAS *et al.*, 2018). Outros parâmetros, e até mesmo a relação entre estes, poderiam ser considerados na escolha dos materiais. Por exemplo, o tempo de resfriamento, o tempo de vida útil de um forno e os custos com manutenção (SANTOS, 2017).

Além das propriedades dos materiais, pode-se considerar ainda o número tipicamente grande de soluções de projetos, como alterar tamanho e forma de componentes, que pode ser integrada com o projeto do produto, utilizando ferramentas de projeto baseadas em computador, como: *Computer-Aided Design* (CAD), na modelagem do produto; e *Finite Element Analysis* (FEA), para simulação matemática. Isso eleva ainda mais a complexidade da seleção de materiais, tornando a seleção intuitiva do material impossível. Isso destaca o valor de poder usar métodos MCDM para apoiar a tomada de decisões no processo de projeto de engenharia (JAHAN; EDWARDS, 2013).

Para Jahan *et al.* (2010), a seleção de materiais é um esforço interdisciplinar e geralmente requer a colaboração de diferentes áreas, como ciência e engenharia de materiais, engenharia mecânica e outras especialidades específicas, que dependem do tipo de aplicação.

Rahim *et al.* (2020) destaca que o processo de seleção de materiais consiste, basicamente, numa forma de triagem inicial, uma forma de realizar comparações e um método de classificar os materiais. Segundo Jahan *et al.* (2010), independentemente do processo de seleção utilizado, as etapas de triagem e classificação dos materiais são as vitais.

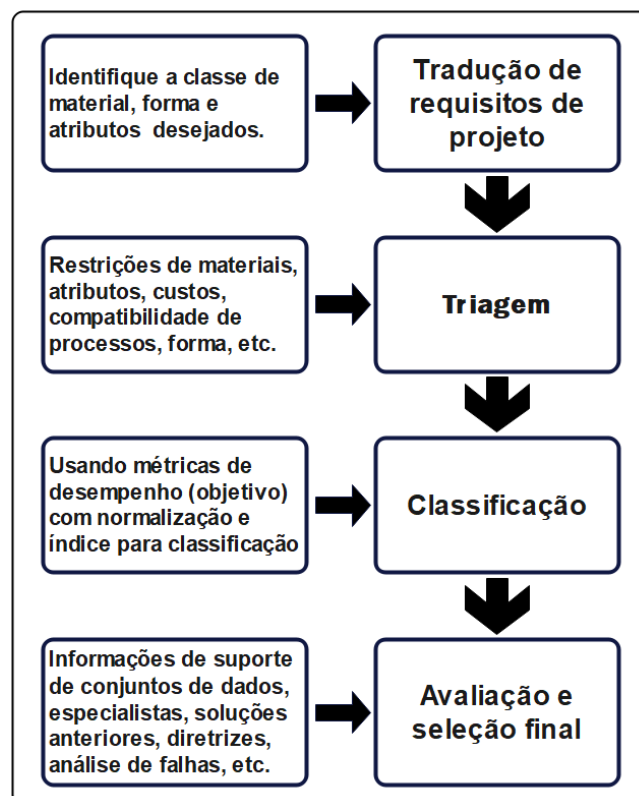
Nesta perspectiva, diversos são os métodos propostos para auxiliar projetistas no processo de seleção de materiais. Chiner, (1988) propôs uma estrutura de cinco etapas: 1) definição do *design*; 2) análises de propriedades do material; 3) triagem de materiais candidatos; 4) avaliação e decisão para solução ótima; e 5) testes de verificação. Farag (2002), definiu três estágios de seleção de materiais: 1) triagem inicial dos materiais; 2) desenvolvimento e comparação de alternativas; e 3) seleção da solução ideal. Ashby (1999) e Ashby *et al.* (2004) sugeriram quatro etapas fundamentais: 1) um método para traduzir os requisitos de projeto em uma

especificação de material; 2) um método de triagem que atendam às especificações; 3) uma forma de classificar os materiais; e 4) uma maneira de procurar informações de suporte sobre os candidatos mais bem classificados. Jalham (2006) propõe um método de seleção de materiais que segue uma estrutura hierárquica composta de três fases: 1) pré-seleção; 2) fase seleção; e 3) avaliação tecno econômica e pós-seleção. Já Kesteren, Bruijn e Stappers (2008) sugeriram as seguintes etapas: 1) formular critérios de materiais, 2) fazer um conjunto de materiais candidatos, 3) comparar materiais candidatos e escolher materiais candidatos.

Percebem-se semelhanças entre os métodos apresentados, independentemente da relação das etapas de projeto e seleção do processo com a seleção de materiais. A triagem e a classificação são duas etapas vitais na seleção de materiais (JAHAN; EDWARDS, 2016; JALHAM, 2006).

A Figura 9 apresenta as etapas típicas de um processo de seleção de materiais.

Figura 9 – Etapas típicas do processo de seleção de materiais



Fonte: Adaptado de Rahim *et al.* (2020)

2.4 Métodos de tomada de decisão multicritério aplicados à seleção de materiais

A seleção de materiais adequado para uma determinada aplicação exige a avaliação e o gerenciamento de uma grande quantidade de informações que devem

ser definidas, tendo como norte as necessidades geradas ou esperadas por sua aplicação. Geralmente, é necessário utilizar compensações de propriedades para selecionar, entre as opções disponíveis, o material mais adequado para uma aplicação. Seguindo estas perspectivas, os métodos MCDM podem ser empregados (JAHAN *et al.*, 2010; JAHAN; EDWARDS, 2016).

Segundo Emovon e Oghenenyerovwho (2020) e Rahim *et al.* (2020), os métodos MCDM são ferramentas bem conhecidas para resolver problemas complexos da realidade devido à sua capacidade intrínseca de julgar diversas alternativas, com referência a vários critérios de decisão, para escolher a melhor. Os métodos MCDM mais utilizados para resolver o problema de decisão de seleção de materiais são: *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Weighted Sum Model* (WSM), *Weighted product model* (WPM), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), *Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje* VIKOR, *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE), *ELimination Et Choix Traduisant la Realité* (ELECTRE) e *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT).

Emovon e Oghenenyerovwho (2020) realizaram uma revisão sobre MCDM utilizados na resolução de problemas de seleção de materiais, entre os anos de 1994 e 2019, e indicam que as técnicas menos aplicadas são os métodos ELECTRE, COPRAS, PSI, WPM e MAUT. (RAHIM *et al.*, 2020), também em uma revisão, porém para o período dos anos 2000 a 2018, constataram que TOPSIS (10,67%), AHP (10,49%) e VIKOR (5,67%) foram os principais métodos adotados para seleção de materiais. Ainda, Jahan *et al.* (2010) aponta que o TOPSIS tem sido um dos métodos MCDM mais utilizados na escolha de materiais TOPSIS.

O método TOPSIS foi desenvolvido com base no fator de que a alternativa escolhida deve ter a menor distância da solução ideal e a maior distância da solução ideal negativa. TOPSIS pois a vantagem de permitir inúmeras alternativas (materiais) e atributos (critérios), tornando-se uma excelente ferramenta para seleção de materiais (MOUSAVI-NASAB; SOTOUDEH-ANVARI, 2017a).

Outro ponto positivo do TOPSIS é a facilidade de integração de sistemas computacionais, como por exemplo, a vinculação a bancos de dados de materiais e a eficiência dos sistemas de seleção de materiais (JAHAN; EDWARDS, 2015).

Segundo Mousavi-Nasab e Sotoudeh-Anvari (2017), o TOPSIS é um método empregado de forma eficaz e proveitoso numa ampla gama de problemas de seleção

de materiais, devido à estrutura transparente e racional, bem como à facilidade de execução. Shanian e Savadogo (2006) corroboram com esta afirmação, e destacam que, para critérios de seleção que envolvem objetivos múltiplos e conflitantes, o TOPSIS é capaz de fornecer uma lista de alternativas classificadas dos melhores aos piores materiais.

No entanto, a maioria dos métodos propostos para classificação na seleção de materiais, incluindo TOPSIS, tende a se concentrar em critérios de custo e benefício e dá menos atenção aos valores-alvo, apesar de sua importância em muitos problemas práticos de tomada de decisão. Em resposta a essa dificuldade, (JAHAN; BAHRAMINASAB; EDWARDS, 2012) propôs uma extensão do método TOPSIS. Sendo este o método utilizado no presente estudo.

2.4.1 Método TOPSIS estendido

As etapas do TOPSIS estendido, proposto por Jahan, Bahraminasab e Edwards (2012) são:

Etapa 01. Converta as medidas brutas (x_{ij}) nas medidas padronizadas (r_{ij}), conforme a técnica de normalização apresentada na equação (1).

$$r_{ij} = 1 - \frac{|x_{ij} - T_j|}{\text{Max}\{x_{ij}^{\text{max}}, T_j\} - \text{Min}\{x_{ij}^{\text{min}}, T_j\}} \quad (1)$$

Onde, (T_j) o elemento mais favorável (x_{ij}) ou o valor alvo no critério (j).

Etapa 02. Desenvolva um conjunto de pesos de importância (w_j) para os critérios.

Etapa 03. Multiplique as colunas da matriz de decisão normalizada pelos pesos associados, equação (2):

$$V_{ij} = r_{ij}w_{ij}; \quad j = 1, 2, 3, \dots, n; \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

Etapa 04. Identifique solução ideal positiva (PIS):

$$\{V_1^+, V_2^+, V_3^+, \dots, V_n^+\} = \left\{ \text{Max}_i V_{ij} \mid i = 1, \dots, m \right\}$$

Etapa 05. Identifique solução ideal negativa (NIS):

$$\{V_1^-, V_2^-, V_3^-, \dots, V_n^-\} = \left\{ \text{Min}_i V_{ij} \mid i = 1, \dots, m \right\}$$

Etapa 06. Desenvolva uma medida de distância para cada alternativa, tanto para a ideal (D^-), quanto para não ideal (D^+) usando as equações (3) e (4):

$$D_i^+ = \left(\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2 \right)^{0,5} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

$$D_i^- = \left(\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2 \right)^{0,5} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

Etapa 07. Calcule a proximidade relativa à solução ideal, equação (5):

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; \quad 0 < C_i < 1 \quad (5)$$

Etapa 08. Classifique as alternativas maximizando obtidas na Etapa 7. Quanto maior o valor do índice, melhor será o desempenho da alternativa.

2.5 Implantação da função qualidade integrada ao MCDM

Quality Function Deployment (QFD), foi concebida no Japão ao final dos anos 1960. Momento onde a indústria japonesa começa a abandonar o modo como seus produtos são desenvolvidos, devido à necessidade imposta pelo pós-guerra, que era baseado na imitação e cópias de produtos originais (AKAO, 1997).

No método MCDM a ferramenta QFD pode ser utilizada para auxiliar na definição das ponderações dos critérios, ou seja, na determinação dos pesos dos critérios. O QFD é um método que auxilia na tradução dos requisitos de qualidade dos clientes em características de engenharia consideradas no projeto do produto. A ferramenta não apenas ajuda a equipe de projeto a entender os requisitos do cliente e as tendências do mercado, mas também, reduz efetivamente o tempo de desenvolvimento do produto (LIU; HAO-TIEN, 2011). Uma das dificuldades dos MCDM na seleção de materiais é levar em consideração a “voz dos clientes” e, portanto, seus requisitos finais dos produtos. Em auxílio a esta necessidade, o QFD é um método que pode ser utilizado (PRASAD; CHAKRABORTY, 2013).

Na seleção de materiais, as preferências relativas desses requisitos têm influência direta no projeto do produto e isso é normalmente imposto por meio da relação dos parâmetros de projeto com as propriedades do material. Esses parâmetros podem ser uma função de uma única propriedade do material ou uma combinação de duas ou mais propriedades (índices de materiais). A extração de todos os índices de materiais relevantes requer um amplo conhecimento de engenharia (KASAEI; ABEDIAN; MILANI, 2014).

Vários trabalhos voltados à área de projeto e/ou seleção de materiais utilizaram o QFD. Chen *et al.* (2019) propuseram uma metodologia baseada nos

princípios do QFD para orientar os projetistas na seleção dos materiais mais adequados para as diferentes aplicações industriais. Prasad *et al.* (2020), utilizaram o QFD para determinar os valores dos pesos dos critérios de seleção de materiais, em seguida, o método TOPSIS é empregado para alcançar a seleção ideal de material. Cavallini *et al.* (2013) utilizaram o QFD para identificar e selecionar os critérios a fim de atribuir pesos, posteriormente o método C-VIKOR ajuda a classificar a seleção final de alternativas. Yadav (2017) propõe um modelo que utiliza o QFD junto aos métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e TOPSIS. Já Scalice, Brascher e Becker (2012) propuseram uma metodologia para seleção de materiais baseada nos princípios do QFD, relacionando os requisitos de projeto para cada componente com as propriedades dos materiais, gerando uma matriz de avaliação.

O QFD também foi utilizado na seleção de materiais na área biomédica, como ferramenta para sistematizar a expectativa do usuário e as necessidades percebidas pela equipe médica, e de projeto, para traduzir as necessidades do cliente em requisitos de engenharia (JAHAN; BAHRAMINASAB, 2015; JAHAN; EDWARDS, 2016).

Os métodos MCDM buscam de forma lógica e sistematizada ponderar fatores de decisão (critérios). Neste processo é preciso determinar os pesos destes atributos. Para isso, são comumente utilizadas variáveis linguísticas *fuzzy*, AHP, ANP e entropia. No entanto, em muitos problemas de decisão, a confiabilidade dos critérios de decisão é estritamente dependente das preferências das partes interessadas e dos clientes.

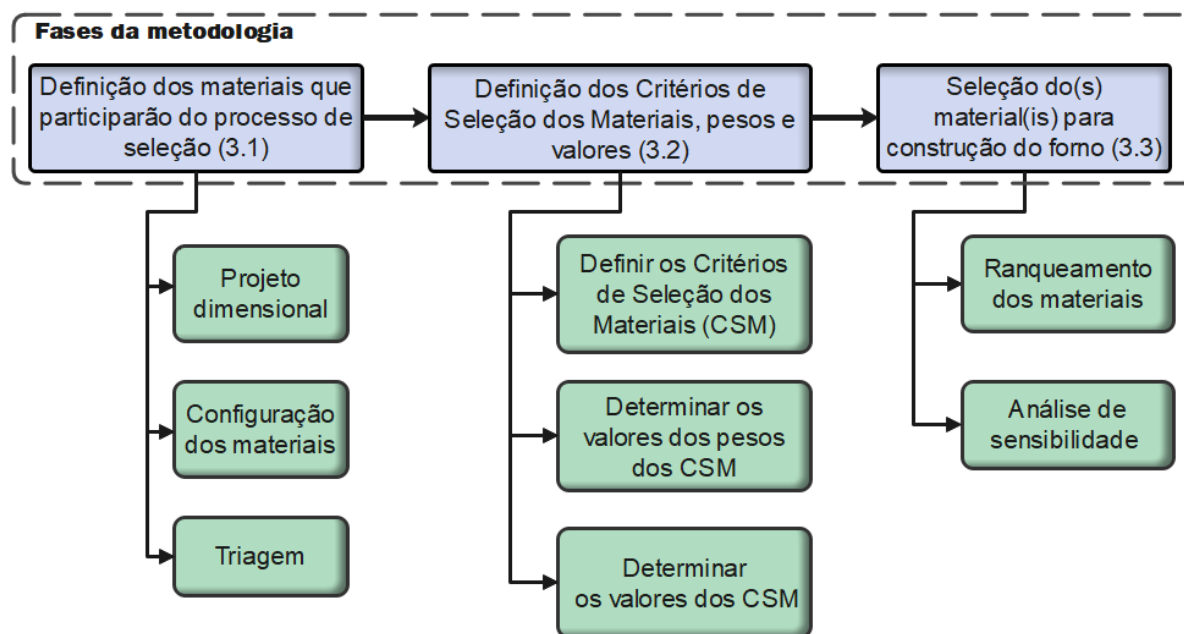
Portanto, o presente estudo utilizará o modo de ponderação para determinação dos pesos dos atributos proposto por Yazdani *et al.* (2017). Nele, a opinião de clientes/especialistas são consideradas por meio da integração das ferramentas DEMATEL e QFD (KASAEI; ABEDIAN; MILANI, 2014; LEE *et al.*, 2013; LIU *et al.*, 2014; PRASAD; CHAKRABORTY, 2013; YAZDANI *et al.*, 2017).

Para melhor entendimento, as etapas do processo de determinação dos pesos dos atributos serão apresentadas na seção 3.2.2.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as etapas para alcançar os objetivos propostos na pesquisa. A Figura 10 apresenta a estrutura metodológica do trabalho.

Figura 10 – Procedimentos metodológicos



Fonte: Autoria própria (2023)

Inicialmente, algumas considerações sobre a metodologia são necessárias:

a) A metodologia proposta pode ser utilizada para selecionar materiais para projetos de forno com diferentes dimensões; b) A metodologia possibilita a avaliação dos materiais dos fornos dispostos em camadas; e c) As reações químicas e físicas que ocorrem durante o processo de carbonização da madeira não foram consideradas. Por isso, os valores dos CSM, obtidos por meio de simulação numérica, não têm o propósito de expressar os resultados obtidos no processo real de carbonização da madeira. Estes valores servem somente como comparação entre os resultados obtidos pelo emprego da presente metodologia.

3.1 Definição dos materiais que participarão do processo de seleção

A disponibilidade de materiais comerciais para utilização em um projeto de engenharia é grande. Nesse sentido, é preciso restringir esta abundante quantidade de materiais em um grupo menor. Ou seja, é necessário determinar quais são os requisitos mínimos que um material deve cumprir para torná-lo apto a participar de um processo de seleção (ASHBY, 2018). Esta é uma das funções do projetista, definir

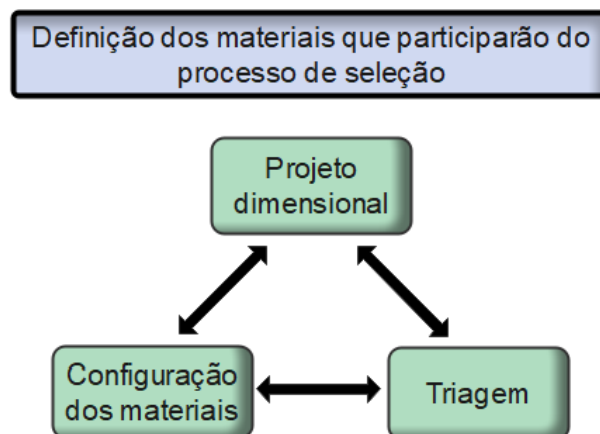
quais possíveis materiais poderão fazer parte de seu projeto. As informações sobre propriedades e aplicações de materiais podem ser encontradas em banco de dados de materiais, disponíveis na *internet*, *softwares*, catálogos de fornecedores, livros, artigos, etc.

Os requisitos ou critérios de um processo de seleção de materiais podem ser classificados em duas categorias principais: requisitos “rígidos” ou “não passa” e requisitos “suaves” ou “relativos” (FARAG, 2002).

Requisitos “rígidos” não aceitam barganha, ou seja, devem ser atendidos pelo material. Este tipo de requisito elimina um material ou até mesmo uma classe de materiais. Por exemplo, materiais metálicos são eliminados ao selecionar materiais para isolamento elétrico. Já os requisitos “suaves”, aceitam negociações e compensações. Além das propriedades dos materiais, outros requisitos, como os de processamento e fabricação de materiais e componentes, bem como questões ambientais, também devem ser levados em consideração na seleção de materiais (EDWARDS; DENG, 2007).

A primeira fase da metodologia tem o objetivo de definir os materiais que estão aptos a participar do processo de seleção. Para isso, três aspectos são considerados: i) Projeto dimensional; ii) Triagem; e iii) Configuração dos materiais. Conforme a Figura 11, as etapas que compõem esta fase sofrem influência uma em relação a outra. Por exemplo, a utilização de determinado material pode influenciar na rigidez da estrutura do forno, assim é necessário adequar o projeto dimensional para a utilização deste material. Da mesma forma, a quantidade de materiais utilizada na construção do forno, dispostos em camadas, irão influenciar no projeto dimensional do forno.

Figura 11– Relação entre as etapas na fase de definição dos materiais



Fonte: Autoria própria (2023)

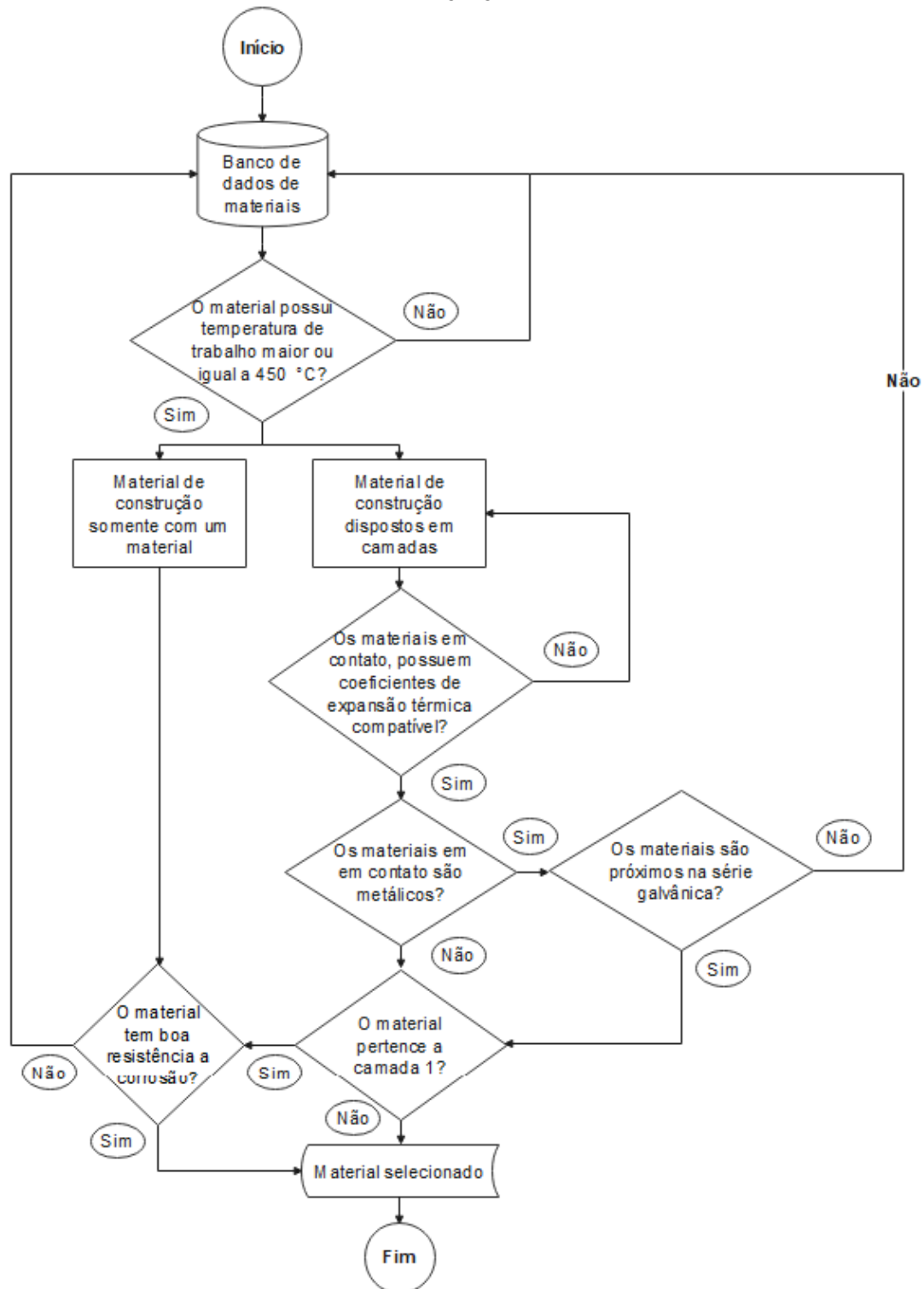
As etapas anteriormente apresentadas auxiliarão o projetista no momento de organizar e avaliar os diferentes tipos de materiais utilizados na construção do forno. Ainda, ressalta-se, que estas etapas podem ocorrer de forma concomitante e também não há uma regra que estabeleça por qual delas o processo de definição deve-se iniciar.

Na etapa Projeto dimensional, o projetista deve definir os aspectos estruturais, operacionais, produtivos, econômicos e ambientais, necessários para projeto do forno (ZOLA, 2020; ZOLA *et al.*, 2020b).

Já na Triagem, o projetista deverá selecionar os materiais que estarão aptos a participar do processo de seleção para construção do forno. Segundo Edwards (2005), é na fase de triagem onde acontece a pré-seleção dos materiais que podem ser utilizados no projeto de produto. Para Ashby (2012), a triagem elimina candidatos que não podem fazer o serviço porque um ou mais de seus atributos estão fora dos limites estabelecidos pelas restrições.

Neste sentido, para orientar o projetista na triagem dos materiais que participarão do processo de seleção, o fluxograma apresentado na Figura 12 deve ser utilizado (VALENTIM; BEHAINNE; BRAGHINI JUNIOR, 2022).

Figura 12 – Fluxograma do processo de triagem dos materiais utilizados na construção do forno



Fonte: adaptado de Valentim, Behainne e Braghini Junior (2022)

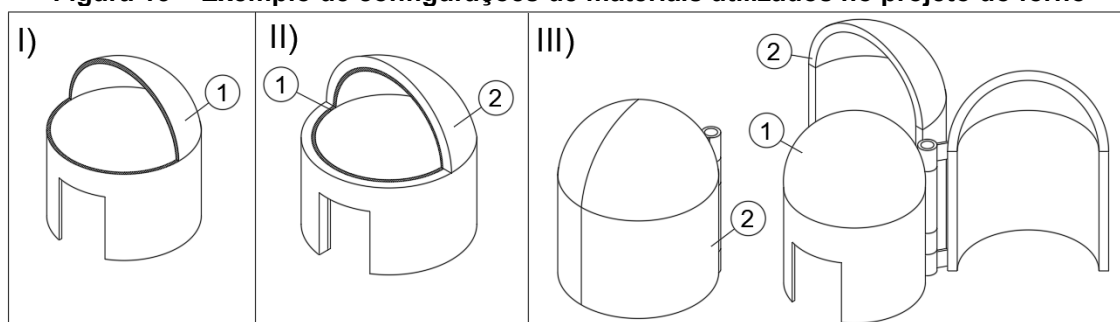
O primeiro requisito do material selecionado é suportar uma temperatura máxima de trabalho superior a 450 °C, que é próxima à temperatura do processo de carbonização. Temperaturas inferiores a esta na face interna das paredes laterais do forno foram relatadas em trabalhos anteriores (LANA, 2018; OLIVEIRA, 2012;

OLIVEIRA *et al.*, 2013). A próxima exigência, caso o material seja o único utilizado na construção do forno, ou então pertença à camada interna do material disposto em camada utilizado na construção do forno (camada 1) é possuir boa resistência a corrosão aos gases gerados durante o processo de carbonização. No entanto, os materiais das demais camadas não necessitam cumprir tal exigência.

No caso de materiais constituídos por duas ou mais camadas de materiais, é necessário comparar os valores dos coeficientes de expansão térmica destes materiais. Quanto mais próximos os valores dos coeficientes, melhor. Ainda, para os casos onde são utilizados materiais em camadas, é preciso avaliar a possibilidade de surgimento de corrosão galvânica, que acontece pela diferença de potencial entre os materiais. Materiais que se encontram mais afastados na série galvânica favorecem o surgimento deste tipo de corrosão.

A etapa configuração dos materiais refere-se à disposição dos materiais de construção do forno dispostos em camadas, pois influenciam nas características térmicas do forno. Por exemplo, para o exemplo de aplicação apresentado no presente estudo, são utilizadas três configurações diferentes de materiais, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Exemplo de configurações de materiais utilizados no projeto do forno



Fonte: adaptado de Valentim, Behainne e Braghini Junior (2022)

Na configuração I, o forno possui apenas um material (material 1). Na configuração II, a estrutura do forno é composta por dois materiais (material 1 e material 2) montados em série. A face interna do material 1 é mantida em contato com o ambiente de carbonização, enquanto a face externa do material 2 está exposta ao ambiente externo. Finalmente, na configuração III, o forno inclui um mecanismo pivotante, que permite o uso de duas camadas (materiais 1 e 2) durante o estágio de aquecimento; posteriormente, no estágio de resfriamento, o material 2 é removido, deixando a face externa do material 1 exposta à atmosfera. A configuração III foi concebida com os seguintes objetivos: i) contribuir com a redução da quantidade de

calor perdida para o meio externo, o que gera a diminuição do consumo de combustível na fase endotérmica do processo de carbonização; e ii) diminuir o tempo da fase de resfriamento do forno.

É importante ressaltar que o projetista pode avaliar configurações diferentes das apresentadas na Figura 13.

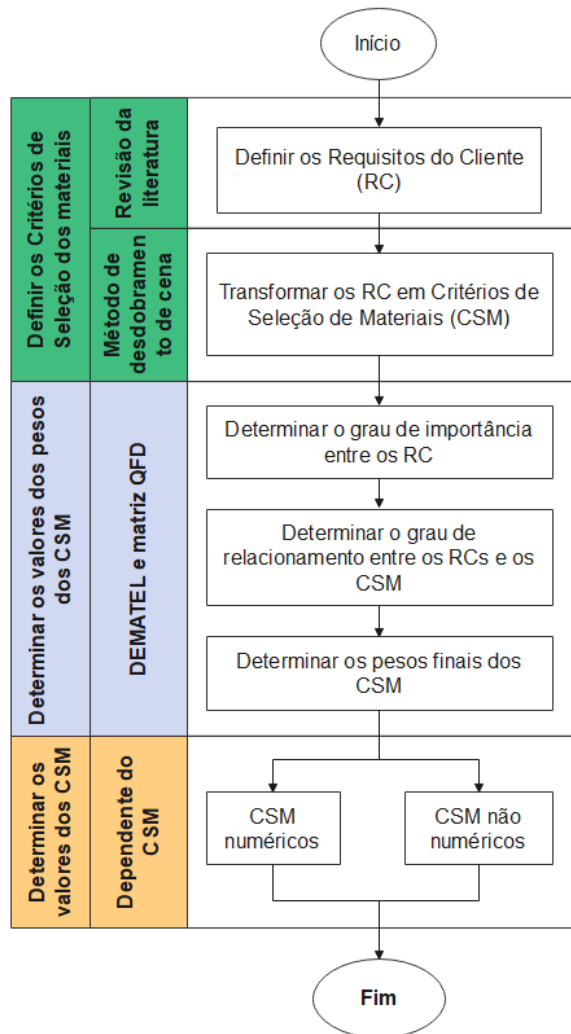
3.2 Definição dos critérios de seleção dos materiais, pesos e valores

Nesta seção, serão abordados como os CSM foram definidos e como serão determinados os seus respectivos pesos e valores.

Para definir quais serão os CSM é preciso, primeiramente, identificar quais são as necessidades, metas ou desempenho esperado de um produto (JAHAN, ALI; EDWARDS, 2016). Segundo Ashby (2012), o projeto de um produto deve ser concebido para atender as necessidades de determinado mercado, sendo necessário, inicialmente, identificá-las e defini-las com exatidão. Para Diter e Schmidt (2016), é necessário identificar os Requisitos do Cliente (RC) e posteriormente convertê-los em CSM.

A Figura 14 apresenta um fluxograma que resume as etapas realizadas no processo de definição dos CSM, pesos e valores.

Figura 14 – Etapas para definição dos CSM, peso valores



Fonte: Autoria própria (2023)

A seguir, cada uma destas etapas será detalhada.

3.2.1 Definir os critérios de seleção dos materiais

Para definir quais serão os CSM utilizados na metodologia, partiu-se inicialmente dos RC, os quais foram definidos com auxílio de informações da literatura (DIABY; GOEREE, 2014).

Segundo Rozenfeld *et al.* (2006), os RC, comumente, são expressos de forma qualitativa, sendo necessário converter esta necessidade em linguagem técnica de engenharia. Ou seja, é preciso que estes requisitos sejam mensuráveis.

Para converter os RC em CSM, foi utilizado o método Desdobramento de Cenas, no qual, a partir de uma necessidade percebida, pode-se obter uma grande quantidade de necessidades concretas. Nele, para cada uma das cenas possíveis de

uso do produto, as seguintes perguntas são feitas: Quem? Quando? Onde? Como? Por quê? E, para mudar a cena, pergunta-se: “E Se?” (CHENG, 2010).

Segundo Rozenfeld *et al.* (2006), o método Desdobramento de Cenas, auxilia a explicitar itens exigidos que se referem à qualidade intrínseca do produto, ou seja, qualidade exigida do produto. Especificamente, o objetivo do desdobramento é permitir que as necessidades implícitas sejam explicitadas, ou o que é informal seja formalizado, caminhando de um nível mais abstrato para um nível mais concreto, capazes de serem mensurados.

Para determinar os CSM que serão utilizados na metodologia, inicialmente foram elencados três grupos de necessidades requeridas para seleção de um forno de produção de carvão vegetal: i) Necessidades com relação à produção; ii) Necessidades com relação à operação; e iii) Necessidades com relação à fabricação (Quadro 1) (ZOLA, 2020).

Partindo destes grupos, foram determinados os níveis 2 e 3, que são as ações que devem ser realizadas para que o nível anterior seja alcançado. Na sequência, no nível 4, foram definidos os CSM, cuja finalidade é propor características capazes de traduzir as exigências apresentadas no nível 3, tornando-as possíveis de serem mensuradas. Finalmente, no nível 5, são apresentadas as respectivas grandezas que serão utilizadas para mensurar os CSM.

Quadro 1 – Desdobramento dos RC em CSM

Requisitos dos clientes (RC)			Critérios de seleção dos materiais (CSM)		Referências
Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5	
Necessidades com relação à produção	Boa produtividade	Ciclos de produção mais curtos (RC1)	Tempo de aquecimento	Tempo	(ADAM, 2009; BUSTOS-VANEGAS <i>et al.</i> , 2018; DE MIRANDA; BAILIS; VILELA, 2013; FRANÇA; CAMPOS, 2002; RODRIGUES, 2019; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019a, 2019b; SANGSUK; BUATHONG; SUEBSIRI, 2020; SANTOS, 2013)
		Menor consumo de energia durante o processo de produção (RC2)	Tempo de resfriamento	Tempo	
	Carvão com qualidade	Maior controle da fase de aquecimento (RC3)	Energia dissipada e fornecida durante o processo de aquecimento	Energia	
	Bom rendimento	Maior controle da fase de aquecimento (RC3)	Energia dissipada e fornecida durante o processo de aquecimento	Energia	
Necessidades com relação à operação	Fácil operação e controle	Maior controle da fase de aquecimento (RC3)	Energia dissipada e fornecida durante o processo de aquecimento	Energia	(ADAM, 2009; BUSTOS-VANEGAS <i>et al.</i> , 2018; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019a, 2019b)
	Fácil manutenção	O material de construção do forno deve ser facilmente encontrado no mercado (RC4)	Disponibilidade do material	Escala	
		O material de construção deve ser facilmente trabalhável durante a fase de fabricação do forno (RC5)	Capacidade de fabricação	Escala	
		O material de construção do forno deve permitir fácil manutenção e reparo (RC6)	Capacidade de manutenção	Escala	
		O material de construção do forno deve ser barato (RC7)	Custo do material	Econômico	
	Portabilidade	Quanto mais leve o material de construção do forno, melhor (RC8)	Massa do conjunto	Massa	
Necessidades com relação à fabricação	Baixo custo de fabricação	O material de construção do forno deve ser barato (RC7)	Relação custo/volume	Econômico	(EDWARDS, 2005; PENEDO, 1982; PRENDEVILLE; O'CONNOR; PALMER, 2014; RODRIGUES, 2019; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019a, 2019b; SANTOS; HATAKEYAMA, 2012)
	Fácil construção	O material de construção do forno deve ser facilmente encontrado no mercado (RC4)	Disponibilidade do material	Escala	
		O material de construção deve ser facilmente trabalhável durante a fase de fabricação do forno (RC5)	Capacidade de fabricação	Escala	
	Boa vida útil	O material de construção do forno deve possuir boa resistência a corrosão (RC9)	Resistência a corrosão	Escala	
		O material de construção do forno deve possuir boa resistência ao desgaste (RC10)	Tenacidade a fratura	Escala	
	Baixo impacto ambiental dos materiais utilizados	O material de construção do forno deve gerar menor impacto ambiental durante seu processo de fabricação (RC11)	Eco-custos	Indicador	
		Preferencialmente, o material do forno deve ser reciclável (RC12)	Pegada de carbono	Indicador	
		Preferencialmente, o material de construção do forno deve ser reutilizado (RC13)	Reciclabilidade	Escala	
			Reutilização	Escala	

Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nas informações apresentadas no Quadro 1, o Quadro 2 foi construído. Nele, os CSM são classificados em numéricos e não numéricos, e suas respectivas unidades e objetivos são apresentadas.

Quadro 2 – Critérios de seleção de materiais, objetivos e descrição

Classificação dos CSM	Nível 4		Nível 5	Un.	Obj.	Descrição
Numéricos	Tempo da fase de aquecimento	CSM1	Tempo	horas	mín.	Tempo que se inicia com o acendimento do forno até a temperatura final do processo de carbonização.
	Tempo da fase de resfriamento	CSM 2	Tempo	horas	mín.	Tempo que tem início com o término da fase de aquecimento até a fase da parede interna do forno atingir a temperatura de aproximadamente 50 °C.
	Calor dissipado na fase de aquecimento	CSM 3	Energia	kWh	mín.	Total de calor dissipado pelas paredes e tetos do forno durante a fase de aquecimento.
	Calor fornecido na fase de aquecimento	CSM 4	Energia	kWh	mín.	Total de energia térmica necessária para elevar a temperatura da superfície interna do forno de 25°C até 400 °C durante a etapa de aquecimento.
	Massa total dos materiais	CSM 5	Massa	kg	mín.	Somatório das massas dos materiais utilizados na construção do forno, conforme projeto inicial.
	Custo total dos materiais	CSM 6	Econômico	\$	mín.	Custo total com a aquisição dos materiais que serão utilizados na construção do forno.
	Eco-custos	CSM 7	Indicador	\$	mín.	São os custos (marginais) que devem ser feitos para reduzir a poluição ambiental e o esgotamento de materiais em nosso mundo a um nível compatível com a capacidade de carga de nossa terra.
	Pegada de carbono	CSM 8	Indicador	t CO ₂ eq	mín.	Total de gases de efeito estufa gerados na produção do material.
	Tenacidade a fratura	CSM 9	Índice	MPa/m ²	máx.	Energia que o material absorve antes e durante o processo de fratura.
Não numéricos	Disponibilidade do material	CSM 10	Escala	-	máx.	Facilidade de encontrar o material no mercado nacional
	Capacidade de fabricação	CSM 11	Escala	-	máx.	Facilidade de processar o material até atingir as formas e dimensões pretendidas.
	Capacidade de manutenção	CSM 12	Escala	-	máx.	Facilidade de realizar reparos no material.
	Resistência a corrosão	CSM 13	Escala	-	máx.	Capacidade do material resistir a corrosão, considerando os gases provenientes do processo de carbonização (CH ₄ , CO ₂ , CO, H ₂ , O ₂ e hidrocarbonetos); e a temperatura de trabalho de 450 °C.
	Reciclabilidade	CSM 14	Escala	-	máx.	Capacidade do material ser transformado em matéria prima e incorporado ao processo produtivo.
	Reutilização	CSM 15	Escala	-	máx.	Capacidade do material ser reutilizado, mantendo suas propriedades originais.

Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.2 Determinar os valores dos pesos dos critérios de seleção dos materiais

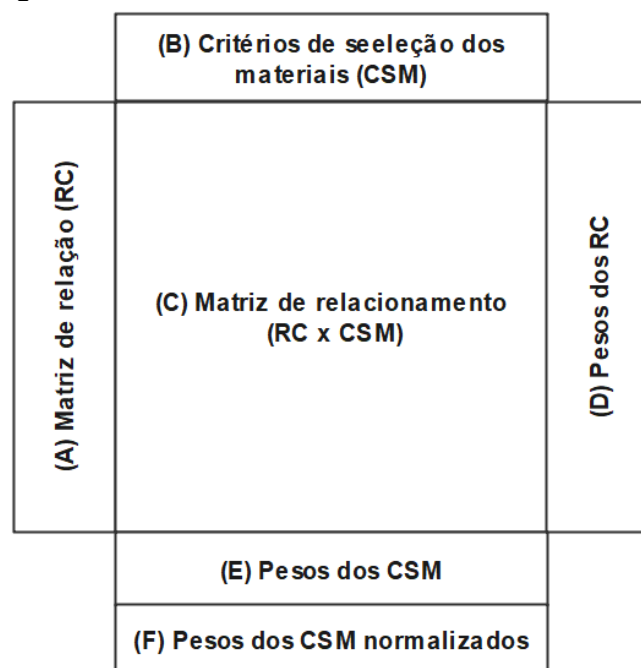
Após a definição dos CSM, é preciso determinar os valores dos pesos dos CSM.

Conforme tratado na seção 2.5, para determinar os pesos dos atributos, ou seja, os pesos dos CSM, foi utilizada a estratégia empregada em Yazdani *et al.* (2017). Nela, há a integração entre as ferramentas DEMATEL e QFD.

No presente estudo, a matriz QFD tem uma estrutura conforme apresentado na Figura 15, que possui as seguintes regiões:

- A: Matriz Relação entre os RC;
- B: CSM (nível 4 do Quadro 2);
- C: Matriz de relacionamento (RC x CSM);
- D: Importância relativa ou pesos dos (RC);
- E: Inter-relação entre os Pesos dos (RC) x (matriz C);
- F: Pesos dos CSM normalizados.

Figura 15 – Estrutura da matriz QFD utilizada no estudo



Fonte: Construída com base em Yazdani *et al.* (2017)

Conforme a Figura 14, para determinar os pesos dos CSM, é necessário realizar três etapas: i) Determinar o grau de importância entre os RC; ii) Determinar o grau de relacionamento entre RC x CSM; e iii) Determinar os pesos dos CSM. Estas fases são detalhadas a seguir.

3.2.2.1 Determinar o grau de importância entre os RC

Para determinar o grau de importância entre os RC, foi utilizado o método DEMATEL revisado (LEE *et al.*, 2013), conforme as etapas:

Etapa 1. Gerar a matriz de relação direta (A) por pontuações:

Inicialmente, deve ser realizada a coleta de opiniões com especialistas sobre a relação de importância existentes entre os RC, por meio de uma escala 0 a 4, onde: (0) representando nenhuma influência, (1) influência baixa, (2) influência média, (3) influência alta e (4) influência muito alta. Uma matriz resposta não negativa é gerada $B^{(k)} = [b_{ij}^{(k)}]$, com $1 \leq k \leq H$. Assim, $B^{(1)}, B^{(2)}, \dots, B^{(n)}$ para cada especialista (H). Para agregar os valores das avaliações, uma matriz média $A = [a_{ij}]_{n \times m}$ é dada, conforme equação (6).

$$A = \frac{1}{H} \sum_{k=1}^H b_{ij}^k \quad (6)$$

Onde H é o número de especialistas consultados.

Etapa 2. Calcular a matriz de relação direta inicial normalizada X:

Cálculo a matriz (X), por meio da equação (7).

$$X = \frac{A}{s} \quad (7)$$

onde

$$s = \max \left(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}, \varepsilon + \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n a_{ij} \right) \quad (8)$$

Onde ε é um número positivo pequeno, por exemplo, 10^5 .

Etapa 3. Calcular a matriz de relação (T):

A matriz (T) é calculada pela equação (9). Onde (I) denota a matriz de identidade. Cada elemento (t_{ij}) desta matriz simboliza as influências indiretas que o i – ésimo confere ao j – ésimo critério. Assim, a matriz (T) revela a relação entre cada par de variável.

$$\begin{aligned}
T &= [t_{ij}]_{n \times m}, i, j = 1, 2, \dots, n \\
T &= X + X^2 + X^3 + \dots + X^k \\
&= X(I + X + X^2 + \dots + X^{k-1})[(I - X)(I - X)^{-1}] \\
&= (X - X^k)(I - X)^{-1} \text{ então,} \\
T &= X(I - X)^{-1}T, \text{ quando } k \rightarrow \infty, X^k = [0]_{n \times m} \\
T &= X(I - X)^{-1}.
\end{aligned} \tag{9}$$

Etapa 4. Determinar as somas de linhas e colunas da matriz (T):

A soma das linhas e a soma das colunas são representadas pelos vetores (D_i) e (R_j) , obtidas pelas equações (10) e (11), respectivamente:

$$D_i = \left[\sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{1 \times n} = [t_i]_{n \times 1}, i = 1, 2, \dots, n \tag{10}$$

$$R_j = \left[\sum_{i=1}^n t_{ij} \right]_{1 \times n} = [t_j]_{n \times 1}, j = 1, 2, \dots, n \tag{11}$$

Etapa 5. Cálculo dos pesos dos RC:

Os pesos dos RC foram calculados, normalizando o vetor $(D_i + R_j)$, em que a soma dos pesos normalizados é igual a 1.

3.2.2.2 Determinar o grau de relacionamento entre os requisitos do cliente e os critérios de seleção dos materiais

A matriz de relacionamento do QFD, parte central da Figura 15, é utilizada para avaliar o grau de relacionamento entre os RC e os CSM. Para seu preenchimento, o grau de relacionamento deve ser mensurado por especialistas, utilizando uma escala de quatro pontos, a saber: (1) relacionamento fraco, (3) relacionamento moderado, (6) relacionamento forte e (9) relacionamento muito forte (YAZDANI *et al.*, 2017).

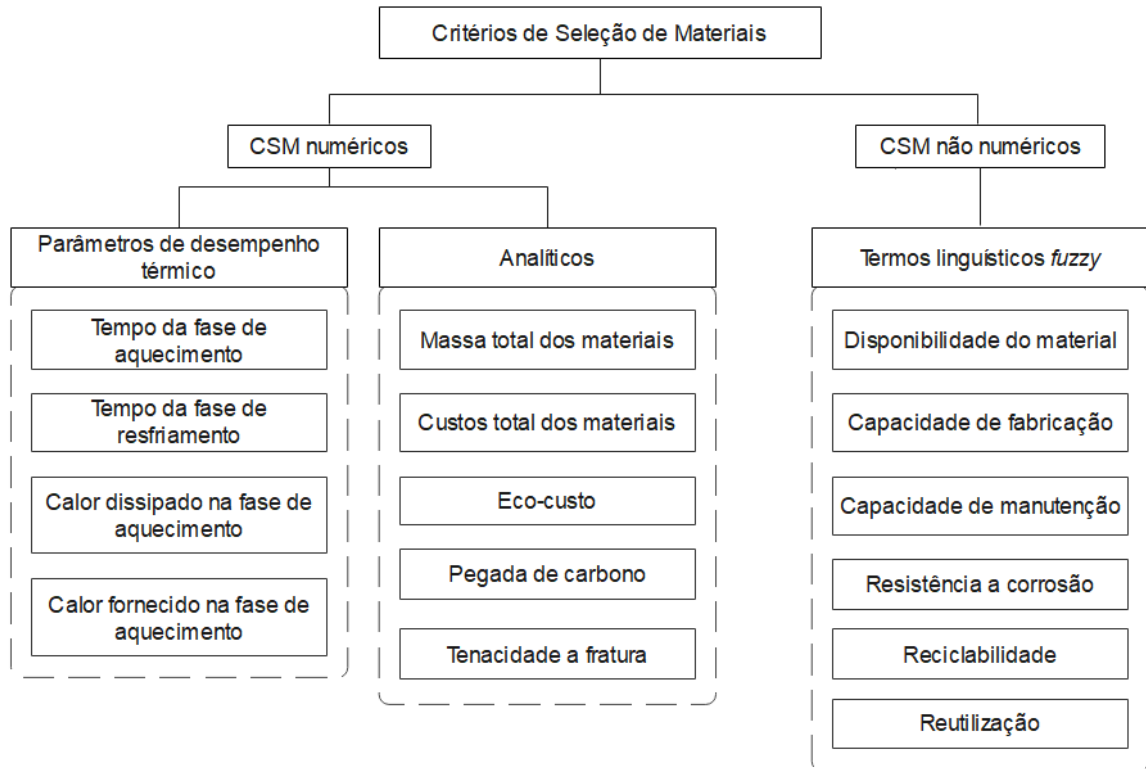
3.2.2.3 Determinar os pesos finais dos critérios de seleção dos materiais

Os valores finais dos pesos dos CSM são calculados pela multiplicação dos valores do relacionamento, obtidos na etapa 5 da secção 3.2.2.1, pelos pesos normalizados dos RC. Os valores finais dos pesos dos CSM são encontrados pelo somatório e normalização dos pesos de cada coluna.

3.2.3 Determinar os valores dos critérios de seleção dos materiais

Os CSM foram agrupados em duas classes, CSM numéricos e não numéricos, estes, por sua vez, apresentaram subdivisões, conforme apresentado na Figura16.

Figura16 – Classificação dos CSM utilizados



Fonte: Autoria própria (2023)

A seguir, são apresentadas as formas de obtenção de cada CSM.

3.2.3.1 Critério de seleção de materiais – Parâmetros de desempenho térmico

Nesta pesquisa, os parâmetros de desempenho térmico (tempo de aquecimento, tempo de resfriamento, quantidade de calor dissipada e quantidade de energia térmica fornecida), foram considerados como critérios de seleção dos materiais do forno. Esses parâmetros foram avaliados mediante a realização de simulações numéricas da transferência de calor que acontecem através das paredes e do teto do forno durante as fases de aquecimento e resfriamento do processo de produção do carvão vegetal.

Assim, para a modelagem computacional, foram usadas as equações de energia (12) e (13), que são representadas em coordenadas cilíndricas e esféricas, respectivamente. Ambas as equações consideram a difusão transitória de calor apenas na direção radial de materiais compósitos isotrópicos, sem geração interna de

energia e sem resistência térmica devido à interface entre camadas (contato perfeito entre camadas).

Para paredes laterais cilíndricas:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{l(r,t)}}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial T_{l(r,t)}}{\partial t} \right) \quad r_{l-1} < r < r_l \quad (12)$$

e para o teto, considerado como casco semiesférico:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_{l(r,t)}}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial T_{l(r,t)}}{\partial t} \right) \quad r_{l-1} < r < r_l \quad (13)$$

onde T_l representa a temperatura na camada l da parede ($l=1$ para uma parede mono camada; $l=2$ se a parede for composta).

Além disso, a equação (14) aplica-se à interface entre camadas, no caso de uso de parede composta:

$$k_l \frac{\partial T_{l(r,t)}}{\partial r} = k_{l+1} \frac{\partial T_{l+1(r,t)}}{\partial r} \quad \text{com} \quad T_{l(r,t)} = T_{l+1(r,t)} \quad (14)$$

As condições de contorno iniciais para os estágios de aquecimento e resfriamento do forno de carvão vegetal são detalhadas a seguir.

• **Estágio de aquecimento:** Na face interna do forno, a condição de contorno é dada pela equação (15):

$$-k_{1(r)} \frac{\partial T_{1(r,t)}}{\partial r} = q_{0(t)}'' \quad r = r_0 \quad t > 0 \quad (15)$$

Onde $q_{0(t)}''$ é o fluxo de calor aplicado à superfície interna do forno. Este fluxo de calor foi considerado variável em função do tempo transcorrido (Δt) durante a etapa de aquecimento, tendo seu valor instantâneo calculado pela equação (16), com base no perfil característico da fração de queima do modelo de liberação de calor finito (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2016).

$$q_{0(t)}'' = \left(\frac{an}{A_s} \right) \left(\frac{f_l m_w HHV_w}{t_d} \right) (1 - \chi) \left(\frac{\Delta t}{t_d} \right)^{n-1} \quad (16)$$

onde a fração de queima (χ) é determinada pela equação (17) :

$$\chi = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\Delta t}{t_d} \right)^n \right] \text{ com: } a = 6 \text{ e } n = 3 \quad (17)$$

As curvas do fluxo de calor instantâneo para cada escolha de material de construção do forno foram ajustadas visando representar processos de pirólise de

lenha, em que uma determinada parcela da energia de combustão da massa total da lenha carregada no interior do forno, seria fornecida às superfícies internas num tempo total de 8h ($t_d = 28800$ s) para obter um perfil de temperatura na superfície interna do forno com valor máximo de 400°C .

Para a face exterior do material em contato com o ambiente externo, a condição de contorno é dada pela equação (18):

$$-k_2 \frac{\partial T_{2(r,t)}}{\partial r} = h(T_{2(r,t)} - T_\infty) + \varepsilon_2 \sigma (T_{2(r,t)}^4 - T_{viz}^4) \quad r = r_2 \quad t > 0 \quad (18)$$

Já a condição inicial para qualquer configuração seguiu a equação (19):

$$T_{l(r,0)} = T_i \quad r_{l-1} < r < r_l \quad t = 0 \quad (19)$$

• **Estágio de resfriamento:** Para este estágio, a condição de contorno é dada pela equação (20), que assume a face interna adiabática (massa de carvão vegetal formada no interior do forno resfriando na mesma rapidez da face interna da parede):

$$\frac{\partial T_{1(r,t)}}{\partial r} = 0 \quad r = r_0 \quad t > 0 \quad (20)$$

Na face externa do forno, a equação (18) é empregada.

Finalmente, a condição inicial para o estágio de resfriamento é descrita pela equação (21):

$$T_{l(r,0)} = T_{l,f(r)} \quad r_{l-1} < r < r_l \quad t = 0 \quad l = 1, 2 \quad (21)$$

onde $T_{l,f(r)}$ é a temperatura atingida no final do estágio de aquecimento no raio r do forno.

As equações do modelo de transferência de calor foram resolvidas utilizando o software ANSYS® 2021/R1 - Módulo *Transient Thermal*.

3.2.3.2 Critérios de seleção de materiais– Analíticos

Os valores dos CSM obtidos por meio de métodos analíticos, onde as soluções foram baseadas em fórmulas matemáticas, nos quais são definidas variáveis de entrada para o cálculo de uma variável de saída, foram:

- a) **Massa total dos materiais (CSM 5):** somatório das massas dos materiais utilizados na do forno;
- b) **Custo total dos materiais (CSM 6):** custo total de aquisição dos materiais que serão utilizados na construção do forno;

- c) **Eco-custos (CSM 7) e Pegada de Carbono (CSM 8):** para o cálculo do Eco-custos (EC) e Pegada de Carbono (PC) dos materiais empregados na construção do forno, devem ser utilizados como referências os valores disponíveis nas planilhas elaboradas pela *Delft University of Technology* (DEFLT UNIVERSITY OF TECHONOLOGY, 2022b, a). Sendo que os valores de EC e PC são calculados pela multiplicação do valor da massa ou volume de cada material (dependendo da unidade em que o material é mensurado na planilha) pelo valor do impacto deste material. Nos casos onde são utilizados mais de um material na construção do forno, deve ser realizado o somatório dos impactos dos materiais;
- d) **Tenacidade a fratura (CSM 9):** a tenacidade a fratura de materiais pode ser encontrada na literatura, já que para seu cálculo é necessária a realização de ensaio mecânico. No caso dos materiais dispostos em camadas, deverá ser considerada a tenacidade a fratura do material da camada interna do forno, por estar em contato direto com a carga do interior do forno, estando mais suscetível a possíveis impactos nos momentos de carregamento e descarregamento do forno.

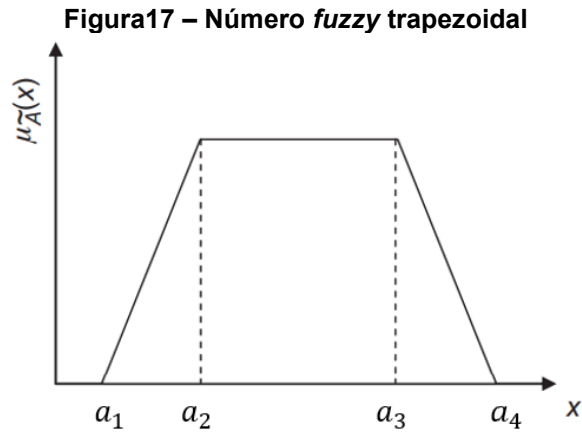
3.2.3.3 Critérios de seleção de materiais - Termos linguísticos

No processo de seleção de materiais, os critérios de seleção utilizados podem possuir diferentes dimensões, como: dimensões técnicas, econômicas, estéticas, ecológicas, etc. Sendo que estas dimensões podem ser classificadas em numéricas e não numéricas (ASHBY *et al.*, 2004).

Quando um problema de decisão envolve dados ou critérios não numéricos, os tomadores de decisão/especialistas podem ter dúvidas sobre sua opinião, ou seja, é um processo onde pode existir incerteza. Para resolver a imprecisão, ambiguidade e subjetividade do julgamento humano, a teoria dos conjuntos *fuzzy* foi proposta por Zadeh (1965).

Como as avaliações linguísticas apenas aproximam o julgamento subjetivo dos tomadores de decisão, pode-se considerar as funções de pertinência trapezoidais lineares adequadas para capturar a imprecisão dessas avaliações linguísticas (DELGADO *et al.*, 1998; HERRERA; HERRERA-VIEDMA, 2000). Em suma, a teoria dos conjuntos difusos oferece uma maneira matematicamente precisa de modelar preferências vagas (KABIR, 2014).

Um número difuso trapezoidal pode ser definido como: $\{(a_1, a_2, a_3, a_4) | a_1, a_2, a_3, a_4 \in R; a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4\}$, que denota respectivamente os menores, mais promissores e maiores valores possíveis (Figura17) (GIRUBHA; VINODH, 2012).



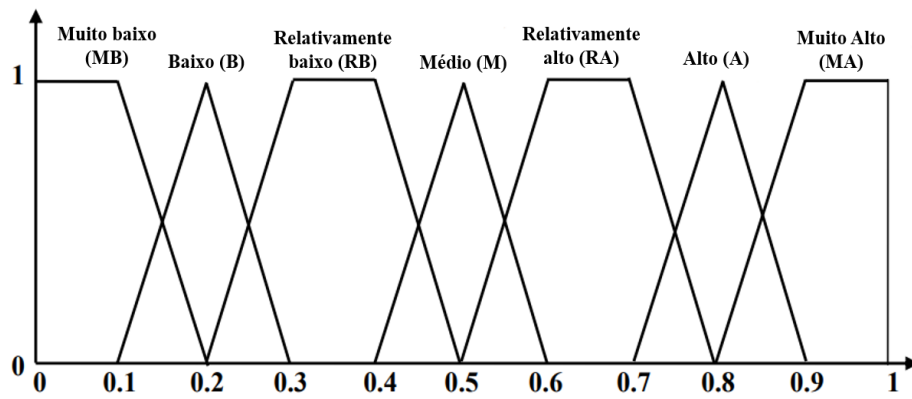
Fonte: adaptado de Girubha e Vinodh (2012); Kabir (2014)

A função pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é definida pela equação (22).

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1, \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x \leq a_2, \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3, \\ \frac{x - a_4}{a_3 - a_4} & a_3 \leq x \leq a_4, \\ 0 & x > a_4, \end{cases} \quad (22)$$

O procedimento para obtenção dos valores dos CSM, através de variáveis linguísticas *fuzzy* trapezoidal, deve seguir as seguintes etapas:

Etapas 1. Os especialistas devem realizar julgamento para cada um dos materiais, utilizando os termos linguísticos *fuzzy* trapezoidal positiva, apresentados na Figura18 (SANAYEI; FARID MOUSAVI; YAZDANKHAH, 2010; YÜCENUR; DEMIREL, 2012).

Figura18 – Variáveis linguísticas utilizadas na avaliação

Fonte: Adaptado de Kabir (2014)

Com base nas informações apresentadas na Figura18, a Tabela 1 é gerada.

Tabela 1 – Variáveis linguísticas e número fuzzy trapezoidal correspondente

Variável linguística	Abrev.	Número Fuzzy
Muito baixo	MB	(0; 0;0,1; 0,2)
Baixo	B	(0,1; 0,2; 0,2; 0,3)
Relativamente baixo	RB	(0,2; 0,3; 0,4; 0,5)
Médio	M	(0,4; 0,5; 0,5; 0,6)
Relativamente alta	RA	(0,5; 0,6; 0,7; 0,8)
Alto	A	(0,7; 0,8; 0,8; 0,9)
Muito alto	MA	(0,8; 0,9; 1; 1)

Fonte: Kabir (2014)

Etapa 2. Seja a avaliação fuzzy para o critério de importância do k-enésimo tomador de decisão: $\tilde{x}_{ijk} = (x_{ijk1}, x_{ijk2}, x_{ijk3}, x_{ijk4})$; $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$, respectivamente. Portanto, os julgamentos $\tilde{x}_{ij}$ de cada especialista, para cada material, são agregados, utilizando a equação (23):

$$X_{ij} = \{X_{ij1}; X_{ij2}; X_{ij3}; X_{ij4}\} \quad (23)$$

Onde,

$$X_{ij1} = \min\{x_{ijk1}\}$$

$$X_{ij2} = \frac{1}{k} \sum x_{ijk2}$$

$$X_{ij3} = \frac{1}{k} \sum x_{ijk3}$$

$$X_{ij4} = \max\{x_{ijk4}\}$$

Etapa 3. Esta etapa deve ser realizada somente quando forem empregados materiais de construção dispostos em camadas. Para obter a avaliação do conjunto de

materiais, realiza-se a média dos resultados gerados na Etapa 2. A seguir, serão apresentadas as operações aritméticas com números *fuzzy*.

Se $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ e $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ são dois números *fuzzy* trapezoidal positivo, e κ um número *crisp*, as operações aritméticas que envolvem estes números podem ser definidas da seguinte forma:

- Adição

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3, a_4 + b_4) \quad (24)$$

$$\tilde{A} + \kappa = (a_1 + \kappa, a_2 + \kappa, a_3 + \kappa, a_4 + \kappa) \quad (25)$$

- Subtração

$$\tilde{A} \ominus \tilde{B} = (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_3 - b_3, a_4 - b_4) \quad (26)$$

$$\tilde{A} - \kappa = (a_1 - \kappa, a_2 - \kappa, a_3 - \kappa, a_4 - \kappa) \quad (27)$$

- Multiplicação

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (a_1 \times b_1, a_2 \times b_2, a_3 \times b_3, a_4 \times b_4) \quad (28)$$

$$\tilde{A} \times \kappa = \begin{cases} (a_1 \times \kappa, a_2 \times \kappa, a_3 \times \kappa, a_4 \times \kappa) & \text{se } \kappa \geq 0 \\ (a_1 \times \kappa, a_2 \times \kappa, a_3 \times \kappa, a_4 \times \kappa) & \text{se } \kappa < 0 \end{cases} \quad (29)$$

- Divisão

$$\tilde{A} \oslash \tilde{B} = (a_1/b_1, a_2/b_2, a_3/b_3, a_4/b_4) \quad (30)$$

$$\tilde{A}/\kappa = \begin{cases} (a_1/\kappa, a_2/\kappa, a_3/\kappa, a_4/\kappa) & \text{se } \kappa > 0 \\ (a_1/\kappa, a_2/\kappa, a_3/\kappa, a_4/\kappa) & \text{se } \kappa < 0 \end{cases} \quad (31)$$

Por exemplo, caso pretenda-se utilizar na construção do forno, aço inoxidável AISI 316 L e manta isolante de lã de rocha. Os resultados da etapa 2, para cada material, deverão ser somados, utilizando a equação (24), e posteriormente dividido pelo número *crisp* (k), que representa a quantidade de materiais utilizados, empregando a equação (31).

Etapa 4. Defuzzificação dos valores dos CSM é realizada utilizando a equação (32):

$$Defuzz(X_{ij}) = \frac{-x_{ij1}x_{ij2} + x_{ij3}x_{ij4} + \frac{1}{3}(x_{ij4} - x_{ij3})^2 - \frac{1}{3}(x_{ij2} - x_{ij1})^2}{-x_{ij1} - x_{ij2} + x_{ij3} + x_{ij4}} \quad (32)$$

Os resultados dos valores dos CSM *crisp*, para cada material participante do processo de seleção, juntamente aos demais CSM, irão compor a matriz de decisão para implementação do método MCDM.

3.3 Seleção dos materiais para construção do forno

Conforme a Figura 10, a seleção dos materiais para construção do forno representa a última etapa da metodologia proposta neste estudo. A seguir, são apresentados os detalhes desta etapa.

3.3.1 Ranqueamento dos materiais

Para o ranqueamento dos materiais que participaram do processo de seleção de materiais para construção do forno de carbonização, foi utilizado o MCDM TOPSIS estendido. As etapas deste método são apresentadas na seção 2.4.1 (JAHAN; BAHRAMINASAB; EDWARDS, 2012).

3.3.2 Análise de sensibilidade

Para avaliar a eficiência da abordagem proposta, foi realizada a análise de sensibilidade do resultado obtido. Especificamente, foi avaliado o impacto da variação dos pesos dos CSM na mudança de classificação da primeira alternativa de material. Para isso, foi utilizado o método proposto em Diaby e Goeree (2014).

Nesse sentido, os pesos de cada CSM foram variados entre 0 e 100%, em intervalos de 10%. Para cada variação, o método TOPSIS estendido foi aplicado, gerando novas classificações de materiais.

As etapas da análise de sensibilidade são:

Etapa 1. Definir qual CSM (C_n) sofrerá variação, ou seja, receberá novos valores ($W_{n\alpha}$), variando de 0 a 1.

Etapa 2. Calcular o novo peso proporcional ($W_{n\beta}$) para os demais CSM, utilizando a equação (33):

$$W_{n\beta} = (1 - W_{n\alpha}) * \frac{W_{\beta}}{(1 - W_{\alpha})} \quad (33)$$

onde W_n representa o peso inicial do MSC n , e W_{β} representa o peso calculado, utilizando passos propostos pela metodologia.

Etapa 3. Aplicar os novos pesos obtidos no método TOPSIS estendido para o cálculo dos novos coeficientes de proximidade (C_i) e definição do ranking.

Etapa 4. Plotar os gráficos com a variação CSM e os novos valores de (C_i) para fazer a análise da variação do ranking.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para atender os objetivos do estudo, foi realizado um exemplo de aplicação da metodologia proposta. Além da classificação dos materiais que farão parte do processo de seleção, também foi avaliada a influência do emprego de materiais isolantes e condutores térmicos, bem como possíveis combinações entre eles, pelo emprego de diferentes configurações de materiais do forno.

4.1 Cenário para aplicação da metodologia

Para aplicação da metodologia de seleção de materiais para fornos de produção de carvão vegetal foi utilizado um projeto de forno com geometria cilíndrica e com teto semiesférico. Neste processo, foram avaliados materiais metálicos, cerâmicos e algumas combinações entre eles.

Devido à necessidade computacional para realizar os cálculos e a complexidade da modelagem matemática, não foram consideradas possíveis intempéries (fluxo direto de radiação solar sobre a face externa da parede, chuva e/ou vento), bem como a fluidodinâmica dos gases, a cinética e as reações termoquímicas ocorridas no interior do forno devido ao processo de carbonização da madeira. Além disso, todas essas variáveis foram substituídas por condições térmicas impostas em termos de um fluxo de calor variável com o tempo aplicado na face interna da parede do forno, observando a temperatura máxima de 400°C permitida na superfície. Também optou-se por não considerar a troca térmica com o chão, sendo a superfície inferior da parede do forno adiabática. Ainda, a temperatura ambiente utilizada foi constante.

4.1.1 Definição dos materiais que participarão do processo de seleção

O processo de definição dos materiais que participarão do processo de seleção, a primeira fase da metodologia proposta (Figura 10), é constituída de três etapas: i) Projeto dimensional; ii) Configuração dos materiais do forno; e iii) Triagem dos materiais. Neste exemplo de aplicação, o processo foi iniciado pela Triagem dos materiais, seguida pela definição das configurações dos materiais do forno e, por fim, o projeto dimensional do forno.

- *Triagem*

Por meio de pesquisa em diferentes fontes de propriedades de materiais e utilizando o fluxograma apresentado na Figura 12, um conjunto de 10 materiais foram selecionados. No Apêndice B encontra-se a tabela com os materiais que participaram do processo de seleção e suas propriedades.

Para facilitar a compreensão, os materiais metálicos estão identificados com a letra (M); e os cerâmicos/isolantes, identificados pela letra (I).

- *Configuração dos materiais*

Foram avaliadas três configurações de materiais diferentes (I, II e III), conforme apresentado na Figura 13. A Tabela 2 apresenta os materiais, suas respectivas siglas e configurações de materiais que foram utilizadas.

Tabela 2 – Materiais e configurações utilizadas no processo de seleção

Materiais	Sigla	Configuração
Aço AISI 1020	M1	I
Aço inoxidável AISI 316 L	M2	I
Nimonic 75	M3	I
Incoloy 800	M4	I
Tijolo maciço (argila comum)	I1	I
Tijolo-refratário maciço (48-52% Al_2O_3 , 40 a 44% SiO_2)	I2	I
Tijolo isolante maciço (40% Al_2O_3 , 57% SiO_2 , 0,8% Fe_2O_3)	I3	I
Argamassa com cimento, areia e pedra	I4	I
Aço AISI 1020 + Manta cerâmica	M1+I5	II
Aço AISI 1020 + Manta lã de rocha	M1+I6	II
Aço inoxidável AISI 316 L+ Manta cerâmica	M2+I5	II
Aço inoxidável AISI 316 L + Manta lã de rocha	M2+I6	II
Nimonic 75+ Manta cerâmica	M3+I5	II
Nimonic 75 + Manta lã de rocha	M3+I6	II
Aço AISI 1020+ Manta cerâmica	M1+I5	III
Aço AISI 1020 + Manta lã de rocha	M1+I6	III
Aço inoxidável AISI 316 L+ Manta cerâmica	M2+I5	III
Aço inoxidável AISI 316 L + Manta lã de rocha	M2+I6	III
Nimonic 75+ Manta cerâmica	M3+I5	III
Nimonic 75 + Manta lã de rocha	M3+I6	III

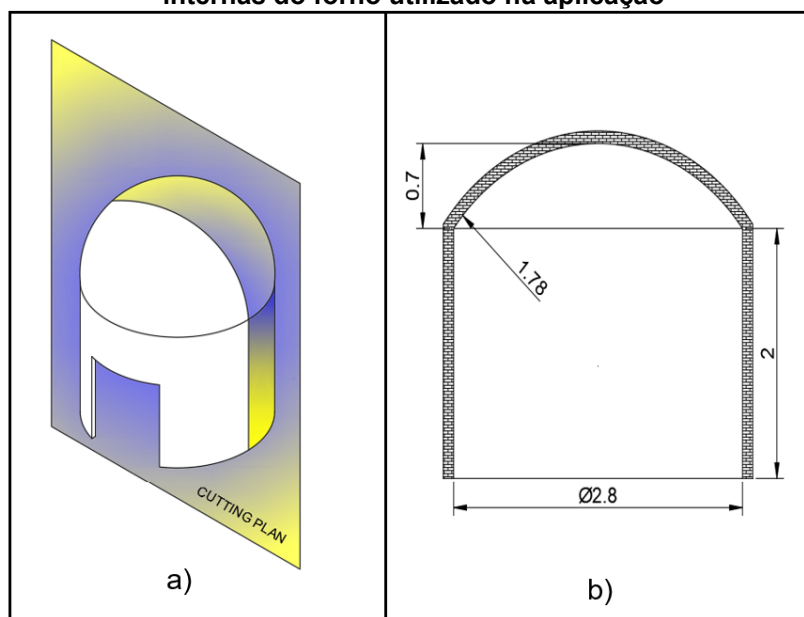
Fonte: Autoria própria (2023)

Foram empregadas diferentes configurações (II e III) para os mesmos materiais, com o objetivo de avaliar se estas configurações influenciam na classificação dos materiais quando o processo de seleção proposto neste estudo é utilizado.

- Projeto dimensional

No projeto dimensional foi considerado um forno com formato de parede cilíndrica e teto semiesférico, com dimensões internas conforme a Figura 19 (dimensões em metro). As dimensões externas do forno variaram conforme a espessura dos materiais utilizados. A escolha do formato do forno ocorreu devido à semelhança com os fornos comumente utilizados no Brasil (OLIVEIRA, 2012; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019a).

Figura 19 – a) Perspectiva do forno, indicando o plano de corte; b) Corte com as dimensões internas do forno utilizado na aplicação



Fonte: Autoria própria (2023)

4.1.2 Definição dos critérios de seleção dos materiais, pesos e valores

Os CSM já foram definidos na seção 3.2.1. Eles serão os mesmos para todas as aplicações futuras da metodologia. Cabe destacar que, os valores dos pesos dos CSM podem ser alterados, caso o usuário queira realizar nova consulta de julgamento com especialistas. No entanto, os valores dos CSM precisam ser calculados para cada novo projeto de forno que pretende avaliar.

4.1.2.1 Determinar os valores dos pesos dos critérios de seleção dos materiais

Para determinar os valores dos pesos dos CSM, foram realizadas as etapas apresentadas na seção 3.2.2.

- Determinar o grau de importância entre os requisitos dos clientes

Para realizar esta etapa, foi empregado o método DEMATEL revisado (LEE *et al.*, 2013). Inicialmente, utilizando uma escala crescente de valores entre 0 e 4, especialistas julgaram o grau de importância existente entre os RC (0 representa nenhuma influência e 4 influencia muito).

A consulta aos especialistas ocorreu por meio de um formulário criado no *Google Forms* (Apêndice D - questionário I), enviado por e-mail. O Quadro 3 apresenta as formações acadêmicas e as áreas de atuação dos especialistas que contribuíram respondendo o questionário.

Quadro 3 – Perfis dos especialistas que realizaram o julgamento do questionário I e II

	Formações e Experiências dos Especialistas
Esp. 1	Engenheiro Florestal, Mestre e Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira. É Professor do Magistério Superior da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA); é docente permanente no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia (PPGCF/UFRA) e no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Lavras (PPGCTM/UFLA), Tem experiência na área de Energia da Biomassa Lignocelulósica e Desenvolvimento Tecnológico da Produção Sustentável de Carvão Vegetal e Lenha.
Esp. 2	Possui graduação em Engenharia Florestal, Mestrado e Doutorado em Ciência Florestal. Professor da Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia Florestal. É Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais (PPGCFA-UFMT). Tem experiência na área de energia da biomassa florestal e aproveitamento de resíduos, secagem da madeira e tecnologia da madeira.
Esp. 3	Graduado em Engenharia Florestal, mestrado e doutorado em Ciência Florestal e pós-doutorado em Engenharia Florestal. Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de Lavras. Atuando especificamente nos temas relacionados à qualidade da madeira e do carvão vegetal, tensões de crescimento, amostragem da madeira e técnicas de avaliação não destrutivas.

Fonte: Autoria própria (2023)

Com o retorno dos questionários preenchidos com os julgamentos dos especialistas, a Equação (6) é utilizada para agregar os julgamentos, gerando a matriz (A) (Tabela 3).

Tabela 3 – Matriz A de importância entre os RC

	<i>RC₁</i>	<i>RC₂</i>	<i>RC₃</i>	<i>RC₄</i>	<i>RC₅</i>	<i>RC₆</i>	<i>RC₇</i>	<i>RC₈</i>	<i>RC₉</i>	<i>RC₁₀</i>	<i>RC₁₁</i>	<i>RC₁₂</i>	<i>RC₁₃</i>
<i>RC₁</i>	0,000	4,000	3,333	2,667	2,667	3,000	2,000	1,333	3,000	3,000	2,333	2,667	2,667
<i>RC₂</i>	3,667	0,000	3,333	2,000	2,000	2,000	1,333	1,000	2,667	2,667	2,000	2,333	2,333
<i>RC₃</i>	3,667	3,667	0,000	2,000	2,000	2,000	1,000	1,000	2,667	2,667	2,000	2,333	2,333
<i>RC₄</i>	1,333	1,333	1,333	0,000	2,000	2,333	2,000	1,333	3,000	3,000	2,667	3,000	3,000
<i>RC₅</i>	1,000	1,667	2,000	3,000	0,000	2,667	1,667	1,333	3,333	3,333	2,333	2,667	2,667
<i>RC₆</i>	2,333	2,333	2,667	3,333	2,667	0,000	2,000	1,667	3,667	3,667	2,333	2,667	2,667
<i>RC₇</i>	0,667	1,000	0,667	2,000	1,333	2,333	0,000	1,000	2,000	2,000	1,333	2,000	2,000
<i>RC₈</i>	1,000	1,000	1,333	2,000	2,333	2,667	1,333	0,000	3,333	3,333	2,333	2,333	2,333
<i>RC₉</i>	2,333	2,667	2,333	2,667	2,333	3,000	2,333	1,333	0,000	3,667	2,333	2,667	3,667
<i>RC₁₀</i>	2,667	2,667	3,000	3,333	2,667	3,000	2,333	1,333	4,000	0,000	2,333	3,000	3,667
<i>RC₁₁</i>	1,000	0,667	0,667	1,667	1,000	0,667	1,667	0,667	2,000	2,000	0,000	1,667	1,667
<i>RC₁₂</i>	1,000	1,000	1,000	1,667	1,333	1,333	1,333	0,667	2,333	2,333	2,000	0,000	2,000
<i>RC₁₃</i>	1,333	1,333	1,333	2,000	1,667	1,667	1,667	0,667	2,333	2,333	1,333	2,333	0,000

Fonte: Autoria própria (2023)

Em seguida, a matriz (A) foi normalizada, utilizando a equação (7), gerando a matriz (X) (Tabela 4).

Tabela 4 – Matriz normalizada X

	<i>RC₁</i>	<i>RC₂</i>	<i>RC₃</i>	<i>RC₄</i>	<i>RC₅</i>	<i>RC₆</i>	<i>RC₇</i>	<i>RC₈</i>	<i>RC₉</i>	<i>RC₁₀</i>	<i>RC₁₁</i>	<i>RC₁₂</i>	<i>RC₁₃</i>
<i>RC₁</i>	0,000	0,117	0,097	0,078	0,078	0,087	0,058	0,039	0,087	0,087	0,068	0,078	0,078
<i>RC₂</i>	0,107	0,000	0,097	0,058	0,058	0,058	0,039	0,029	0,078	0,078	0,058	0,068	0,068
<i>RC₃</i>	0,107	0,107	0,000	0,058	0,058	0,058	0,029	0,029	0,078	0,078	0,058	0,068	0,068
<i>RC₄</i>	0,039	0,039	0,039	0,000	0,058	0,068	0,058	0,039	0,087	0,087	0,078	0,087	0,087
<i>RC₅</i>	0,029	0,049	0,058	0,087	0,000	0,078	0,049	0,039	0,097	0,097	0,068	0,078	0,078
<i>RC₆</i>	0,068	0,068	0,078	0,097	0,078	0,000	0,058	0,049	0,107	0,107	0,068	0,078	0,078
<i>RC₇</i>	0,019	0,029	0,019	0,058	0,039	0,068	0,000	0,029	0,058	0,058	0,039	0,058	0,058
<i>RC₈</i>	0,029	0,029	0,039	0,058	0,068	0,078	0,039	0,000	0,097	0,097	0,068	0,068	0,068
<i>RC₉</i>	0,068	0,078	0,068	0,078	0,068	0,087	0,068	0,039	0,000	0,107	0,068	0,078	0,107
<i>RC₁₀</i>	0,078	0,078	0,087	0,097	0,078	0,087	0,068	0,039	0,117	0,000	0,068	0,087	0,107
<i>RC₁₁</i>	0,029	0,019	0,019	0,049	0,029	0,019	0,049	0,019	0,058	0,058	0,000	0,049	0,049
<i>RC₁₂</i>	0,029	0,029	0,029	0,049	0,039	0,039	0,039	0,019	0,068	0,068	0,058	0,000	0,058
<i>RC₁₃</i>	0,039	0,039	0,039	0,058	0,049	0,049	0,049	0,019	0,068	0,068	0,039	0,068	0,000

Fonte: Autoria própria (2023)

Na sequência, a equação (9) é aplicada para construção da matriz (T) de relação (Tabela 5).

Tabela 5 – Matriz *T* de relação

	<i>RC</i> ₁	<i>RC</i> ₂	<i>RC</i> ₃	<i>RC</i> ₄	<i>RC</i> ₅	<i>RC</i> ₆	<i>RC</i> ₇	<i>RC</i> ₈	<i>RC</i> ₉	<i>RC</i> ₁₀	<i>RC</i> ₁₁	<i>RC</i> ₁₂	<i>RC</i> ₁₃
<i>RC</i> ₁	0,157	0,270	0,251	0,025	0,231	0,255	0,193	0,126	0,302	0,299	0,227	0,264	0,276
<i>RC</i> ₂	0,230	0,140	0,226	0,001	0,189	0,201	0,153	0,103	0,257	0,255	0,192	0,224	0,234
<i>RC</i> ₃	0,245	0,253	0,153	0,089	0,206	0,220	0,160	0,113	0,281	0,279	0,211	0,246	0,257
<i>RC</i> ₄	0,163	0,169	0,168	0,000	0,187	0,209	0,173	0,112	0,266	0,263	0,209	0,242	0,252
<i>RC</i> ₅	0,162	0,185	0,192	0,066	0,139	0,224	0,169	0,115	0,283	0,281	0,207	0,241	0,252
<i>RC</i> ₆	0,217	0,225	0,231	0,061	0,232	0,175	0,195	0,136	0,319	0,317	0,228	0,266	0,278
<i>RC</i> ₇	0,110	0,124	0,114	0,063	0,134	0,170	0,086	0,083	0,190	0,188	0,137	0,173	0,180
<i>RC</i> ₈	0,153	0,159	0,167	0,055	0,195	0,216	0,154	0,074	0,273	0,271	0,200	0,223	0,233
<i>RC</i> ₉	0,213	0,230	0,219	0,051	0,219	0,251	0,200	0,124	0,217	0,311	0,223	0,261	0,297
<i>RC</i> ₁₀	0,232	0,241	0,246	0,055	0,238	0,262	0,209	0,130	0,336	0,229	0,234	0,282	0,311
<i>RC</i> ₁₁	0,103	0,099	0,098	0,049	0,108	0,108	0,117	0,064	0,166	0,164	0,082	0,144	0,150
<i>RC</i> ₁₂	0,117	0,122	0,120	0,044	0,130	0,139	0,120	0,071	0,193	0,191	0,151	0,113	0,175
<i>RC</i> ₁₃	0,135	0,141	0,140	0,046	0,149	0,159	0,137	0,077	0,207	0,205	0,144	0,189	0,133

Fonte: Autoria própria (2023)

Os vetores D_i e R_j são obtidos por meio das equações (10) e (11), respectivamente. Os pesos dos RC foram obtidos pela normalização do vetor ($D_i + R_j$), em que a soma dos pesos normalizados é igual a 1 (Tabela 6).

Tabela 6 – Pesos dos RC

	R_j	D_i	$(R_j + D_i)$	$(R_j - D_i)$	Pesos RC/ $(R_j + D_i)$ normalizado
<i>RC</i> ₁	2,8755	2,2365	5,112	0,639	0,083
<i>RC</i> ₂	2,4053	2,3581	4,763	0,047	0,077
<i>RC</i> ₃	2,7131	2,3260	5,039	0,387	0,082
<i>RC</i> ₄	2,4130	0,6065	3,019	1,807	0,049
<i>RC</i> ₅	2,5169	2,3583	4,875	0,159	0,079
<i>RC</i> ₆	2,8797	2,5903	5,470	0,289	0,089
<i>RC</i> ₇	1,7517	2,0654	3,817	-0,314	0,062
<i>RC</i> ₈	2,3730	1,3286	3,702	1,044	0,060
<i>RC</i> ₉	2,8180	3,2891	6,107	-0,471	0,099
<i>RC</i> ₁₀	3,0050	3,2518	6,257	-0,247	0,102
<i>RC</i> ₁₁	1,4524	2,4458	3,898	-0,993	0,063
<i>RC</i> ₁₂	1,6872	2,8681	4,555	-1,181	0,074
<i>RC</i> ₁₃	1,8609	3,0272	4,888	-1,166	0,079

Fonte: Autoria própria (2023)

- Determinar o grau de relacionamento entre os RC e os CSM

Para determinar o grau de relacionamento entre os RC e os CSM, foi utilizada a matriz interna do QFD, conforme detalhado na seção 3.2.2.2.

Novamente, especialistas (Quadro 3) foram consultados para mensurar a relação entre RC e CSM por meio do questionário II, apresentado no apêndice D. O questionário foi construído no *Google Forms* e enviado para os especialistas por e-mail.

Para agregar os julgamentos dos especialistas foi utilizada a média aritmética dos julgamentos, gerando a matriz Y (Tabela 7).

Tabela 7 – Matriz Y de relacionamento entre RC e CSM

	CSM ₁	CSM ₂	CSM ₃	CSM ₄	CSM ₅	CSM ₆	CSM ₇	CSM ₈	CSM ₉	CSM ₁₀	CSM ₁₁	CSM ₁₂	CSM ₁₃	CSM ₁₄	CSM ₁₅
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RC ₁	9,00	9,00	5,00	8,00	7,00	3,00	4,00	4,00	7,00	5,33	3,67	3,67	6,33	5,33	5,33
RC ₂	8,00	5,00	6,00	9,00	6,00	4,00	4,00	4,00	4,33	4,33	4,33	2,67	4,33	4,33	4,33
RC ₃	9,00	2,00	6,00	9,00	6,00	2,33	2,33	2,33	6,00	4,00	4,00	3,33	4,33	4,00	4,00
RC ₄	3,00	3,00	3,00	3,00	1,00	5,00	5,00	4,00	4,00	8,00	7,00	3,00	6,33	7,00	7,00
RC ₅	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	6,00	5,00	5,00	6,00	6,00	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
RC ₆	3,00	5,00	3,00	3,00	1,00	6,00	4,00	4,00	6,00	5,33	4,33	7,00	8,00	6,00	6,00
RC ₇	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	6,00	3,33	3,33	5,33	6,00	5,00	3,33	5,33	7,00	8,00
RC ₈	1,00	1,00	2,00	1,00	4,00	3,00	3,33	3,00	4,33	3,00	2,33	4,00	6,00	5,00	5,00
RC ₉	5,00	7,00	5,00	4,33	3,00	4,00	4,00	3,00	9,00	8,00	5,33	6,00	9,00	6,33	7,00
RC ₁₀	6,00	8,00	5,33	6,00	3,33	5,00	4,00	3,00	9,00	5,33	4,00	5,00	9,00	7,00	7,00
RC ₁₁	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	5,00	8,00	8,00	2,33	3,00	3,00	2,00	4,00	8,00	8,00
RC ₁₂	3,00	3,00	3,00	3,00	1,33	6,00	6,00	6,00	8,00	7,00	4,33	4,33	9,00	9,00	9,00
RC ₁₃	3,00	3,33	3,00	3,33	1,00	4,00	6,00	6,00	7,00	7,00	3,67	4,33	8,00	9,00	9,00

Fonte: Autoria própria (2023)

- Determinar os pesos finais dos CSM

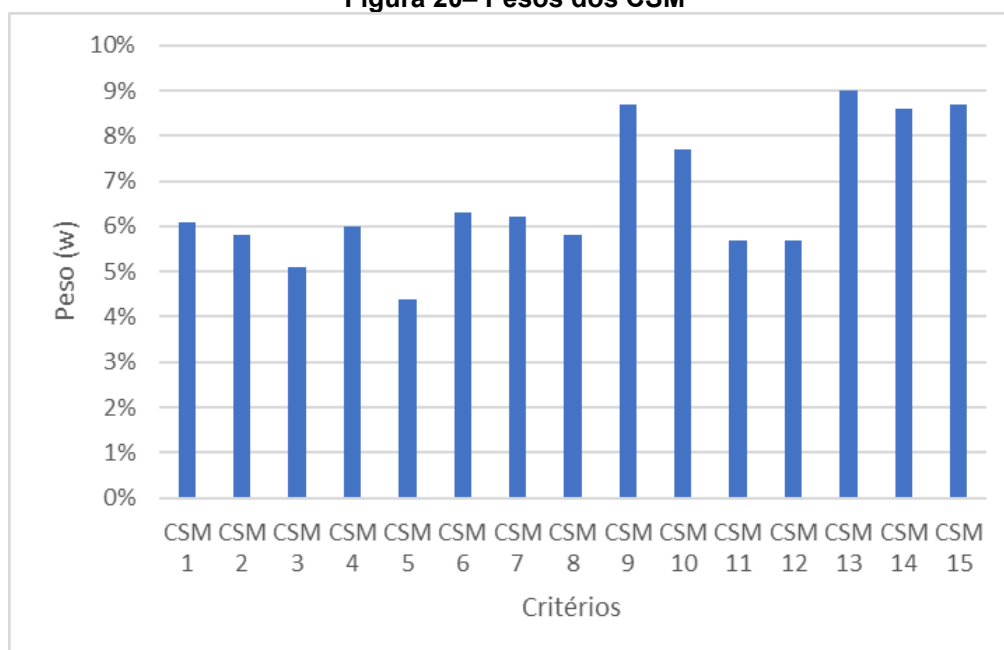
Os pesos finais dos CSM, os valores das relações apresentadas na Tabela 5, foram multiplicados pelos pesos normalizados dos RC (Tabela 6), obtendo assim a matriz (Y) (Tabela 8). Por fim, os valores finais dos pesos dos CSM foram obtidos pelo somatório e normalização dos pesos de cada coluna.

Tabela 8 – Matriz Y normalizada e pesos finais dos CSM

	CSM 1	CSM 2	CSM 3	CSM 4	CSM 5	CSM 6	CSM 7	CSM 8	CSM 9	CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>RC₁</i>	0,75	0,75	0,42	0,66	0,58	0,25	0,33	0,33	0,58	0,44	0,30	0,30	0,53	0,44	0,44
<i>RC₂</i>	0,62	0,39	0,46	0,70	0,46	0,31	0,31	0,31	0,34	0,34	0,34	0,21	0,34	0,34	0,34
<i>RC₃</i>	0,74	0,16	0,49	0,74	0,49	0,19	0,19	0,19	0,49	0,33	0,33	0,27	0,36	0,33	0,33
<i>RC₄</i>	0,15	0,15	0,15	0,15	0,05	0,25	0,25	0,20	0,20	0,39	0,34	0,15	0,31	0,34	0,34
<i>RC₅</i>	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,48	0,40	0,40	0,48	0,48	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
<i>RC₆</i>	0,27	0,44	0,27	0,27	0,09	0,53	0,36	0,36	0,53	0,47	0,39	0,62	0,71	0,53	0,53
<i>RC₇</i>	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,37	0,21	0,21	0,33	0,37	0,31	0,21	0,33	0,43	0,50
<i>RC₈</i>	0,06	0,06	0,12	0,06	0,24	0,18	0,20	0,18	0,26	0,18	0,14	0,24	0,36	0,30	0,30
<i>RC₉</i>	0,50	0,70	0,50	0,43	0,30	0,40	0,40	0,30	0,89	0,79	0,53	0,60	0,89	0,63	0,70
<i>RC₁₀</i>	0,61	0,81	0,54	0,61	0,34	0,51	0,41	0,31	0,92	0,54	0,41	0,51	0,92	0,71	0,71
<i>RC₁₁</i>	0,06	0,06	0,06	0,06	0,25	0,32	0,51	0,51	0,15	0,19	0,19	0,13	0,25	0,51	0,51
<i>RC₁₂</i>	0,22	0,22	0,22	0,22	0,10	0,44	0,44	0,44	0,59	0,52	0,32	0,32	0,67	0,67	0,67
<i>RC₁₃</i>	0,24	0,26	0,24	0,26	0,08	0,32	0,48	0,48	0,56	0,56	0,29	0,34	0,64	0,72	0,72
Peso (w)	0,061	0,058	0,051	0,060	0,044	0,063	0,062	0,058	0,087	0,077	0,057	0,057	0,090	0,086	0,087

Fonte: Autoria própria (2023)

Com os valores dos pesos dos CSM apresentados na Tabela 8 foi gerado o gráfico apresentado na Figura 20.

Figura 20– Pesos dos CSM

Fonte: Autoria própria (2023)

Para os especialistas consultados, o CSM 13 (resistência a corrosão) foi o critério com o maior peso (9%), e CSM 5 (massa total dos materiais) foi o critério com menor peso (4,4%).

4.1.2.2 Determinar os valores dos critérios de seleção dos materiais

Conforme Figura16, os CSM foram classificados em numéricos e não numéricos. Os CSM numéricos são classificados em: i) Parâmetros de desempenho térmico; e ii) Analíticos. Já os CSM não numéricos são os Termos linguísticos *fuzzy*.

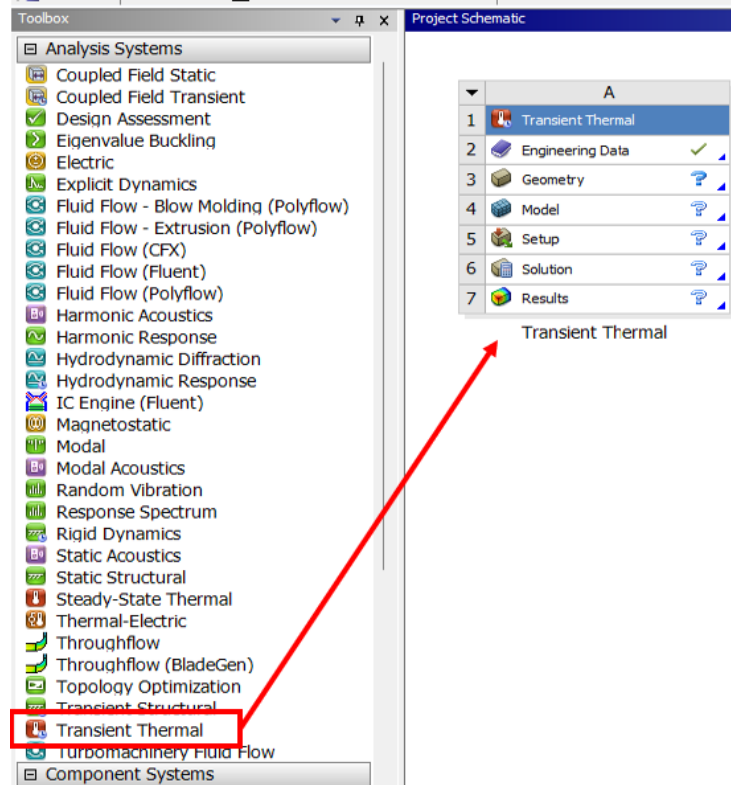
O modo de obtenção de cada CSM, para o exemplo de aplicação, será apresentado a seguir.

- Critério de seleção de materiais - Parâmetros de desempenho térmico

Os CSM denominados parâmetros de desempenho térmico são: Tempo da fase de aquecimento (CSM1), Tempo da fase de resfriamento (CSM2), Calor dissipado na fase de aquecimento (CSM3) e Calor fornecido na fase de aquecimento (CSM4). A modelagem para determinar cada um destes parâmetros é apresentada na seção 3.2.3.1. A seguir, apresentam-se as etapas para implementação da modelagem na plataforma de simulação ANSYS Workbench 2021/R1:

Inicialmente, no software ANSYS *Workbench*, o módulo de simulação *Transient Thermal* é inserido na área de projeto, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Inserção do módulo *Transient Thermal* na área de projeto do ANSYS Workbench



Fonte: Autoria própria (2023)

Etapa 1. Em *Engineering Data* foram cadastrados os materiais que não estão disponíveis no banco de dados do software (ver Apêndice B).

Etapa 2. Realização da modelagem do forno, considerando as dimensões da Figura 19 (b) e as espessuras dos materiais apresentadas na Tabela 9.

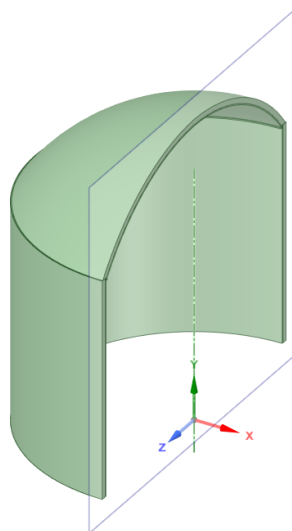
Tabela 9 – Espessura dos materiais utilizados na simulação

Materiais	Sigla	Espessura (mm)
Aço AISI 1020	M1	10
Aço inoxidável AISI 316 L	M2	10
Nimonic 75	M3	10
Incoloy 800	M4	10
Tijolo maciço (argila comum)	I1	100
Tijolo-refratário maciço (48-52% Al_2O_3 , 40 a 44% SiO_2)	I2	100
Tijolo isolante maciço (40% Al_2O_3 , 57% SiO_2 , 0,8% Fe_2O_3)	I3	100
Argamassa com cimento, areia e pedra	I4	100
Manta cerâmica	I5	50
Manta lã de rocha	I6	50

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 22 mostra o modelo do forno, em corte, utilizado no exemplo de aplicação. O modelo foi criado utilizando o módulo *SpaceClaim/ANSYS*.

Figura 22 – Modelo do forno realizado no módulo *Geometry/ANSYS*

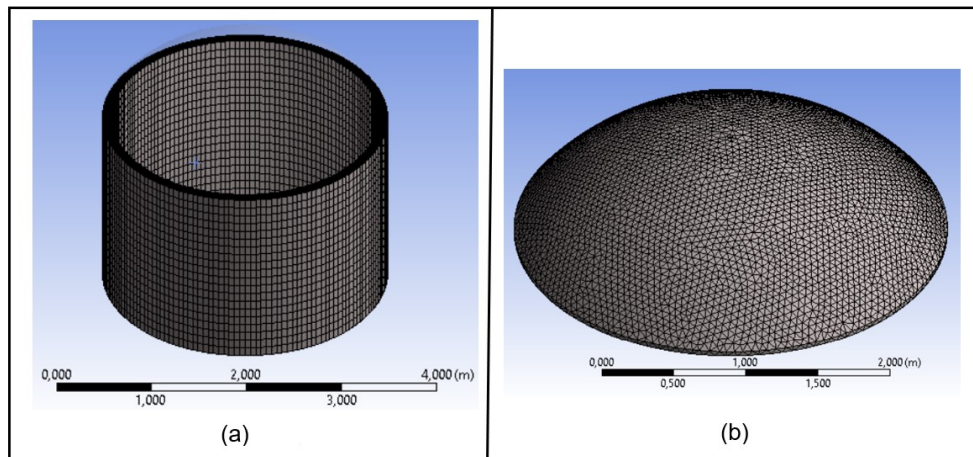


Fonte: Autoria própria (2023)

Etapa 3. Ao acessar o módulo *Molde*, foi iniciado o *Multiple Systems Mechanical/ANSYS*. O modelo 3D, criado na etapa anterior, migra automaticamente para este sistema. Assim, foi preciso definir os materiais para cada componente do modelo criado.

Etapa 4. Geração das malhas dos modelos. O processo de criação das malhas para os modelos encontra-se no Apêndice C. A Figura 23 apresenta um exemplo de malhas geradas para os modelos da parede e do teto do forno.

Figura 23 – Exemplo de malhas empregadas no estudo: (a) parede do forno; (b) teto do forno



Fonte: Autoria própria (2023)

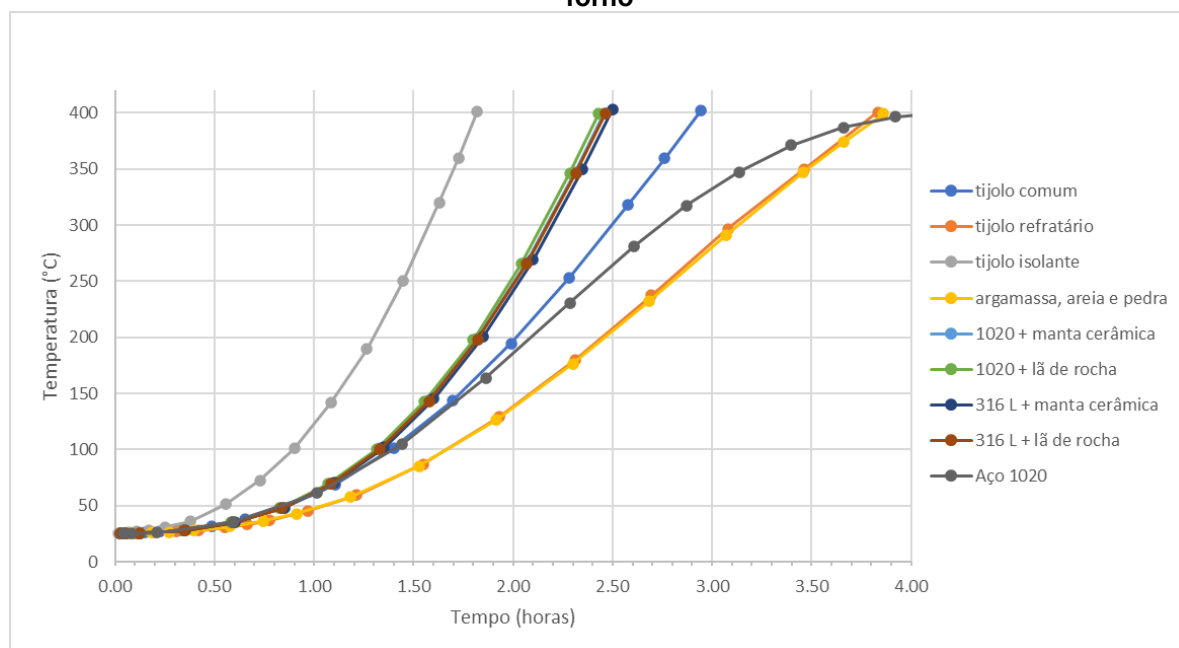
Etapa 5. Definição das condições de contorno utilizadas na simulação térmica transiente na fase de aquecimento.

Conforme abordado na seção 3.2.3.1, o parâmetro de duração da fase de aquecimento (Δt) (CSM1) define o desenvolvimento do perfil de $q''_{0(t)}$, que é o calor

fornecido na fase de aquecimento (CSM4), obtido pela equação (16). Assim, com a definição da curva do fluxo de calor instantâneo para determinado(s) material(is) de construção do forno, o *Step End Time*, dentro do *Analysis Setting*, na árvore do programa, foi variado até a temperatura na superfície interna do forno atingir 400°C. As demais configurações do *Analysis Setting* não sofreram alterações.

As curvas da fase de aquecimento, obtidas por simulação, de alguns materiais utilizados no exemplo de aplicação, são apresentadas na Figura 24.

Figura 24 – Curvas da fase de aquecimento para alguns materiais utilizados na construção do forno

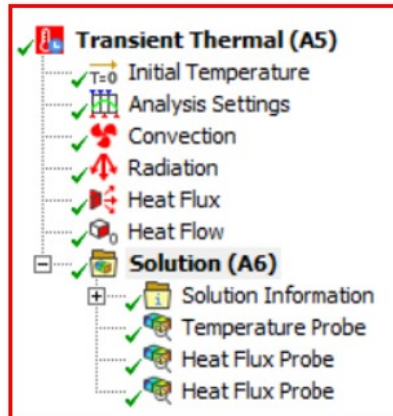


Fonte: Autoria própria (2023)

Dos materiais metálicos, somente a curva do aço foi plotada, pois as curvas da fase de aquecimento dos demais materiais metálicos comportam-se de forma semelhante.

A Figura 25 mostra a árvore de hierarquia do grupo de análise *transient thermal* utilizada na fase de aquecimento.

Figura 25 – Árvore de hierarquia utilizada nas simulações módulo *Thermal/Mechanical Transient* do ANSYS, para etapa de aquecimento



Fonte: Autoria própria (2023)

As condições de contorno utilizadas na simulação da fase são apresentas no Quadro 4.

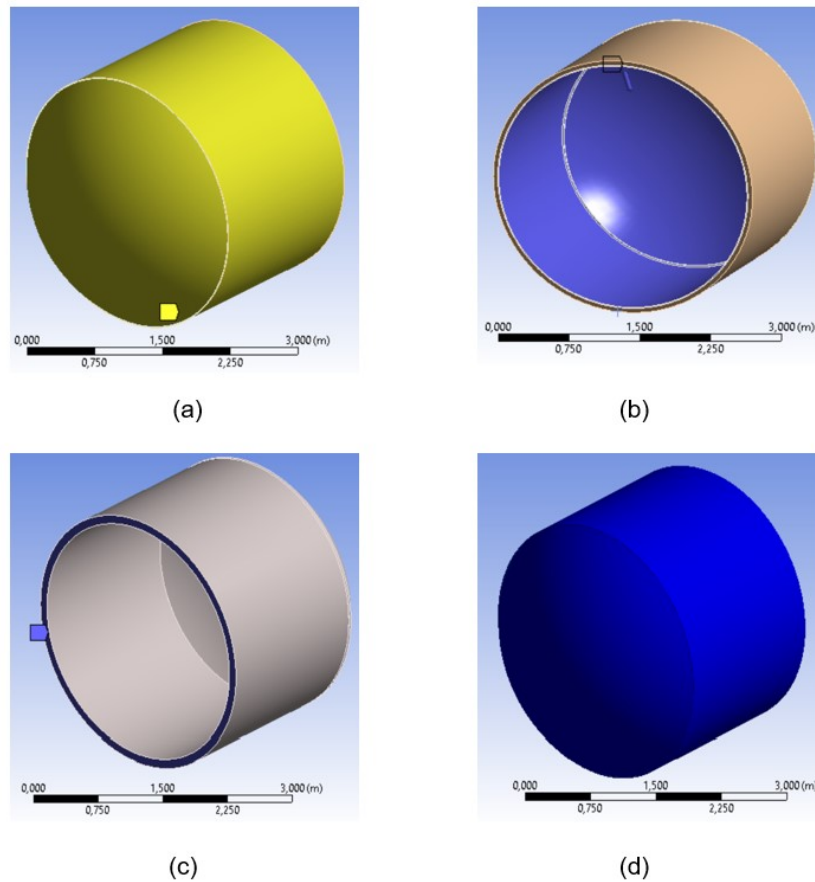
Quadro 4 – Critérios Condições de contorno utilizadas nas simulações na fase de aquecimento

Condição de contorno	Local na árvore de hierarquia	Valor	Região do forno
Temperatura ambiente	<i>Initial temperature</i>	25 °C	-
Tempo de simulação	<i>Analysis Setting</i>	Variável	-
Coeficiente de calor por convecção	<i>Convection</i>	5 W/m ² K	Em toda a superfície externa do forno Figura 26 (a)
Fluxo de calor	<i>Heat flux</i>	Variável no tempo	Em toda a superfície interna do forno Figura 26(b)
Taxa de calor	<i>Heat flow</i>	0 W	Superfície em destaque na Figura 26(c)
Emissividade	<i>Radiation</i>	Depende do material	Superfície externa do forno Figura 26(d)

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 26 mostra as regiões do modelo do forno onde foram adicionadas as condições de contorno utilizadas nas simulações da fase de aquecimento.

Figura 26 – Regiões de atuação das condições de contorno na fase na aquecimento



Fonte: Autoria própria (2023)

Após a definição das condições de contorno, foram escolhidas as soluções/resultados que seriam geradas pelo programa, relacionadas às suas respectivas superfícies (Quadro 5).

Quadro 5 – Critérios Tipos de soluções utilizadas na simulação

Solução	Local na árvore de hierarquia	Tipo	Região do forno
Fluxo de calor/teto	<i>Heat flux 1</i>	Sonda/direção Y	Superfície externa do teto do forno.
Fluxo de calor/parede	<i>Heat flux 1</i>	Sonda/direção X	Superfície externa da parede do forno.
Temperatura/parede	<i>Temperature probe</i>	Sonda	Superfície interna da parede do forno

Fonte: Autoria própria (2023)

Com os resultados dos fluxos instantâneos de calor na parte externa da parede e do teto do forno, foi calculada a quantidade de calor dissipada na fase de aquecimento (CSM3) (Q) para cada simulação, utilizando a equação (34).

$$Q = A_e \int_{t=0}^{t=t_d} q_{e(t)}'' dt \quad (34)$$

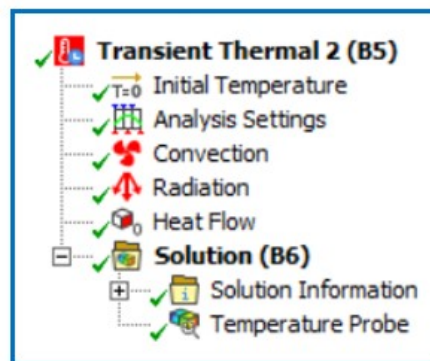
onde $q_{e(t)}''$ representa a variação do fluxo de calor na parede/teto externa em função do tempo; (A_e) é a área da superfície externa do forno.

Os resultados do CSM3 para cada material podem ser visualizados na Tabela 10.

Etapa 6. Definição das condições de contorno utilizadas na simulação térmica transiente, fase de resfriamento.

Após o término da simulação da fase de aquecimento foi simulada a fase de resfriamento. A Figura 27 apresenta a árvore hierárquica do grupo de análise *transient thermal*, do módulo *Thermal/Mechanical Transient*, utilizado no resfriamento.

Figura 27 – Regiões de atuação das condições de contorno na fase de aquecimento



Fonte: Autoria própria (2023)

Como a fase de resfriamento inicia-se com o término da fase de aquecimento, foi preciso vincular o início de uma com o término da outra. Para isso, foi configurado o *Initial temperature*, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Configuração do *Initial temperature* para simulação da fase de resfriamento

Definition	
Initial Temperature	Non-Uniform Temperature
Initial Temperature Environment	Transient Thermal
Time	End Time

Fonte: Autoria própria (2023)

As condições de contorno utilizadas nesta fase são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Critérios Condições de contorno utilizadas nas simulações na fase de resfriamento

Condição de contorno	Local na árvore de hierarquia	Valor	Região do forno
Temperatura ambiente	<i>Initial temperature</i>	Conforme Figura 28	-
Tempo de simulação	<i>Analysis Setting</i>	Variável	-
Coeficiente de calor por convecção	<i>Convection</i>	5 W/Km ²	Em toda a superfície externa do forno Figura 26(a).
Taxa de calor	<i>Heat flow</i>	0 W	Em toda a superfície externa do forno Figura 26(c).
Emissividade	<i>Radiation</i>	Depende do material	

Fonte: Autoria própria (2023)

Da mesma forma que na fase de aquecimento, foi preciso selecionar as soluções/resultados desejadas e as respectivas superfícies associadas na simulação (Quadro 7**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

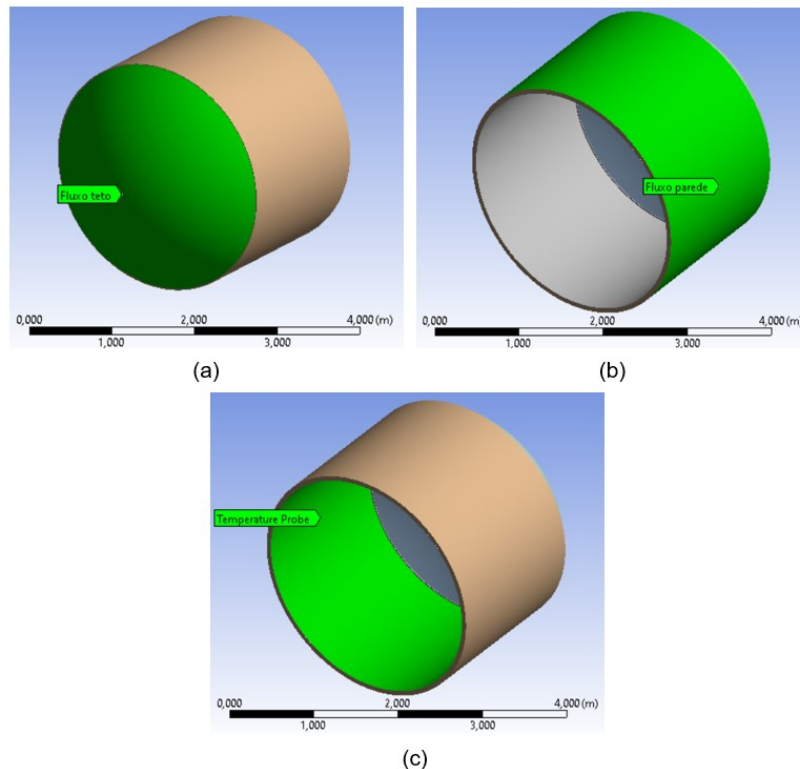
Quadro 7 – Tipos de soluções utilizadas na simulação

Solução	Local na árvore de hierarquia	Tipo	Região do forno
Fluxo de calor/teto	<i>Heat flux 1</i>	Sonda/direção Y	Superfície externa do teto do forno.Figura 29 (a)
Fluxo de calor/parede	<i>Heat flux 1</i>	Sonda/direção X	Superfície externa da parede do forno. Figura 29 (b)
Temperatura/parede	<i>Temperature probe</i>	Sonda	Superfície interna da parede do forno Figura 29 (c)

Fonte Autoria própria (2023)

A Figura 29 apresenta as superfícies onde as sondas para coleta dos resultados foram colocadas.

Figura 29 – Regiões selecionadas para a coleta dos resultados das simulações na fase de resfriamento.

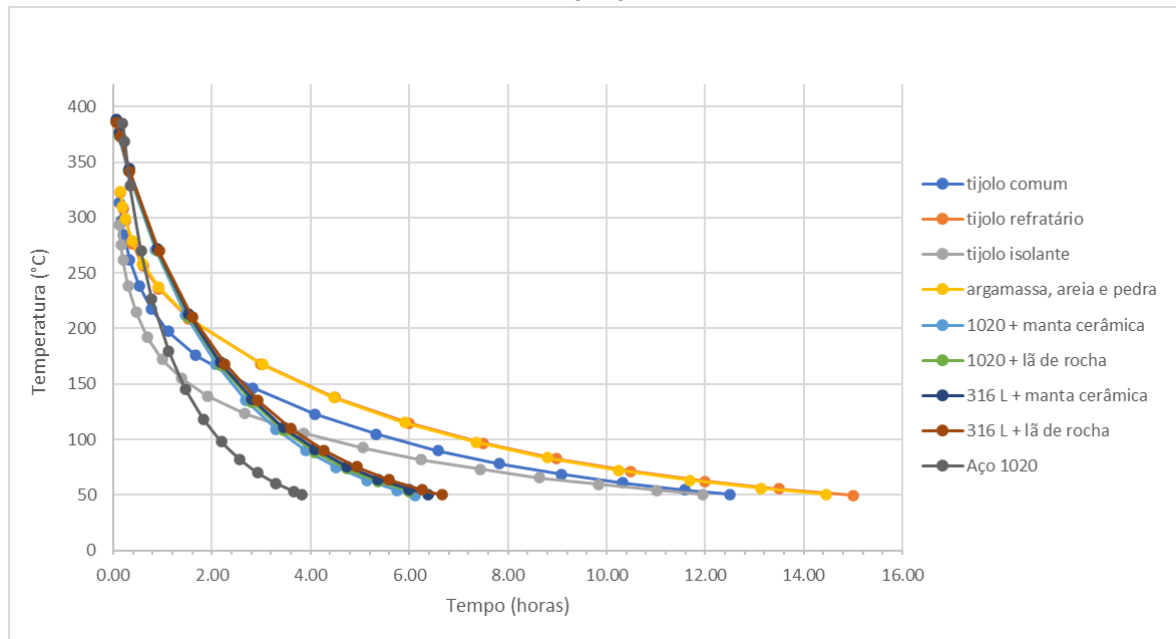


Fonte: Autoria própria (2023)

O parâmetro de interesse nesta simulação é o Tempo da fase de resfriamento (CSM2), que tem início após o término da fase de aquecimento, e termina quando a temperatura da superfície interna da parede do forno atinge o valor de 50 °C, o qual é a condição apropriada para abertura do forno (BUSTOS-VANEGAS *et al.*, 2018). O valor da temperatura é monitorada pela sonda *Temperature probe*, localizada nesta superfície.

A Figura 30 apresenta as curvas da fase de resfriamento para alguns materiais utilizados no exemplo de aplicação.

Figura 30 – Curvas da fase de resfriamento para alguns materiais utilizados na construção do forno



Fonte: Autoria própria (2023)

Como esperado, o aço é o material que obteve menor tempo para o resfriamento até a temperatura de 50 °C, isso vale para as configurações I e III. Os materiais tijolo refratário e argamassa, areia e pedra, apresentaram maior tempo de resfriamento.

A Tabela 10 apresenta os valores dos CSM - Parâmetros de desempenho térmico obtidos por simulação numérica para cada material.

Tabela 10 – Valores dos CSM - parâmetros de desempenho térmico

<i>Materiais</i>	<i>Conf.</i>	<i>CSM 1 (h)</i>	<i>CSM 2 (h)</i>	<i>CSM 3 (kWh)</i>	<i>CSM 4 (kWh)</i>
M1	I	4,23	3,67	279,29	1,332,60
M2	I	3,94	3,94	407,57	1,160,68
M3	I	3,89	3,89	379,46	1,127,15
M4	I	3,81	3,67	362,32	1,076,80
I1	I	2,94	12,50	5,34	585,16
I2	I	3,83	15,00	32,98	1,093,58
I3	I	1,82	11,94	0,49	161,85
I4	I	3,86	14,44	11,96	1,110,37
M1+I5	II	2,46	31,67	4,34	361,63
M1+I6	II	2,43	45,83	2,59	350,51
M2+I5	II	2,50	34,72	4,54	378,68
M2+I6	II	2,46	48,61	3,85	363,88
M3+I5	II	2,46	33,33	4,54	361,63
M3+I6	II	2,46	47,22	3,30	351,61
M1+I5	III	2,46	3,67	4,34	361,63
M1+I6	III	2,43	3,67	2,59	350,51
M2+I5	III	2,50	3,94	4,54	378,68
M2+I6	III	2,46	3,94	3,85	363,88
M3+I5	III	2,46	3,89	4,54	361,63
M3+I6	III	2,46	3,89	3,30	351,61

Fonte: Autoria própria (2023)

- Critério de seleção de materiais - Analíticos

Os CSM Analíticos são: Massa total dos materiais (CSM 5), Custo total dos materiais (CSM 6), Eco-custos (CSM 7), Pegada de carbono (CSM 8) e Tenacidade a fratura (CSM 9). Estes foram obtidos conforme instruções apresentadas na seção 3.2.3.2. Os valores destes CSM para cada material são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores dos CSM - Analíticos

Materiais	Conf.	CSM 5 (kg)	CSM 6 (\$)	CSM 7 (\$)	CSM 8 ₈ (t CO ₂ eq)	CSM 9 (MPa/m ²)
M1	I	2006,10	1845,61	982,19	4,71	60,00
M2	I	2039,20	11604,40	5453,46	11,32	100,00
M3	I	2133,50	51204,00	33159,70	36,00	80,00
M4	I	2023,90	40478,00	31456,26	34,15	80,00
I1	I	5110,10	311,05	0,00	1,38	1,50
I2	I	6381,00	5934,51	7745,26	27,25	2,00
I3	I	1595,20	6146,46	1936,25	6,81	1,00
I4	I	6115,10	202,24	142,23	0,82	1,00
M1+I5	II	2172,55	2718,15	1022,93	4,92	60,00
M1+I6	II	2214,16	2625,64	1026,75	4,98	60,00
M2+I5	II	2191,65	12476,94	5494,20	11,53	100,00
M2+I6	II	2233,26	12384,42	5498,02	11,59	100,00
M3+I5	II	2299,95	52076,54	33200,45	36,20	80,00
M3+I6	II	2341,56	51984,03	33204,27	36,26	80,00
M1+I5	III	2172,55	2718,15	1022,93	4,92	60,00
M1+I6	III	2214,16	2625,64	1026,75	4,98	60,00
M2+I5	III	2191,65	12476,94	5494,20	11,53	100,00
M2+I6	III	2233,26	12384,42	5498,02	11,59	100,00
M3+I5	III	2299,95	52076,54	33200,45	36,20	80,00
M3+I6	III	2341,56	51984,03	33204,27	36,26	80,00

Fonte: Autoria própria (2023)

- Critério de seleção de materiais - Termos linguísticos fuzzy

Os CSM obtidos por meio de termos linguísticos *fuzzy* foram: Disponibilidade do material (CSM 10), Capacidade de fabricação (CSM 11), Capacidade de manutenção (CSM 12), Resistência a corrosão (CSM 13), Reciclabilidade (CSM 14) e Reutilização (CSM 15). Para determinar os valores dos CSM foram seguidas as etapas apresentadas na seção 3.2.3.3.

Inicialmente, foram coletadas opiniões de especialistas, por meio do questionário III (ApêndiceD). O questionário foi enviado por e-mail para especialistas da área de engenharia de materiais, que emitiram julgamento, utilizando termos linguísticos, sobre cada CSM para cada material. Os resultados dos julgamentos são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Julgamento dos especialistas dos CSM 10 a CSM15, utilizando termos linguísticos

Materiais		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
M1	ESP 1	MB	MB	RB	RA	MB	MB
	ESP 2	MA	MA	MA	B	MA	MA
	ESP 3	MA	A	A	B	A	RB
	ESP 4	A	M	M	MB	M	B
M2	ESP 1	MB	MB	MB	MB	MB	MB
	ESP 2	M	M	RA	RA	RA	RA
	ESP 3	A	A	A	MA	A	A
	ESP 4	RA	M	M	A	M	M
M3	ESP 1	A	RA	M	MB	B	B
	ESP 2	MB	MB	RB	MA	M	M
	ESP 3	MB	M	RB	A	RB	M
	ESP 4	M	RB	RB	M	RB	RB
M4	ESP 1	MA	RA	RA	MB	B	B
	ESP 2	MB	MB	RB	MA	RA	RA
	ESP 3	MB	RA	RA	MA	RB	M
	ESP 4	M	RB	M	A	RB	RB
I1	ESP 1	MB	B	RA	RA	MA	MA
	ESP 2	MA	MA	MA	MA	MB	B
	ESP 3	MA	MA	M	RB	MB	MB
	ESP 4	MA	MA	M	MA	RB	M
I2	ESP 1	B	B	M	RB	MA	MA
	ESP 2	M	M	RB	MA	RB	RB
	ESP 3	M	A	RB	RA	MB	MB
	ESP 4	A	MA	RA	MA	RB	M
I3	ESP 1	MB	B	RA	A	MA	MA
	ESP 2	RB	RB	RB	MA	B	B
	ESP 3	RB	A	RB	RA	MB	MB
	ESP 4	A	MA	M	MA	RB	M
I4	ESP 1	MB	RB	B	RA	MA	MA
	ESP 2	MA	MA	MA	MA	B	MB
	ESP 3	MA	MA	MA	RB	MB	MB
	ESP 4	MA	MA	RA	MA	B	B
I5	ESP 1	MB	RB	M	M	MA	MA
	ESP 2	M	M	M	MA	B	B
	ESP 3	M	M	RB	A	MB	MB
	ESP 4	RA	M	M	MA	B	B
I6	ESP 1	B	B	RA	RA	MA	MA
	ESP 2	M	M	M	MA	B	B
	ESP 3	RA	M	M	RA	MB	MB
	ESP 4	A	RA	M	MA	B	B

Fonte: Autoria própria (2023)

As formações acadêmicas e as áreas de atuação dos especialistas que contribuíram com o preenchimento do questionário são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Perfis dos especialistas que realizaram o julgamento do questionário III

Formações e Experiências dos Especialistas	
Esp. 1	Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia de Materiais. Atualmente é professor Titular da Universidade Tecnológica Federal do Paraná e atua nos programas de Pós Graduação PPGEM PG/UTFPR e PPGCEM/UEPG. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Propriedades Mecânicas dos Metais e Ligas.
Esp. 2	Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Metalúrgica. É professor da Coordenadoria Especial de Engenharia de Materiais da UFSC-Campus Blumenau. Tem experiência nas áreas de Processos de Fabricação de Materiais Metálicos, Comportamento Mecânico e Mecânica da Fratura, Caracterização Microestrutural dos Materiais, Degradação dos Materiais e Tratamentos Térmicos de Materiais Metálicos.
Esp. 3	Possui graduação em Engenharia Mecânica, mestrado e doutorado em Engenharia de Materiais. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Tem experiência na grande área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase nas áreas de metalurgia física e metalurgia da transformação.
Esp. 4	Possui graduação em Engenharia de Materiais, mestrado e doutorado em Tecnologia Nuclear. Possui experiência na área de Engenharia de Materiais, atuando principalmente em Síntese e Processamento de Materiais Cerâmicos, Química de Superfície e de Colóides, e Reologia. É Professor dos cursos de graduação de Engenharia de Materiais e de pós-graduação "Stricto Sensu" Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do ABC.

Fonte: Autoria própria (2023)

Com o auxílio da Tabela 1, foram realizadas as conversões dos termos linguísticos apresentados no Quadro 8 em números *fuzzy* trapezoidal. A Tabela 21 à Tabela 30, do Apêndice E, apresentam os valores das conversões para cada material.

Posteriormente, os julgamentos são agregados, por meio da equação (23). Para os casos onde foram empregadas as configurações II e III, ainda foi necessário utilizar as equações (24) e (31) para determinar os valores finais em números *fuzzy* trapezoidal dos CSM para cada material. A Tabela 12 apresenta os valores finais para cada material e respectivos CSM, obtidos por termos linguísticos *fuzzy* trapezoidal.

Tabela 12 – Valores finais dos CSM 10 ao CSM 15, em números *fuzzy* trapezoidal

Materiais	Config.	CSM 10				CSM 11				CSM 12				CSM 13				CSM 14				CSM 15			
		A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
M1	I	0.00	0.65	0.73	1.00	0.00	0.55	0.60	1.00	0.2	0.63	0.68	1	0.00	0.25	0.30	0.80	0.00	0.55	0.60	1.00	0.00	0.35	0.43	1.00
M2	I	0.00	0.48	0.53	0.90	0.00	0.45	0.48	0.90	0.00	0.48	0.53	0.90	0.00	0.58	0.65	1.00	0.00	0.48	0.53	0.90	0.00	0.48	0.53	0.90
M3	I	0.00	0.33	0.38	0.90	0.00	0.35	0.43	0.80	0.20	0.35	0.43	0.60	0.00	0.55	0.60	1.00	0.10	0.33	0.38	0.60	0.10	0.38	0.40	0.60
M4	I	0.00	0.35	0.43	1.00	0.00	0.38	0.48	0.80	0.20	0.50	0.58	0.80	0.00	0.65	0.73	1.00	0.10	0.35	0.43	0.80	0.10	0.40	0.45	0.00
I1	I	0.00	0.68	0.78	1.00	0.10	0.73	0.80	1.00	0.40	0.63	0.68	1.00	0.20	0.68	0.78	1.00	0.00	0.30	0.40	1.00	0.00	0.40	0.45	1.00
I2	I	0.10	0.50	0.50	0.90	0.10	0.60	0.63	1.00	0.20	0.43	0.50	0.80	0.20	0.68	0.78	1.00	0.00	0.38	0.48	1.00	0.00	0.43	0.50	1.00
I3	I	0.00	0.35	0.43	0.90	0.10	0.55	0.60	1.00	0.20	0.43	0.50	0.80	0.50	0.80	0.88	1.00	0.00	0.35	0.43	1.00	0.00	0.40	0.45	1.00
I4	I	0.00	0.68	0.78	1.00	0.20	0.75	0.85	1.00	0.10	0.65	0.73	1.00	0.20	0.68	0.78	1.00	0.00	0.33	0.38	1.00	0.00	0.28	0.35	1.00
M1+I5	I e II	0.00	0.53	0.59	0.90	0.10	0.50	0.54	0.80	0.20	0.54	0.58	0.80	0.20	0.51	0.56	0.90	0.00	0.44	0.49	1.00	0.00	0.34	0.40	1.00
M1+I6	I e II	0.05	0.59	0.64	0.95	0.05	0.50	0.54	0.90	0.30	0.58	0.61	0.90	0.25	0.50	0.58	0.90	0.00	0.44	0.49	1.00	0.00	0.34	0.40	1.00
M2+I5	I e II	0.00	0.44	0.49	0.85	0.10	0.45	0.48	0.75	0.10	0.46	0.50	0.75	0.20	0.68	0.74	1.00	0.00	0.40	0.45	0.95	0.00	0.40	0.45	0.95
M2+I6	I e II	0.05	0.50	0.54	0.90	0.05	0.45	0.48	0.85	0.20	0.50	0.54	0.85	0.25	0.66	0.75	1.00	0.00	0.40	0.45	0.95	0.00	0.40	0.45	0.95
M3+I5	I e II	0.00	0.36	0.41	0.85	0.10	0.40	0.45	0.70	0.20	0.40	0.45	0.60	0.20	0.66	0.71	1.00	0.05	0.33	0.38	0.80	0.05	0.35	0.39	0.80
M3+I6	I e II	0.05	0.43	0.46	0.90	0.05	0.40	0.45	0.80	0.30	0.44	0.49	0.70	0.25	0.65	0.73	1.00	0.05	0.33	0.38	0.80	0.05	0.35	0.39	0.80

Fonte: Autoria própria (2023)

Finalmente, realiza-se a defuzzificação dos resultados obtidos na Tabela 12, por meio da equação (32), obtendo em valores *crisp* os CSM não numéricos para cada material (Tabela 13).

Tabela 13 – Valores finais dos CSM não numéricos

<i>Materiais</i>	<i>Conf.</i>	<i>CSM 10</i>	<i>CSM 11</i>	<i>CSM 12</i>	<i>CSM 13</i>	<i>CSM 14</i>	<i>CSM 15</i>
M1	I	0,57	0,53	0,62	0,36	0,53	0,46
M2	I	0,47	0,45	0,47	0,54	0,47	0,47
M3	I	0,41	0,40	0,40	0,53	0,35	0,36
M4	I	0,46	0,41	0,51	0,57	0,43	0,44
I1	I	0,58	0,63	0,68	0,65	0,45	0,47
I2	I	0,50	0,57	0,49	0,65	0,47	0,49
I3	I	0,43	0,56	0,49	0,78	0,46	0,47
I4	I	0,58	0,67	0,60	0,65	0,45	0,43
M1+I5	II	0,49	0,47	0,52	0,55	0,49	0,45
M1+I6	II	0,54	0,49	0,60	0,56	0,49	0,45
M2+I5	II	0,44	0,44	0,44	0,64	0,46	0,46
M2+I6	II	0,49	0,45	0,52	0,65	0,46	0,46
M3+I5	II	0,41	0,41	0,41	0,63	0,40	0,41
M3+I6	II	0,46	0,43	0,49	0,65	0,40	0,41
M1+I5	III	0,49	0,47	0,52	0,55	0,49	0,45
M1+I6	III	0,54	0,49	0,60	0,56	0,49	0,45
M2+I5	III	0,44	0,44	0,44	0,64	0,46	0,46
M2+I6	III	0,49	0,45	0,52	0,65	0,46	0,46
M3+I5	III	0,41	0,41	0,41	0,63	0,40	0,41
M3+I6	III	0,46	0,43	0,49	0,65	0,40	0,41

Fonte: Autoria própria (2023)

4.1.3 Seleção dos materiais para construção do forno

Nesta fase, será apresentada como foi realizado o ranqueamento dos materiais que participaram do processo de seleção e a análise de sensibilidade deste processo.

4.1.3.1 Ranqueamento dos materiais

Para o ranqueamento dos materiais que participaram do processo de seleção, foi utilizado o método MCDM TOPSIS estendido, seguindo as etapas apresentadas na seção 3.3.1. A matriz inicial com os valores dos CSM, seus respectivos pesos e objetivos, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Matriz inicial com os valores dos CSM, pesos e objetivos

	CSM 1 mín	CSM 2 mín	CSM 3 mín	CSM 4 mín	CSM 5 mín	CSM 6 mín	CSM 7 mín	CSM 8 mín	CSM 9 máx	CSM 10 máx	CSM 11 máx	CSM 12 máx	CSM 13 máx	CSM 14 máx	CSM 15 máx
Materiais	0.061	0.058	0.051	0.060	0.044	0.063	0.062	0.058	0.087	0.077	0.057	0.057	0.090	0.086	0.087
M1	4,23	3,67	279,29	1332,60	2006,10	1845,61	982,19	4,71	60,00	0,57	0,53	0,62	0,36	0,53	0,46
M2	3,94	3,94	407,57	1160,68	2039,20	11604,40	5453,46	11,32	100,00	0,47	0,45	0,47	0,54	0,47	0,47
M3	3,89	3,89	379,46	1127,15	2133,50	51204,00	33159,70	36,00	80,00	0,41	0,40	0,40	0,53	0,35	0,36
M4	3,81	3,67	362,32	1076,80	2023,90	40478,00	31456,26	34,15	80,00	0,46	0,41	0,51	0,57	0,43	0,44
I1	2,94	12,50	5,34	585,16	5110,10	311,05	0,00	1,38	1,50	0,58	0,63	0,68	0,65	0,45	0,47
I2	3,83	15,00	32,98	1093,58	6381,00	5934,51	7745,26	27,25	2,00	0,50	0,57	0,49	0,65	0,47	0,49
I3	1,82	11,94	0,49	161,85	1595,20	6146,46	1936,25	6,81	1,00	0,43	0,56	0,49	0,78	0,46	0,47
I4	3,86	14,44	11,96	1110,37	6115,10	202,24	142,23	0,82	1,00	0,58	0,67	0,60	0,65	0,45	0,43
M1+I5 II	2,46	31,67	4,34	361,63	2172,55	2718,15	1022,93	4,92	60,00	0,49	0,47	0,52	0,55	0,49	0,45
M1+I6 II	2,43	45,83	2,59	350,51	2214,16	2625,64	1026,75	4,98	60,00	0,54	0,49	0,60	0,56	0,49	0,45
M2+I5 II	2,50	34,72	4,54	378,68	2191,65	12476,94	5494,20	11,53	100,00	0,44	0,44	0,44	0,64	0,46	0,46
M2+I6 II	2,46	48,61	3,85	363,88	2233,26	12384,42	5498,02	11,59	100,00	0,49	0,45	0,52	0,65	0,46	0,46
M3+I5 II	2,46	33,33	4,54	361,63	2299,95	52076,54	33200,45	36,20	80,00	0,41	0,41	0,41	0,63	0,40	0,41
M3+I6 II	2,46	47,22	3,30	351,61	2341,56	51984,03	33204,27	36,26	80,00	0,46	0,43	0,49	0,65	0,40	0,41
M1+I5 III	2,46	3,67	4,34	361,63	2172,55	2718,15	1022,93	4,92	60,00	0,49	0,47	0,52	0,55	0,49	0,45
M1+I6 III	2,43	3,67	2,59	350,51	2214,16	2625,64	1026,75	4,98	60,00	0,54	0,49	0,60	0,56	0,49	0,45
M2+I5 III	2,50	3,94	4,54	378,68	2191,65	12476,94	5494,20	11,53	100,00	0,44	0,44	0,44	0,64	0,46	0,46
M2+I6 III	2,46	3,94	3,85	363,88	2233,26	12384,42	5498,02	11,59	100,00	0,49	0,45	0,52	0,65	0,46	0,46
M3+I5 III	2,46	3,89	4,54	361,63	2299,95	52076,54	33200,45	36,20	80,00	0,41	0,41	0,41	0,63	0,40	0,41
M3+I6 III	2,46	3,89	3,30	351,61	2341,56	51984,03	33204,27	36,26	80,00	0,46	0,43	0,49	0,65	0,40	0,41

Fonte: Autoria própria (2023)

O Apêndice F mostra os resultados obtidos em cada etapa do método TOPSIS estendido. O ranqueamento final dos materiais é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Ranqueamento final dos materiais que participaram do processo de seleção

Ranking	C _i		Material	Confi.
1	0,7081	M1+I6	Aço inoxidável AISI 316 L+manta lã de rocha	III
2	0,6877	M2+I6	Aço inoxidável AISI 316 L+manta lã de rocha	III
3	0,6603	M1+I5	Aço AISI 1020+manta cerâmica	III
4	0,6595	M1+I6	Aço AISI 1020+manta lã de rocha	II
5	0,6466	I1	Tijolo maciço (argila comum)	I
6	0,6386	M2+I6	Aço inoxidável AISI 316 L+manta lã de rocha	II
7	0,6363	M1+I5	Aço AISI 1020+manta cerâmica	II
8	0,6330	M2+I5	Aço inoxidável+manta cerâmica	III
9	0,6175	I3	Tijolo isolante maciço (40% Al ₂ O ₃ , 57% SiO ₂ , 0,8% Fe ₂ O ₃)	I
10	0,6084	M2+I5	Aço inoxidável AISI 316 L+manta cerâmica	II
11	0,5809	M1	Aço AISI 1020	I
12	0,5788	I4	Argamassa com cimento, areia e pedra	I
13	0,5596	M2	Aço inoxidável AISI 316 L	I
14	0,5335	I2	Tijolo-refratário maciço (20-45% Al ₂ O ₃ , 50-80% SiO ₂)	I
15	0,4806	M3+I6	Nimonic 75+manta lã de rocha	III
16	0,4511	M3+I5	Nimonic 75+manta cerâmica	III
17	0,4468	M3+I6	Nimonic 75+manta lã de rocha	II
18	0,4421	M4	Incoloy 800	I
19	0,4272	M3+I5	Nimonic 75+manta cerâmica	II
20	0,3239	M3	Nimonic 75	I

Fonte: Autoria própria (2023)

Conforme a Tabela 15, o material melhor classificado foi a composição M1+I6 (aço AISI 1020 + manta lã de rocha), empregando a configuração III. Ou seja, na fase de aquecimento, a parede e o teto do forno são constituídos de dois materiais; posteriormente, na fase de resfriamento, o material externo é retirado, deixando o aço AISI 1020 em contato direto com o ambiente externo, favorecendo a troca térmica com o ambiente, diminuindo o tempo do ciclo de produção do carvão vegetal.

O segundo colocado, M2+I6 (aço inoxidável 316 L+manta lã de rocha), utilizando a configuração III, seguido de: M1+I5 (aço AISI 1020 + manta

cerâmica), na configuração III; e M1+I6 (aço AISI 1020 + manta lã de rocha), na configuração II. Esta classificação aponta a relevância em utilizar a configuração III nas construções de fornos. Indica também que, tomar a decisão de qual(is) material(is) utilizar, avaliando somente os custos dos materiais, pode incorrer em erro. Esta afirmação é reforçada pela quinta colocação do tijolo maciço em argila (I1), que é um material comumente utilizado na construção de fornos, ficando atrás de materiais mais caros.

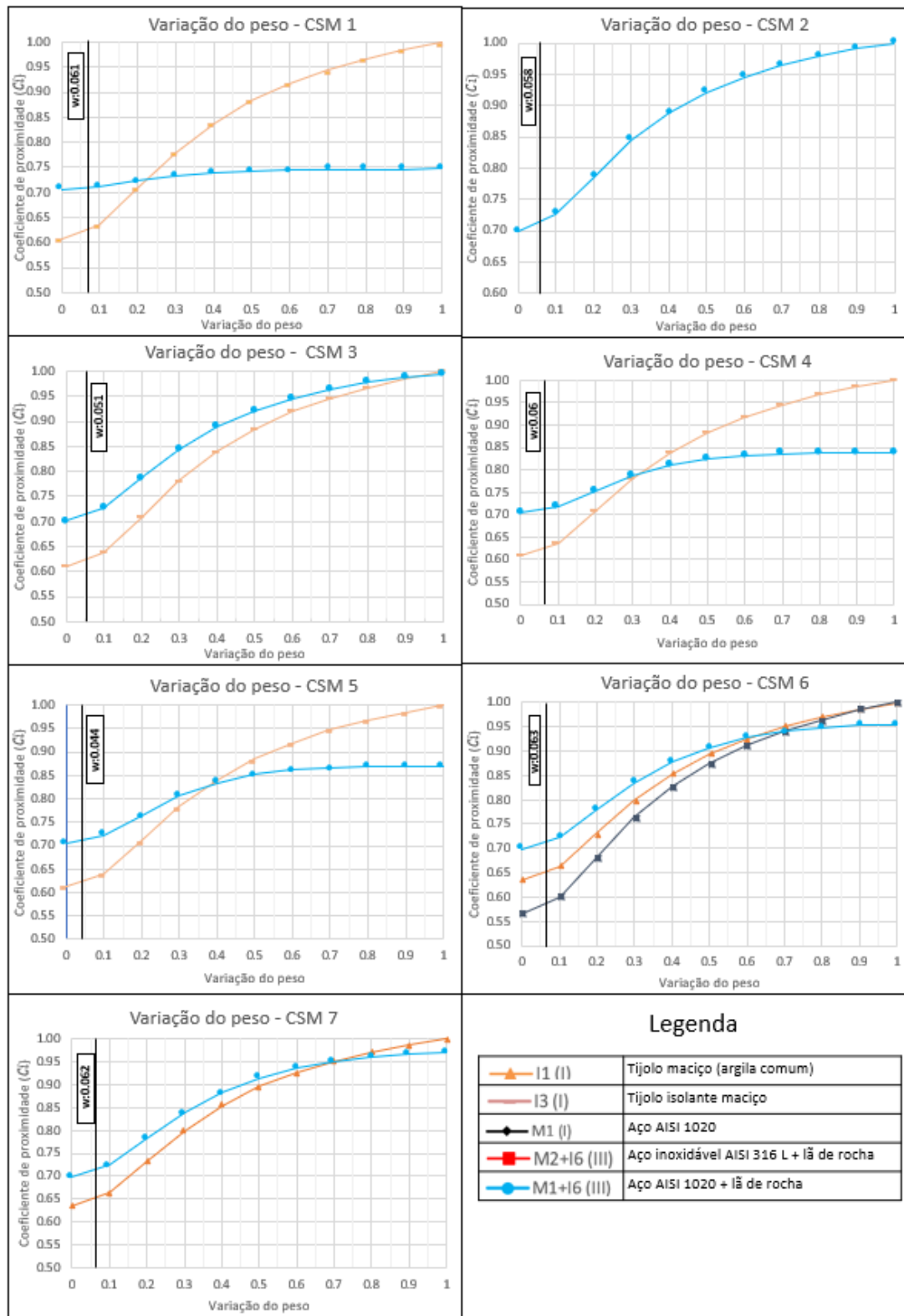
4.1.3.2 Análise de sensibilidade

Para realizar a análise de sensibilidade do ranqueamento dos materiais que participaram do processo de seleção, foram utilizadas as orientações apresentadas na seção 3.3.2.

As análises de sensibilidade foram realizadas para todos os 15 CSM. Para cada CSM, foram plotados gráficos que contêm a variação do C_i , para o material melhor classificado, e a(s) opção(ões) de material(ais) que se tornam a melhor opção, à medida que o peso do CSM analisado é variado.

A Figura 31 apresenta os gráficos referentes as análises de sensibilidade do CSM 1 ao CSM 7. As linhas verticais existentes nos gráficos representam o valor do peso original do respectivo CSM analisado, utilizado no MCDM TOPSIS estendido.

Figura 31 – Análise de sensibilidade CSM 1 ao CSM 7



Fonte: Autoria própria (2023)

Analisando o gráfico do CSM 1 (Tempo da fase de aquecimento), o material M1+I6 (III) apresentou-se como a melhor opção até o peso atingir o valor de 0,23. Para CSM 2 (Tempo da fase de resfriamento), este material é o primeiro classificado para toda a faixa de variação do peso deste critério, não havendo inversão na classificação.

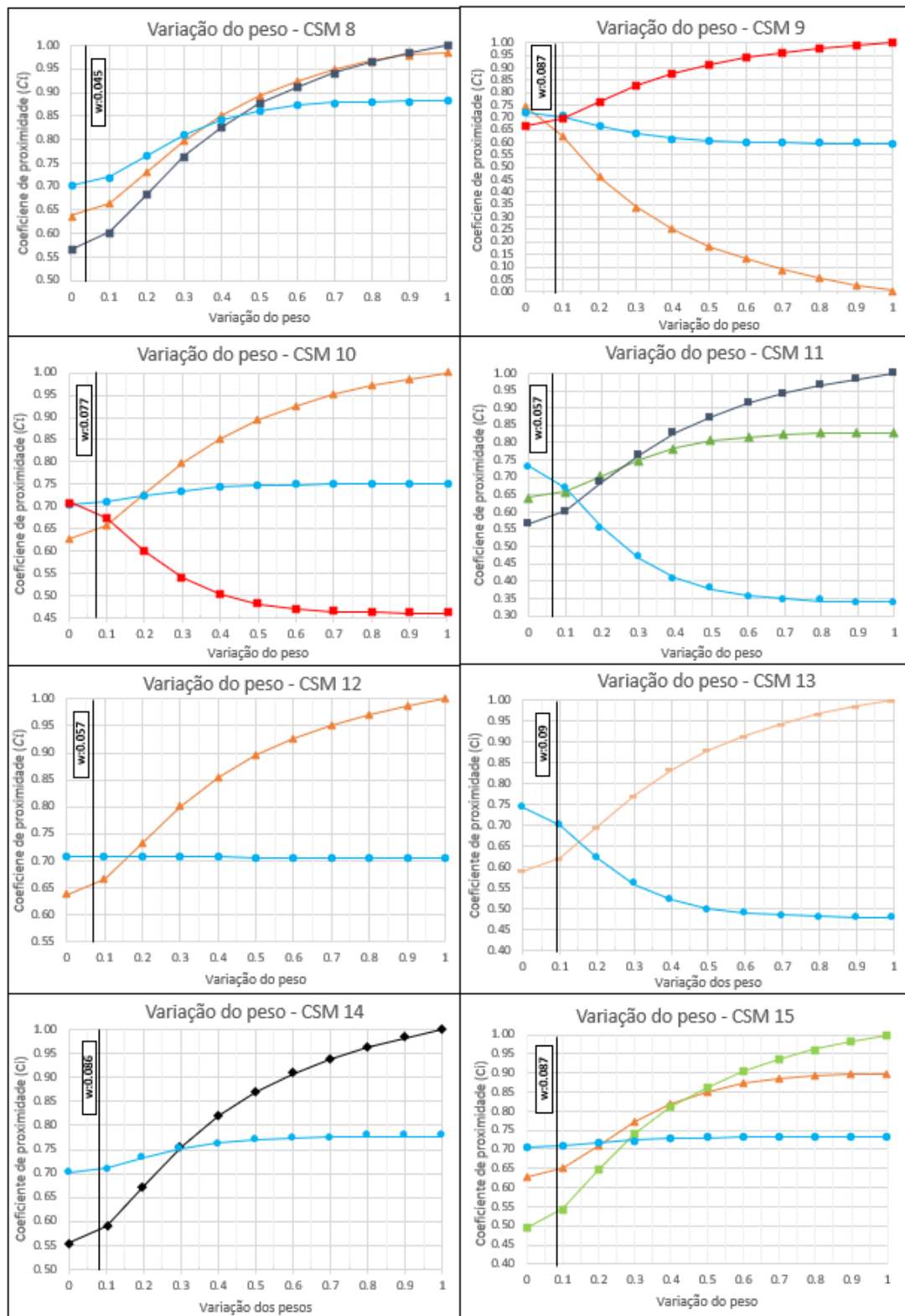
O gráfico do CSM 3 (Calor dissipado na fase aquecimento) mostra que o material M1+I6 (III) deixa de ser a melhor opção somente quando o peso deste critério atinge o valor de aproximadamente 0,95. Com relação ao CSM 4 (Calor fornecido na fase de aquecimento), o material melhor classificado deixa de ser a melhor opção quando seu peso atinge valores acima de 0,32. Da mesma forma, o material I3 passa ser a melhor opção quando o valor do peso do CSM 5 (Massa total dos materiais) ultrapassa 0,38.

Já o gráfico para o CMS 6 (Custo total dos materiais), apresenta três materiais que ocupam a melhor classificação à medida que o peso do critério varia. O material M1+I6 (III) é o melhor classificado até que o peso atinge o valor 0,61; acima desse valor, a melhor opção passa a ser o material I1. Este último permanece até o peso atingir o valor 0,95, quando o material I4 passa ser a melhor opção.

Para a variação do peso do CSM 7 (Eco-custos), novamente o material I1 passa a ser a melhor opção para valores de peso maior que 0,7.

A seguir, na Figura 32, são apresentados os gráficos das análises de sensibilidade para os CSM 8 ao CSM 15. A legenda utilizada nos gráficos desta figura está na legenda da Figura 31.

Figura 32 – Análise de sensibilidade CSM 8 ao CSM 15



Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico do CSM 8 (Pegada de carbono) apresenta três materiais que alternam como melhor opção à medida que o peso deste critério aumenta. O material M1+I6 (III) foi o melhor classificado até o peso atingir 0,35, passando o

material I1 a se tornar a melhor opção; este permanece até o peso atingir o valor de 0,85, passando o material I4 a ser a melhor opção.

Na sequência, o gráfico do CSM 9 (Tenacidade a fratura) apresenta uma característica diferente dos gráficos mostrados até aqui. Em todos os casos anteriores, o material M1+I6 (III) é o melhor classificado quando o peso deste critério é 0. No entanto, CSM 9 sendo igual a 0, o material I1 ocupa a primeira colocação, permanecendo assim até o peso atingir 0,02; a partir disso, o material M1+I6 (III) passa para a primeira colocação, permanecendo nesta posição até o peso de 0,11. Acima deste valor, o material M2+I6 (III) assume a primeira colocação.

Para o gráfico do CSM 10 (Disponibilidade do material), quando o peso do critério é igual a zero, os materiais M1+I6 (III) e M2+I6 (III) possuem o mesmo valor de C_i (0,071). Aumentando o valor do peso, a curva que representa o material M1+I6 (III) tende a diminuir o valor de C_i , passando o material M2+I6 (III) para a primeira posição. Este permanece nesta colocação até que o valor do peso do critério atinja 0,2, quando o material I1 passa a ocupar a primeira colocação.

Analisando o gráfico do CSM 11 (Capacidade de fabricação), observa-se que três materiais alternam com a melhor posição. Até o peso de 0,11, a melhor posição é o material M1+I6 (III); acima deste valor, o material I1 é o melhor, até atingir o peso de 0,25, quando o material I4 passa para primeira colocação.

O gráfico do CSM 12 (Capacidade de manutenção) mostra que o material M1+I6 (III) é a melhor opção para pesos do critério menores que 0,17. Para pesos maiores, a melhor opção é o material I1.

Com relação ao CSM 13 (Resistência a corrosão), o material M1+I6 (III) ocupa a primeira colocação até o peso igual a 0,15. Para valores maiores que este, o material que ocupa a melhor colocação é o I3.

O gráfico do CSM 14 (Reciclabilidade) mostra que, para valores de peso até 0,3, o material M1+I6 (III) é a melhor opção. Para valores maiores, o material melhor classificado é M1.

Por fim, analisando o gráfico do CSM 15 (Reutilização), três materiais ocupam a primeira opção. Inicialmente, o material M1+I6 (III) é a primeira opção para valores de peso até 0,2. Acima disso, o material I1 é o melhor, até o peso atingir 0,45, visto que, acima deste valor, a melhor opção é o material I2.

A Tabela 16 apresenta os valores dos pesos para cada CSM, em que ocorre a inversão de classificação do primeiro material tido como melhor opção. A tabela mostra ainda quanto o peso de um CSM necessita aumentar (%) para que o material melhor classificado perca esta posição para outro. Assim, é possível ter uma referência quanto um CSM é suscetível à variação do peso.

Tabela 16 – Efeito do aumento do peso dos CSM na mudança de classificação do material melhor classificado

Material menor classificado					
Ranque	Critério		Aumento em relação ao peso original	Peso original	Peso da inversão
1	CSM 2	Tempo da fase de resfriamento	0,0%	0,058	0
2	CSM 9	Tenacidade a fratura	14,9%	0,087	0,1
3	CSM 13	Resistência a corrosão	66,7%	0,09	0,15
4	CSM 11	Capacidade de fabricação	93,0%	0,057	0,11
5	CSM 15	Reutilização	129,9%	0,087	0,2
6	CSM 10	Disponibilidade do material	159,7%	0,077	0,2
7	CSM 12	Capacidade de manutenção	180,7%	0,057	0,16
8	CSM 14	Reciclabilidade	248,8%	0,086	0,3
9	CSM 1	Tempo da fase de aquecimento	260,7%	0,061	0,22
10	CSM 4	Calor fornecido na fase de aquecimento	433,3%	0,06	0,32
11	CSM 8	Pegada de carbono	677,8%	0,045	0,35
12	CSM 5	Massa total dos materiais	763,6%	0,044	0,38
13	CSM 6	Custo total dos materiais	852,4%	0,063	0,6
14	CSM 7	Eco-custos	1029,0%	0,062	0,7
15	CSM 3	Calor dissipado na fase de aquecimento	1762,7%	0,051	0,95

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Tabela 16, o valor do Aumento em relação ao peso original para o CSM 2 é 0%, pois, como abordado anteriormente, para toda a faixa de variação do peso, o material M1+I6 (III) permanece na primeira colocação.

Dentre todos os CSM, os mais suscetíveis a mudança de classificação, à medida que o peso do critério muda, foram o CSM 9 e CSM13. Para CSM 9 em que o valor do peso utilizado no ranqueamento do material é igual 0,087, uma variação do peso deste critério em 14,9%, elevando-o para 0,1, ocasionaria

a substituição do material M1+I6 (III) pelo material M2+I6 (III) como melhor opção. No caso do CSM 13, o peso utilizado para classificação dos materiais foi de 0,09, a mudança da primeira colocação do material M1+I6 (III) para o material I3, ocorreu com a variação do peso 66,7%, elevando-o para 0,15.

Em vista disso, os resultados apontam que o modelo é robusto, pois, para inversão da primeira colocação, é necessário, de modo geral, um grande incremento nos pesos dos CSM.

4.1.4 Avaliação da utilização da configuração III em fornos de produção de carvão vegetal

Para avaliar a utilização da configuração III, com os resultados obtidos na simulação térmica, foram analisados o Tempo da fase de resfriamento (CSM 2) e a quantidade de Calor fornecido na fase de aquecimento (CSM 4) de cada material em relação ao tijolo (argila comum) (I1), por ser um material comumente utilizado na construção de fornos. A Figura 33 apresenta os gráficos com a variação destes critérios. Para ambos os gráficos, o material tijolo (argila comum) (I1) é a referência, e tem valor igual 0%.

Figura 33 – a) Variação do CSM 2 de cada material em relação a I1; b) Variação do CSM 4 de cada material em relação a I1



Fonte: Autoria própria (2023)

O gráfico (a) da Figura 33 indica uma redução de aproximadamente 230% no critério Tempo da fase de resfriamento (CSM 2) ao utilizar a configuração III para diferentes materiais, em relação ao tijolo (I1).

Analisando o gráfico (b) da mesma figura, observa-se que há uma redução do critério Quantidade de calor fornecido na fase de aquecimento (CSM 4) de aproximadamente 50% quando a configuração III é utilizada.

Assim, os materiais que utilizam a configuração III mostram-se uma opção interessante para a construção de fornos de produção de carvão vegetal. Isso ocorre porque eles possuem uma característica isolante durante a fase de aquecimento, o que resulta em um menor consumo de calor. Além disso, na fase de resfriamento, esses materiais proporcionam um resfriamento mais rápido do

forno, uma vez que o material isolante é removido, permitindo que o material metálico entre em contato direto com o ambiente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese preenche uma lacuna ainda não abordada na literatura ao propor uma metodologia de seleção de materiais para construção de fornos de produção de carvão vegetal.

Nesse sentido, 15 critérios de seleção de materiais (CSM) foram definidos, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Entre os critérios foram considerados os resultados de simulações numéricas, especificamente de alguns parâmetros de desempenho térmico, e não somente propriedades térmicas dos materiais como, por exemplo, a condutividade térmica e calor específico. Na realização das simulações numéricas, o software ANSYS® 2021/R1 se mostrou adequado para tal propósito.

Um exemplo de aplicação foi realizado com 20 materiais e/ou composições destes, empregando três tipos de configurações de materiais dispostos em camadas (I, II e III). A aplicação da metodologia mostrou que o material composto pelo aço AISI 1020, revestido com manta térmica de lã de rocha (M1+I6), utilizando a configuração III, foi a melhor opção, segundo os critérios empregados.

Pelos resultados obtidos na classificação dos materiais que participaram do processo de seleção, é possível constatar a eficiência de uma nova proposta construtiva para fornos de produção de carvão vegetal, denominada configuração III. Esta configuração possibilita a mudança da estrutura dos materiais do forno, permitindo uma menor perda de calor na fase de aquecimento e reduzindo o consumo de combustível na fase endotérmica do processo de carbonização. Além disso, esta configuração contribui para a redução do tempo da fase de resfriamento do forno.

Empregando a metodologia de seleção de materiais proposta, constatou-se que a utilização da configuração III com os materiais M1+I6, em relação ao material tijolo maciço (argila comum), reduziu em 230% a quantidade de calor necessária para processo de carbonização, assim como diminuiu em 50% tempo da fase de resfriamento.

Por meio de análise de sensibilidade da classificação obtida, a metodologia proposta mostrou-se robusta para inversão de classificação, envolvendo o material primeiro colocado.

Ainda, cabe destacar a vantagem econômica em utilizar a metodologia proposta, pois, com ela, é possível avaliar diferentes materiais e geometrias utilizadas em fornos na fase de projeto, reduzindo a necessidade de construção dos fornos para realização de estudos comparativos.

Como sugestão para trabalhos futuros, seria a criação de um *software* que integre as etapas da metodologia proposta, visando facilitar a sua utilização pelos usuários. Além disso, seria interessante considerar estudos que abordem de forma mais detalhada os fenômenos de transferência de calor e massa, relacionados à pirólise da madeira, a fim de obter resultados mais próximos da realidade. No entanto, é importante ressaltar que essa abordagem pode tornar o processo computacionalmente dispendioso.

REFERÊNCIAS

- ADAM, J. C. Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort–kiln (Eco-charcoal). **Renewable Energy**, v. 34, n. 8, p. 1923–1925, ago. 2009.
- AKAO, Y. QFD: Past, present and future. International Symposium on QFD '97. **Anais [...]** Linköping: 1997. Disponível em: <http://essli2013.de/wp-content/uploads/2013/08/blackburn.pdf>. Acessado em: 20 de junho 2020.
- ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 2° ed. Oxford: Elsevier, 1999.
- ASHBY, M. F. *et al.* Selection strategies for materials and processes. **Materials & Design**, v. 25, n. 1, p. 51–67, fev. 2004.
- ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. 5° ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2018.
- ASSIS, C. O. DE; TRUGILHO, P. F. Sistema alternativo para carbonização de madeira. **Scientia Forestalis** v. 36, n. 78, p. 133-140, jun. 2008.
- ASSIS, M. R. DE *et al.* Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291–302, 2012.
- BARCELLOS, D. C. **Forno container para produção de carvão vegetal: Desempenho, perfil térmico e controle de poluição**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- BARCELLOS, D. C. *et al.* Cellular furnace as a pollution and energy generation control source in carbonization using container oven. **Biomassa e Energia**, v. 1, p. 335–342, 16 ago. 2004.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Produção sustentável de carvão vegetal** : manual de operação de sistema fornos-fornalha. Brasília, DF: MMA, 2019.
- BRITO, J. O. Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira. **Documentos Florestas**. Piracicaba: p. 1 –19, mai. 1990.
- BUSTOS-VANEGAS, J. D. *et al.* Thermal inertia effects of the structural elements in heat losses during the charcoal production in brick kilns. **Fuel**, v. 226, n. November 2017, p. 508–515, 2018.
- BUSTOS-VANEGAS, J. D. **Charcoal cooling kinetics**: computacional simulation and industrial applications. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.
- CAVALLINI, C. *et al.* Integral aided method for material selection based on quality function deployment and comprehensive VIKOR algorithm. **Materials and Design**, v. 47, p. 27–34, 2013.

ÇENGEL, Y. A. ;; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**: uma abordagem prática. 4° ed. Porto Alegre: McGrall-Hill, 2009.

CGEE (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS).

Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia. Brasília: 2015. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Carvao_Vegetal_WEB_02102015_10225.PDF/a3cd6c7c-5b5b-450a-955b-2770e7d25f5c?version=1.3. Acesso em: 15 set 2020.

CHEN, W. Carbon quota price and CDM potentials after Marrakesh. **Energy Policy**, v. 31, n. 8, p. 709–719, 2003.

CHEN, Z. S. *et al.* Sustainable building material selection: A QFD- and ELECTRE III-embedded hybrid MCGDM approach with consensus building. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 85, n. August, p. 783–807, 2019.

CHENG, L. C. **QFD**: Desdobramento da Função Qualidade na Gestão de Desenvolvimento de Produtos. 2 ed ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

CHINER, M. Planning of expert systems for materials selection. **Materials and Design**, v. 9, n. 4, p. 195–203, 1988.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. DA. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática : aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **8° Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolviemnto de Produto – CNGDP**. 2011, n. 1998, p. 1–12, 2011.

DE MIRANDA, R. C.; BAILIS, R.; VILELA, A. DE O. Cogenerating electricity from charcoaling: A promising new advanced technology. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 2, p. 171–176, 2013.

DE OLIVEIRA VILELA, A. *et al.* A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration. **Biomass and Bioenergy**, v. 69, p. 222–240, 2014.

DEFLT UNIVERSITY OF TECHONOLOGY. **Sustainability Impact Metrics**. Disponível em: <https://www.ecocostsvalue.com/>. Acesso em: 15 ago. 2022a.

DEFLT UNIVERSITY OF TECHONOLOGY. **Excel files**: Idemat and Ecoinvent and ecocosts substances. Disponível em: <https://www.ecocostsvalue.com/data/>. Acesso em: 15 ago. 2022b.

DELGADO, M. *et al.* Combining numerical and linguistic information in group decision making. **Journal of Information Sciences**, v. 107, p. 177 194, 1998.

DIABY, V.; GOEREE, R. How to use multi-criteria decision analysis methods for reimbursement decision-making in healthcare: A step-by-step guide. **Expert Review of Pharmacoeconomics and Outcomes Research**, v. 14, p. 81–99 fev. 2014.

DITER, G. E.; SCHMIDT, L. C. **Engineering design**. 4th. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2016. v. 57

EDWARDS, K. L. Selecting materials for optimum use in engineering components. **Materials and Design**, v. 26, n. 5, p. 469–473, 2005.

EDWARDS, K. L.; DENG, Y. M. Supporting design decision-making when applying materials in combination. **Materials and Design**, v. 28, n. 4, p. 1288–1297, 2007.

EMOVON, I.; OGHENENYEROVWHO, O. S. Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review. **Results in Materials**, v. 7, n. June, p. 100115, 2020.

FAO (Food and Agriculture Organization). **The charcoal transition: greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods**. 2017. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i6935e/i6935e.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2020.

FAO (Food and Agriculture Organization). **Forestry production and trade**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 26 jun. 2023.

FARAG, M. M. Quantitative methods of materials selection. Em: KUTZ, M. (Ed.). **Handbook of materials selection**. New York: John Wiley & Sons, 2002.

FERGUSON, C. R.; ALLAN T. KIRKPATRICK. **Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences**. 3. ed. [s.l.] John Wiley & Sons Ltd, 2016.

FILHO, D. O. *et al.* Resfriamento rápido de fornos de carbonização. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1023–1032, 2010.

FOURNIER, J. Low temperature pyrolysis for biochar systems. **Harvesting Clean Energy Conference**, January 2009, Billings, 2009.

FRANÇA, G. A. C.; CAMPOS, M. B. Análise teórica e experimental do resfriamento de carvão vegetal em forno retangular. *In*: Enc. Energ. Meio Rural, 2022, **Anais [...]**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

GARCIA-PEREZ, M.; *et al.* **Methods for Producing Biochar and Advanced Biofuels in Washington State - Part 4: Literature Review of Sustainability Issues, Business Models, and Financial Analyses**. Olympia: Departament of ecology State of Washigiton, 2013. Disponível em: <https://apps.ecology.wa.gov/publications/documents/1207035.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2021.

GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH). **Towards sustainable modern wood energy development: Stocktaking paper on successful initiatives in developing countries in the field of wood energy development**. Disponível em: http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/giz2015-en-report-wood-energy.pdf. Acesso em: 20 de mai. 2021.

HERRERA, F.; HERRERA-VIDEIRA, E. Linguistic decision analysis: steps for solving decision problems under linguistic information. **Fuzzy Sets and Systems**, V. 115, p. 67-82, 2000.

IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores). **Annual report**. Disponível em: <http://abpa-br.org/relatorios/>. Acesso em: 13 jun. 2020.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis). **Manual de construção e operação de forno rabo-quente**. Natal: 1999. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/M9D00038.pdf> Acesso em: 23 fev. 2023.

IEA (International Energy Agency). **Iron and Steel Technology roadmap** : Towards more sustainable steelmaking Treatise on Process Metallurgy. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf. Acesso em: 20 de mar. 2020.

JAHAN, A. *et al.* Material screening and choosing methods - A review. **Materials & Design**, v. 31, n. 2, p. 696–705, 2010.

JAHAN, A.; BAHRAMINASAB, M. Multicriteria Decision Analysis in Improving Quality of Design in Femoral Component of Knee Prostheses: Influence of Interface Geometry and Material. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, 2015.

JAHAN, A.; BAHRAMINASAB, M.; EDWARDS, K. L. A target-based normalization technique for materials selection. **Materials and Design**, v. 35, p. 647–654, 2012.

JAHAN, A.; EDWARDS, K. L. Weighting of dependent and target-based criteria for optimal decision-making in materials selection process: Biomedical applications. **Materials and Design**, v. 49, p. 1000–1008, 2013.

JAHAN, A.; EDWARDS, K. L. A state-of-the-art survey on the influence of normalization techniques in ranking: Improving the materials selection process in engineering design. **Materials and Design**, v. 65, p. 335-342, 2015.

JAHAN, A.; EDWARDS, K. L.; Bahraminasab M. **Multi-criteria decision analysis**: for supporting the selection of engineering materials in product design. 2. ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2016.

JALHAM, I. S. Decision-making integrated information technology (IIT) approach for material selection. **International Journal of Computer Applications in Technology**, v. 25, n. 1, p. 65–71, 2006.

GIRUBHA, J. R.; VINODH, S. Application of fuzzy VIKOR and environmental impact analysis for material selection of an automotive component. **Materials and Design**, v. 37, p. 478–486, 2012.

KABIR, G. Consultant selection for quality management using VIKOR method under fuzzy environment. **International Journal of Multicriteria Decision Making**, v. 4, n. 2, p. 96–113, 2014.

KASAEI, A.; ABEDIAN, A.; MILANI, A. S. An application of quality function deployment method in engineering materials selection. **Materials and Design**, v. 55, p. 912-920, 2014.

KESTEREN, I. VAN; BRUIJN, S. DE; STAPPERS, P. J. Evaluation of materials selection activities in user-centred design projects. **Journal of Engineering Design**, v. 19, n. 5, p. 417–429, out. 2008.

LANA, A. Q. **Forno de alvenaria para incremento da produtividade por meio do resfriamento externo do carvão vegetal**. [s.l: s.n.].

LATORRE, F. L. *et al.* **a Carbonização Continua - Carboval E a Cogeração De Energia**. , 2017.

LEE, H. S. *et al.* Revised DEMATEL: Resolving the infeasibility of DEMATEL. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 10–11, p. 6746–6757, 2013.

LIU, H. C. *et al.* A novel hybrid multiple criteria decision making model for material selection with target-based criteria. **Materials and Design**, v. 60, p. 380–390, 2014.

LIU, H.-T. Product design and selection using fuzzy QFD and fuzzy MCDM approaches. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, n. 1, p. 482–496, jan. 2011.

LOPES, N. L. *et al.* **Aço verde brasileiro**. Viçosa: Ciflorestas, p. 7,8, 2018.

LÚCIO, A. DPC: uma tecnologia inovadora e altamente competitiva em constante evolução. Prática, Logística, Gerenciamento e Estratégias para o Sucesso da Conversão da Matéria Lenhosa em Carvão Vegetal para Uso na Metalurgia e Indústria. **Anais [...]**Belo Horizonte: 2006.

MATWEB. **AISI 1020 Steel, as rolled**. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a2eed65d6e5e4b66b7315a1b30f4b391>. Acesso em: 13 dez. 2022a.

MATWEB. **316 Stainless Steel, annealed sheet**. Disponível em: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=50f320bd1daf4fa7965448c30d3114ad%0A>. Acesso em: 13 dez. 2022b.

MATWEB. Special Metals NIMONIC® Alloy 75. Disponível em: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=080d047f5a784bee87e397a3d2b42666>. Acesso em 14 dez. 2022c.

MATWEB. Special Metals INCOLOY® Alloy 800. Disponível em: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=746c9db76d6541b381e19f540963c337>. Acesso em: 14 dez. 2022d.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal**.Belo Horizonte: Fundação Centro de Tecnologia de Minas Gerais, 1982.

MORELLO, T. F. Carbon neutral merchant pig iron in Brazil: Alternatives that allow decoupling from deforestation. **Energy for Sustainable Development**, v. 27, p. 93–104, 2015.

MORGAN. **Kaowool™ Blanket S/Kaowool™ Blanket SZr**. Disponível em: <https://morganthermalceramics.com/media/2910/kaowoolblankets-kaowoolblanketszrenglish-new.pdf%0A>>. Acesso em: 16 mar. 2021.

MOUSAVI-NASAB, S. H.; SOTOUDEH-ANVARI, A. A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems. **Materials and Design**, v. 121, p. 237–253, 2017a.

MOUSAVI-NASAB, S. H.; SOTOUDEH-ANVARI, A. A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems. **Materials and Design**, v. 121, p. 237–253, 2017b.

NAKAHARA, T. *et al.* Study on one-dimensional steady combustion of highly densified biomass briquette (bio-coke) in air flow. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 35, n. 2, p. 2415–2422, 2015.

NORGATE, T. *et al.* Biomass as a source of renewable carbon for iron and steelmaking. **ISIJ International**, v. 52, n. 8, p. 1472–1481, 2012.

ODUOE, N.; GITBIOMI, J.; CHIKAMAI, B. **Charcoal Production using Improved Earthn, Portable Metal, Drum and Casamance Kilns**. Nairobi. Kenya: Kenya Forestry Research Institute, 2006.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Visoça, 2012.

RODRIGUES, T. **Modelo de desenvolvimento de soluções conceituais de forno de carbonização**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Optimization of charcoal production through control of carbonization temperatures. **Revista Árvore**, p. 557–566, 2013.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Resfriamento artificial em fornos retangulares para a produção de carvão vegetal. **Revista Arvore**, v. 39, n. 4, p. 769–778, 2015.

PELÁEZ-SAMANIEGO, M. R. *et al.* Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 4, p. 1063–1086, 2008.

PENEDO, W. R (org.). **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro de Tecnologia de Minas Gerais, 1982.

PINTO, R. G. D.; SZKLO, A. S.; RATHMANN, R. CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector—From structural to intensity effects. **Energy Policy**, v. 114, n. June 2017, p. 380–393, 2018.

PRASAD, K.; CHAKRABORTY, S. A quality function deployment-based model for materials selection. **Materials and Design**, v. 49, p. 525–535, 2013.

PRASAD, K. G. D. *et al.* **QFD-Based TOPSIS Methodology for Material Selection**. Em: Handbook of Research on Developments and Trends in Industrial and Materials Engineering. Hershey, USA: IGI Global, 2020.

PRENDEVILLE, S.; O'CONNOR, F.; PALMER, L. Material selection for eco-innovation: SPICE model. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 31–40, 2014.

RAHIM, A. A. A. *et al.* A systematic review on material selection methods. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: **Journal of Materials: Design and Applications**, v. 234, n. 7, p. 1032–1059, 2020.

REIS, H. O. **Resfriamento de fornos de carbonização por injeção de vapor d'água**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

RISOTHERM. Insulating brick RITBRICK. Disponível em: <https://refracont.com.br/wp-content/uploads/2015/05/tijolo-isolante-ritbrick.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2022.

RODRIGUES, T. **Modelo de desenvolvimento de soluções conceituais de forno de carbonização**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Technological prospecting in the production of charcoal: A patent study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, n. February, p. 170–183, 2019a.

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, n. February, p. 104670, out. 2019b.

RONSSSE, F.; NACHENIUS, R. W.; PRINS, W. **Carbonization of Biomass**. em: Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 293–324.

ROZENFELD, H. *et al.* **Gestão de desenvolvimento de Produtos: uma referência para melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SANAYEI, A.; FARID MOUSAVI, S.; YAZDANKHAH, A. Group decision making process for supplier selection with VIKOR under fuzzy environment. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 1, p. 24–30, jan. 2010.

SANGSUK, S.; BUATHONG, C.; SUEBSIRI, S. High-energy conversion efficiency of drum kiln with heat distribution pipe for charcoal and biochar production. **Energy for Sustainable Development**, v. 59, p. 1–7, 2020.

SANGSUK, S.; SUEBSIRI, S.; PUAKHOM, P. Energy for Sustainable Development The metal kiln with heat distribution pipes for high quality charcoal and wood vinegar production. **Energy for Sustainable Development**, v. 47, p. 149–157, 2018.

SANTOS, I. DA S. DOS. **Resfriamento artificial de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SANTOS, S. DE F. DE O. M. *et al.* Life cycle analysis of charcoal production in masonry kilns with and without carbonization process generated gas combustion. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 9, p. 1–20, 2017.

SANTOS, S. DE F. DE O. M.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Production**, v. 22, n. 2, p. 309–321, 2012.

- SANTOS, S. DE F. O. M. **Produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais: alguns aspectos referentes a sustentabilidade**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2007.
- SANTOS, S. DE F. O. M. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.
- SARDINHA, R. M. DE A. **Lenha e carvão**: manual de apoio a extensão. Ecunha, Província de Huambo: European, 2008. Disponível em: https://issuu.com/imvf/docs/manual_carvao_final. Acesso em: 23 mar. 2021.
- SCALICE, R. K.; BRASCHER, G. C.; BECKER, D. A knowledge-based material selector using Quality Function Deployment principles. **Product Management & Development**, v. 10, n. 1, p. 23–32, 2012.
- SHANIAN, A.; SAVADOGO, O. TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell. **Journal of Power Sources**, v. 159, n. 2, p. 1095–1104, 22 set. 2006.
- SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of eucalyptus urograndis wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509–516, 2019.
- SINDIFER (SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS). **Anuário estatístico do setor de ferro gusa – 2020**: Ano base 2019. Belo Horizonte: 2020.
- SUOPAJÄRVI, H.; PONGRÁCZ, E.; FABRITIUS, T. The potential of using biomass-based reducing agents in the blast furnace: A review of thermochemical conversion technologies and assessments related to sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 511–528, 2013.
- SYRED, C. *et al.* A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP). **Fuel**, v. 85, n. 10, p. 1566–1578, 2006.
- TINTNER, J. *et al.* Pyrolysis profiles of a traditional circular kiln in Austria and a drum kiln in Namibia. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 150, p. 104865, set. 2020.
- VALENTIM, A. R.; BEHAINNE, J. R.; BRAGHINI JUNIOR, A. Thermal performance analysis of materials and configurations. **Energies**, 15, 5872, ago. 2022.
- VAN KESTEREN, I. E. H.; STAPPERS, P. J.; DE BRUIJN, J. C. M. Materials in Products Selection: Tools for including user-interaction in materials selection. **International Journal of Design**, v. 1, n. 3, p. 41–55, 2007.
- YADAV, J. S. Optimization of selection parameters through QFD-AHP-TOPSIS methodology. **International Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, v. 12, n. 4, p. 833–844, 2017.

YAZDANI, M. *et al.* Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3728–3740, 2017.

YÜCENUR, G. N.; DEMIREL, N. E. Group decision making process for insurance company selection problem with extended VIKOR method under fuzzy environment. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 3, p. 3702–3707, 15 fev. 2012.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338–353, 1965.

ZOLA, F. C. *et al.* Multicriterial model for selecting a charcoal kiln. **Energy**, v. 190, 2020.

ZOLA, F. C. **Metodologia para definição de layout de praça de produção de carvão vegetal. 2020.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

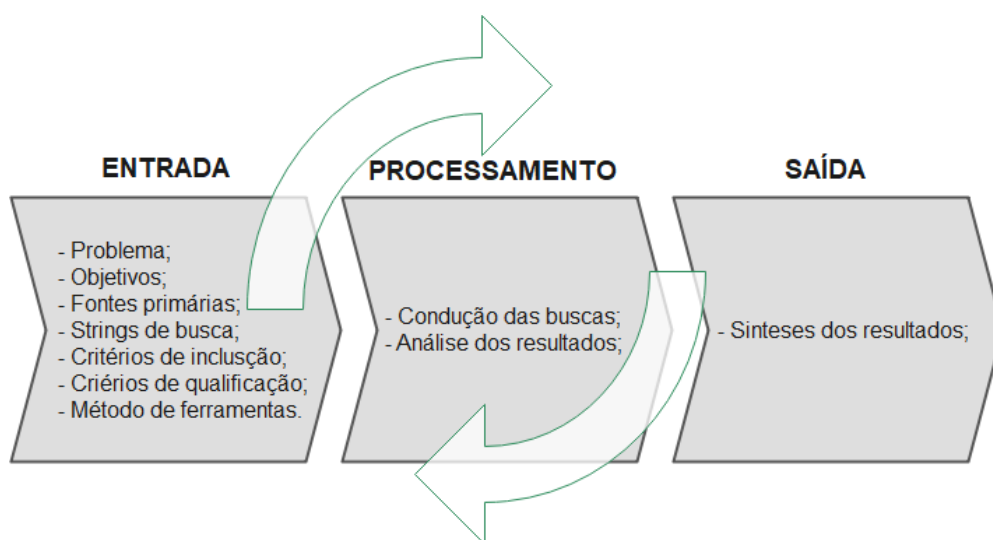
APÊNDICE A - Revisão Bibliográfica Sistemática

Revisão Bibliográfica Sistematizada

A revisão bibliográfica sistemática (RBS) é de extrema importância para a pesquisa, pois, por meio dela, é possível produzir resultados confiáveis. É preciso definir uma estratégia e um método, para ser possível realizar a busca e analisar os resultados, bem como para que seja possível a outro pesquisador conseguir reproduzir os mesmos (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011). Nesse sentido, a RBS utilizada no presente estudo será a *Roadmap*.

A RBS *Roadmap*, é composta de 15 etapas, organizada em 3 fases diferentes (Entrada, Processamento e Saída), Figura 34.

Figura 34 – Etapas do Método RBS *Roadmap*



Fonte: Adaptado de Conforto, Amaral e Silva (2011)

Entrada

Problema

Para iniciar uma RBS é necessário definir o problema que pretende ser abordado na pesquisa, pois a definição do problema é o ponto de partida. Para definição da questão de pesquisa foi utilizado o acrônimo, PICO, Quadro 10.

Quadro 10 – Acrônimo PICO

Acrônimo	
P (<i>population</i>)	Fornos de carbonização para produção de carvão vegetal.
I (<i>intervention</i>)	Emprega uma metodologia para seleção de materiais de construção de fornos utilizados na produção de carvão vegetal.
C (<i>comparator</i>)	Não utilização de uma metodologia para seleção de materiais para construção de forno de carbonização.
O (<i>outcome</i>)	Processo de produção de carvão vegetal mais sustentável.

Fonte: Autoria própria (2023)

Assim, a seguinte questão foi elaborada: o emprego de uma metodologia para seleção de materiais utilizados na construção de fornos de produção de carvão vegetal pode contribuir para melhoria da sustentabilidade do processo?

Objetivo

Com base no problema de pesquisa, o objetivo do presente estudo é propor uma metodologia para seleção de materiais para construção de fornos de carbonização.

Fontes primárias

Segundo Conforto, Amaral e Silva (2011), são consideradas fontes primárias: artigos, periódicos ou base de dados que serão utilizadas para elaboração de palavras-chave. Outro modo de identificar as fontes primárias é realizar uma revisão bibliográfica preliminar, realizando leitura de artigos e teses da área de estudo, sem o rigor de uma revisão sistematizada. Desse modo, foram selecionados alguns artigos para leitura.

Strings de busca

Com base nas fontes primárias, através de alguns termos referente ao tema de pesquisa, foram levantadas as palavras-chave e definidos os operadores booleanos utilizados. O Quadro 11 apresenta os *strings* utilizados nas buscas.

Quadro 11 – Strings utilizados nas buscas

Busca	Critérios de Inclusão	Strings
1	<i>Período: 2001-2022; Tipo de documento: somente artigo; Busca em: todo o documento</i>	<i>(design* OR project*) AND ("material select*" OR "choice* of material") AND (kiln OR furnace OR boiler OR oven) AND (biomass OR charcoal)</i>
2	<i>Período: 2001-2022; Tipo de documento: somente artigo; Busca em: resumo, título ou palavras-chave</i>	<i>("material select*" OR "choice* of material") AND (kiln OR furnace OR boiler OR oven)</i>
3	<i>Período: 2001-2022; Tipo de documento: somente artigo; Busca em: todo o documento.</i>	<i>(design* OR project*) AND ("material select*" OR "choice* of material") AND (kiln OR furnace OR oven OR boiler) AND ("MCDM" OR "Multi-Criteria Decision Making")</i>

Fonte: Autoria própria (2023)

Critério de inclusão

A definição dos critérios foi baseada no objetivo da pesquisa. Foram considerados como critérios de inclusão, artigos publicados a partir de 2001 até 2022, que tratem sobre seleção de materiais de construção de forno de carbonização e, no intuito de ampliar o espectro da busca, foi considerado além de fornos, seleção de materiais para construção de caldeiras, já que ambos os equipamentos trabalham em condições semelhantes, no que se refere a energia e emissões geradas.

Critério de qualificação

Como foi observado há escassez de estudos sobre o tema abordado, sendo assim, optou-se por analisar todos os artigos que retornaram por meio das buscas em diferentes bases de dados.

Métodos e ferramentas

Nessa etapa, é preciso definir como ocorreram as buscas, definir os filtros, quais serão as bases de dados utilizadas e como serão armazenados os resultados. No presente estudo foram utilizadas as bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Para as buscas, foram utilizados os filtros: i) duplicidade de artigos; ii) leitura do título e resumo do artigo disponível para acesso via Portal Periódicos CAPES (acesso UTFPR); iii) leitura da introdução e leitura da conclusão e iv) leitura de todo o documento. Para armazenamento dos documentos foi utilizado o *software Mendeley*.

Processamento

Condução das buscas

As buscas foram realizadas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, utilizando os *strings* e critérios de inclusão, conforme Quadro 11. Foram encontrados um total de 373 artigos. A Tabela 17 apresenta a quantidade de artigos encontrados em cada busca nas diferentes bases de dados.

Tabela 17 – Resultados das buscas

Busca	Scopus	Web of Science	TOTAL
1	135	2	137
2	117	40	157
3	78	1	79
		Total	373

Fonte: Autoria própria (2023)

Análise dos resultados

Para realizar a análise dos resultados foram aplicados os 4 filtros apresentados no item *Métodos e ferramentas*. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados da análise por filtro

	Base de dados	
	Scopus	Web of Science
Total de artigos	330	43
Filtro I	305	41
Filtro II	31	05
Filtro III	07	0
Filtro IV	0	0
Artigos restantes	0	0

Fonte: Autoria própria (2023)

Conforme apresentado da Tabela 18, após a aplicação dos quatros filtros nenhum artigo foi aproveitado.

Saída

Síntese dos resultados

Seguido o *framework* proposto por Conforto, Amaral e Silva (2011), foi realizado uma RBS tendo como fundo o problema de pesquisa do presente

estudo. As buscas foram realizadas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Nenhum artigo científico que abordasse o problema da pesquisa foi encontrado. Este fato dá indícios sobre o ineditismo da pesquisa proposta.

APÊNDICE B - Propriedades dos materiais utilizados no exemplo de aplicação

Tabela 19 – Propriedades dos materiais utilizados no exemplo aplicação

<i>Material</i>	<i>Sig.</i>	<i>Densidade</i> (kg/m ³)	<i>Condutividade térmica</i> (W/mK)	<i>Calor específico</i> (J/kgK)	<i>Emis- sivida- de</i> -	<i>Custo do material</i> \$/kg	<i>Eco- custo</i> \$/kg	<i>Pegada Carbono</i> kg CO ₂ equiv.	<i>Tenacidade a fratura</i> (MPa/m ²)	<i>Referência</i>
Aço AISI 1020	M1	7870	51,9	486	0,4	0,92	0,49	2,35	60000	(ASHBY, 2018; DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b; MATWEB, 2022a)
Aço inoxidável AISI 316 L	M2	8000	16,3	500	0,4	5,73	2,69	5,59	100000	(ASHBY, 2018; DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b; MATWEB, 2022b)
Nimonic 75	M3	8370	11,7	461		24,00	15,54	16,87	80000	(ASHBY, 2018; DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b; MATWEB, 2022c)
Incoloy 800	M4	7940	11,5	460	0,4	20,00	15,54	16,87	80,000	(ASHBY, 2018; DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b; MATWEB, 2022d)
Tijolo maciço (argila comum)	I1	1922	0,72	800	0,9	12,35	-	0,27	1500	(ASHBY, 2018; ÇENGEL; GHAJAR, 2009; DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b)
Tijolo-refratário maciço (20-45% Al ₂ O ₃ , 50-80% SiO ₂)	I2	2400	1,34	790	0,75	235,59	1,21	4,27	2000	ASHBY, 2018; ÇENGEL; GHAJAR, 2009; DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b)
Tijolo isolante maciço (40% Al ₂ O ₃ , 57% SiO ₂ , 0,8% Fe ₂ O ₃)	I3	1000	0,18	840	0,7	244,00	1,21	4,27	1000	(ASHBY, 2018; DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b; RISOTHERM, 2022)
Argamassa com cimento, areia e pedra	I4	2300	1,40	840	0,8	76,03	53,47	308,20	1000	ASHBY, 2018; ÇENGEL; GHAJAR, 2009; DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b)
Manta cerâmica	I5	128	0,06	880	0,4	34,41	0,24	1,24	-(1)	(DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b; MORGAN, 2021)
Manta lã de rocha	I6	160	0,04	840	0,4	30,76	0,21	1,27	-(1)	(ÇENGEL; GHAJAR, 2009; DEFLT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2022b)

(1) Materiais utilizados na camada externa. Tenacidade a fratura não é a necessária.

Fonte: Autoria própria (2023)

**APÊNDICE C -Etapas para construção das malhas dos modelos utilizados
no exemplo de aplicação**

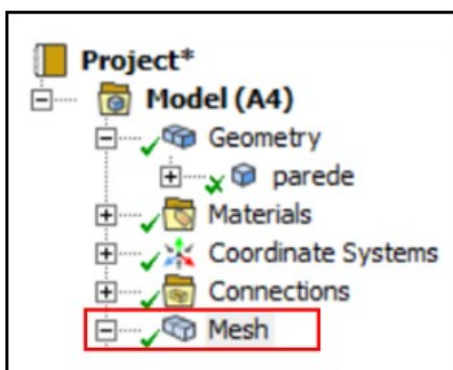
Etapas para construção das malhas dos modelos utilizados no exemplo de aplicação

Para apresentar como foram geradas as malhas nos modelos do exemplo de aplicação, o forno foi dividido em dois componentes: parede e teto. A seguir, o processo será apresentado de forma detalhado.

Geração de malha da parede do forno:

Etapas 1. Inicialmente, na árvore de hierarquia do *software* a opção *mesh* foi selecionada (Figura 35).

Figura 35 – Árvore de hierarquia modulo *Mechanical*



Fonte: Autoria própria (2023)

Uma caixa de diálogo se abre. A configuração da malha foi feita conforme os parâmetros apresentados na Figura 36.

Figura 36 – Configuração da malha do modelo da parede do forno

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
☐ Element Size	Default (0,22307 m)
Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
☐ Growth Rate	Default (1,85)
☐ Max Size	Default (0,44615 m)
Mesh Defeaturing	Yes
☐ Defeature Size	Default (1,1154e-003 m)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No
Size Formulation...	Program Controlled
Bounding Box Di...	4,4615 m
Average Surface ...	8,8697 m ²
Minimum Edge L...	4,4296 m
Enable Size Field...	No
Quality	
Inflation	
Use Automatic In...	None
Inflation Option	Total Thickness
☐ Number of La...	1
☐ Growth Rate	1,2
☐ Maximum Thi...	0,2 m
Inflation Algorit...	Pre
Advanced	
Number of CPUs ...	Program Controlled
Straight Sided El...	No
Rigid Body Behav...	Dimensionally Reduced
Triangle Surface ...	Program Controlled
Use Asymmetric ...	No
Topology Checki...	Yes
Pinch Tolerance	Default (2,0077e-003 m)
Generate Pinch o...	No

Fonte: Autoria própria (2023)

Etapas 2. Algumas configurações adicionais foram realizadas na malha pela inserção dos comandos *Face Meshing* e *Edge Sizing* (Figura 37).

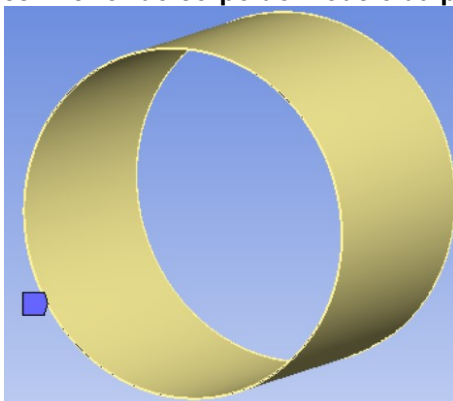
Figura 37 – Comandos adicionados para gerar a malha da parede do forno



Fonte: Autoria própria (2023)

Em *Face Meshing* foi selecionada a face da base inferior do modelo, indicada na Figura 38.

Figura 38 – Face inferior do corpo do modelo da parede do forno



Fonte: Autoria própria (2023)

A configuração realizada neste comando é apresentada na Figura 39. O *Internal Number of Divisions*, para paredes com espessura de 10 mm, foi igual a 7. No entanto, para materiais com espessuras de 50 e 100 mm, este parâmetro foi definido como 12.

Figura 39 – Configuração do *internal number of divisions* para a parede do forno

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Suppressed	No
Mapped Mesh	Yes
☐ Internal Number of Divisions	7
Constrain Boundary	No

Fonte: Autoria própria (2023).

Em *Edge Sizing*, a geometria da borda externa da mesma face, da base inferior do modelo, foi selecionada (Figura 38). As configurações dos fatores utilizados neste comando podem ser visualizadas na Figura 40.

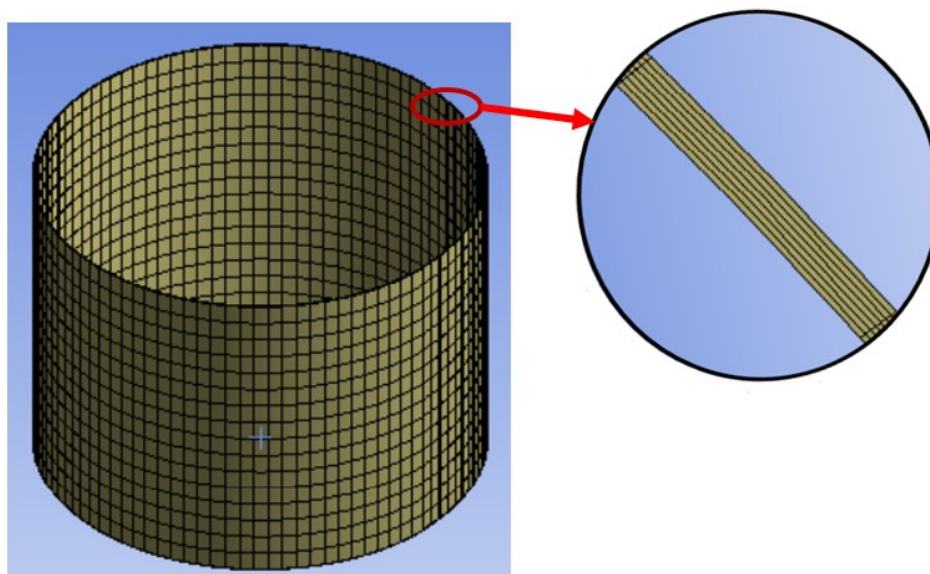
Figura 40 – Configuração do *edge sizing* para malhada da parede do forno

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Edge
Definition	
Suppressed	No
Type	Number of Divisions
☐ Number of Divisions	100
Advanced	
Behavior	Hard
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No
Bias Type	No Bias

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 41 apresenta a malha gerada no modelo da parede do forno para espessura de 10 mm. No detalhe da face da parede do forno é apresentada a divisão em camadas, sendo o número de divisões igual a 7.

Figura 41 – Malha do modelo do corpo da parede do forno



Fonte: Autoria própria (2023)

Geração de malhada no teto do forno:

Etapa 1. Inicialmente, na árvore de hierarquia do *software* a opção *mesh* foi selecionada, como apresentado anteriormente na Figura 35.

Uma caixa de diálogo se abre. A configuração do *mesh* foi feita conforme os parâmetros apresentados na Figura 42.

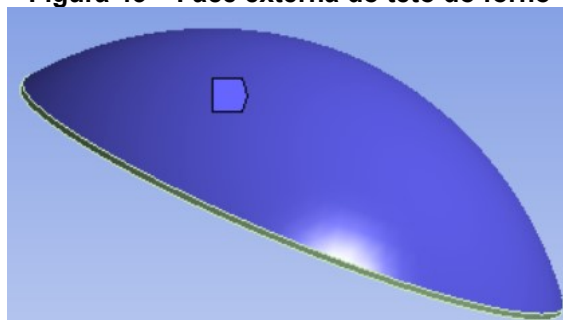
Figura 42 – Configuração da malha do modelo do teto do forno

-	Display	
	Display Style	Use Geometry Setting
-	Defaults	
	Physics Preference	Mechanical
	Element Order	Program Controlled
	☐ Element Size	Default (0,21581 m)
-	Sizing	
	Use Adaptive Sizing	No
	☐ Growth Rate	Default (1,85)
	☐ Max Size	Default (0,43161 m)
	Mesh Defeaturing	Yes
	☐ Defeature Size	Default (1,079e-003 m)
	Capture Curvature	No
	Capture Proximity	No
	Size Formulation...	Program Controlled
	Bounding Box Di...	4,3161 m
	Average Surface ...	3,5287 m ²
	Minimum Edge L...	1,4417e-002 m
	Enable Size Field...	No
+	Quality	
-	Inflation	
	Use Automatic In...	None
	Inflation Option	Total Thickness
	☐ Number of La...	1
	☐ Growth Rate	1,2
	☐ Maximum Thi...	0,2 m
	Inflation Algorit...	Pre
	View Advanced ...	No
-	Advanced	
	Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controll...
	Straight Sided Elements	No
	Rigid Body Behavior	Dimensionally Re...
	Triangle Surface Mesher	Program Controll...
	Use Asymmetric Mapped Mesh (Beta)	No
	Topology Checking	Yes
	Pinch Tolerance	Default (1,9422e-...
	Generate Pinch on Refresh	No

Fonte: Autoria própria (2023)

Etapa 2. Algumas configurações adicionais foram realizadas pela inserção dos comandos *Face Meshing* e *Edge Sizing*. Mesmos passos utilizados para gerar a malha da parede do forno (Figura 37). Em *Face Meshing* foi selecionada a face externa do teto do forno, conforme Figura 43.

Figura 43 – Face externa do teto do forno



Fonte: Autoria própria (2023)

Os parâmetros utilizados neste comando podem ser visualizados na Figura 44.

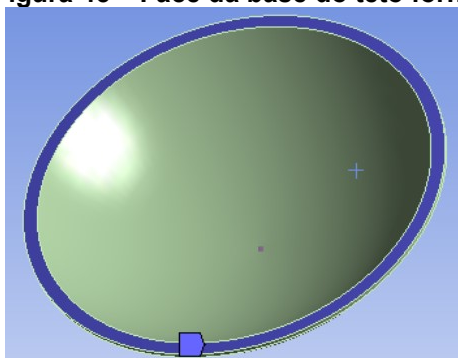
Figura 44 – Configuração do *face meshing* para a malha do teto do forno

[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
☐ Element Size	7,e-002 m
[-] Advanced	
☐ Defeature Size	Default (1,079e-003 m)
Influence Volume	No
Behavior	Soft
☐ Growth Rate	Default (1,85)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

Fonte: Autoria própria (2023)

Em *Edge Sizing*, a geometria selecionada foi a base do teto do forno (Figura 45).

Figura 45 – Face da base do teto forno



Fonte: Autoria própria (2023)

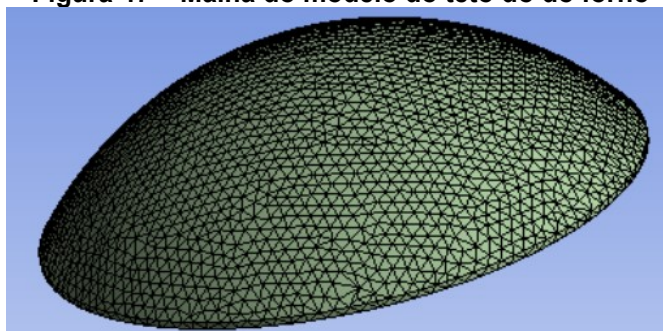
As configurações utilizadas neste comando pode ser visualizadas na Figura 46.

Figura 46 – Configuração do *edge sizing* para o teto do forno

[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Suppressed	No
Mapped Mesh	Yes
☐ Internal Number of Divisions	12
Constrain Boundary	No

Fonte: Autoria própria (2023)

Da mesma forma que no processo de geração de malha da parede do forno, o *Internal Numbers of Division* foi igual a 7 para os materiais com espessura de 10 mm e 12 para materiais com espessuras de 50 mm e 100 mm. A Figura 47 mostra a malha gerado no modelo do teto do forno.

Figura 47 – Malha do modelo do teto do do forno

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 20 apresenta as quantidades de nós e elementos das malhas geradas para os modelos da parede e teto do forno.

Tabela 20 – Estatísticas das malhas para os modelos da parede e teto do forno

Componente	Espessura (mm)	Nós	Elementos
Parede	10	51900	11200
	50	80276	18048
	100	188530	42840
Teto	10	18201	9273
	50	19101	9620
	100	37542	21442

Fonte: Autoria própria (2023)

**APÊNDICE D - Questionários I e II -Determinação dos pesos dos critérios de
seleção de materiais**

Pesquisa para determinação dos pesos dos Critérios de Seleção dos Materiais (CSM) utilizados para seleção de materiais de construção de fornos de produção de carvão vegetal

Prezado(a) professor(a),

Respeitosamente, venho solicitar sua contribuição no preenchimento do presente questionário, que faz parte da pesquisa de Doutorado do acadêmico Antão Rodrigo Valentim, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), sob orientação do Prof. Dr. Aldo Braghini Junior.

Antecipadamente agradeço sua colaboração!

Qualquer dúvida, por favor, entrar em contato.

Antão Rodrigo Valentim, M Eng.

Os objetivos destes questionários são:

Questionário I - mensurar o grau de importância entre os Requisitos do Cliente (RC);

Questionário II - mensurar o grau de relacionamento entre os (RC) e os Critérios de Seleção dos Materiais (CSM).

Posteriormente, estes julgamentos serão utilizados em uma metodologia de seleção de materiais para construção de fornos de carvão vegetal.

Questionário I - Determinação da importância entre os Requisitos do Cliente (RC)

1- Qual a influência do **(RC1) CICLO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO MAIS CURTO**, sobre os RC listados abaixo?

	Nenhum (0)	Baixa (1)	Média (2)	Alta (3)	Muito alta (4)
Menor consumo de energia durante o processo de produção (RC2)	☐	☐	☐	☐	☐
Maior controle da fase de aquecimento (RC3)	☐	☐	☐	☐	☐
O material de construção do forno deve ser facilmente encontrado no mercado (RC4)	☐	☐	☐	☐	☐
O material de construção deve ser facilmente trabalhável durante a fase de fabricação do forno (RC5)	☐	☐	☐	☐	☐
O material de construção do forno deve permitir fácil manutenção e reparo (RC6)	☐	☐	☐	☐	☐
O material de construção do forno deve ser barato (RC7)	☐	☐	☐	☐	☐
Quanto mais leve o material de construção do forno, melhor (RC8)	☐	☐	☐	☐	☐
O material de construção do forno deve possuir boa resistência a corrosão (RC9)	☐	☐	☐	☐	☐
O material de construção do forno deve possuir boa resistência ao desgaste (RC10)	☐	☐	☐	☐	☐
O material de construção do forno deve gerar menor impacto ambiental durante seu processo de fabricação (RC11)	☐	☐	☐	☐	☐
Preferencialmente, o material do forno deve ser reciclável (RC12)	☐	☐	☐	☐	☐
Preferencialmente, o material de construção do forno deverá ser reutilizado (RC13)	☐	☐	☐	☐	☐

Seguido o mesmo procedimento da questão 01, foram realizadas as comparações entre todos os RC.

Questionário II - Determinação da importância entre os Requisitos do Cliente (RC) e os Critérios de Seleção de Materiais (CSM).

Nesta seção você deve opinar sobre a relação de importância existentes entre os RC e CSM, utilizando a seguinte escala: (0) nenhuma relação; (1) relação fraca; (3) relação moderada; (6) relação forte; e (9) relação muito forte.

Quadro 12 – Definição dos critérios de seleção de materiais

RE	Definição
Tempo da fase de aquecimento (CSM 1):	Intervalo de tempo que tem início com o aquecimento do forno, partindo da temperatura ambiente, até a temperatura final de carbonização, mais o tempo de permanência nesta temperatura.
Tempo da fase de resfriamento (CSM 2):	Intervalo de tempo que tem início com o fim da fase de aquecimento até a temperatura de abertura segura do forno.
Calor dissipado na fase de aquecimento (CSM 3):	Energia térmica total perdida para o ambiente externo ao forno durante a fase de aquecimento.
Calor fornecido na fase de aquecimento (CSM 4):	Energia térmica total fornecida na fase de aquecimento.
Massa total dos materiais (CSM 5):	Somatório das massas dos materiais utilizados na construção do forno, conforme projeto inicial.
Custo total dos materiais (CSM6):	Custo total com a aquisição dos materiais que serão utilizados na construção do forno.
Eco-custo (CSM 7)	Impacto ambiental decorrente da produção dos materiais de construção do forno; é o investimento que deve ser feito para reduzir o impacto ambiental e o esgotamento de materiais do planeta.
Pegada Carbono (CSM 8):	Impacto ambiental decorrente da produção dos materiais de construção do forno, em termos de gases de efeito estufa.
Tenacidade a fratura (CSM 9)	A tenacidade a fratura de materiais pode ser encontrada na literatura, já que para seu cálculo é necessária a realização de ensaio mecânico.
Disponibilidade do material (CSM 10)	Facilidade de encontrar o material no mercado nacional.
Capacidade de fabricação (CSM 11)	Facilidade de processar o material para atingir as formas e dimensões pretendidas.
Capacidade de manutenção (CSM 12)	Facilidade de realizar reparos no material.
Resistência a corrosão (CSM 13)	O quanto o material resiste a corrosão, considerando que ele estará em contato com gases provenientes da carbonização, a temperatura de aproximadamente 400 °C.
Reciclabilidade (CSM 14)	Capacidade do material em ser transformado novamente em matéria-prima e incorporado novamente no processo produtivo.
Reutilização (CSM 15)	Capacidade de o material ser reutilizado, para mesma finalidade ou não, mantendo suas propriedades originais.

14- Qual a relação existente entre cada um dos CSM, listados a seguir, e o (RC1) CICLO DE PRODUÇÃO DE CARVÃO MAIS CURTO?

	Nenhum (0)	Fraco (1)	Moderado (3)	Forte (6)	Muito forte (9)
Tempo da fase de aquecimento (CSM1);	☐	☐	☐	☐	☐
Tempo da fase de resfriamento (CSM2);	☐	☐	☐	☐	☐
Energia dissipada na fase aquecimento (CSM3);	☐	☐	☐	☐	☐
Energia fornecida na fase de aquecimento (CSM4);	☐	☐	☐	☐	☐
Massa total dos materiais (CSM5);	☐	☐	☐	☐	☐
Custo total dos materiais (CSM6);	☐	☐	☐	☐	☐
Eco-custos (CSM7);	☐	☐	☐	☐	☐
Pegada de carbono (CSM8);	☐	☐	☐	☐	☐
Tenacidade a fratura (CSM9);	☐	☐	☐	☐	☐
Disponibilidade do material (CSM10);	☐	☐	☐	☐	☐
Capacidade de fabricação (CSM11);	☐	☐	☐	☐	☐
Capacidade de manutenção (CSM12);	☐	☐	☐	☐	☐
Resistência a corrosão (CSM13);	☐	☐	☐	☐	☐
Reciclabilidade (CSM14);	☐	☐	☐	☐	☐
Reutilização (CSM15);	☐	☐	☐	☐	☐

Seguido o mesmo procedimento da questão 14, foram realizadas as comparações entre os RC 2 ao RC13 com os CSM 1 ao CSM 15.

APÊNDICE E - Questionário III - Determinação dos Critérios de Seleção não numéricos

Pesquisa para determinação dos valores dos Critérios de Seleção dos Materiais (CSM) não numéricos para materiais de construção de fornos de produção de carvão vegetal

Prezado(a) professor(a),

Respeitosamente, venho solicitar sua contribuição no preenchimento do presente questionário, que faz parte da pesquisa de Doutorado do acadêmico Antão Rodrigo Valentim, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), sob orientação do Prof. Dr. Aldo Braghini Junior.

Antecipadamente agradeço sua colaboração!

Qualquer dúvida, por favor, entrar em contato.

Antão Rodrigo Valentim, M Eng.

Contextualização

Quando um problema de decisão envolve dados ou critérios não numéricos, os tomadores de decisão/especialistas podem ter dúvidas sobre sua opinião, ou seja, é um processo onde pode existir incerteza. Para resolver a imprecisão, ambiguidade e subjetividade do julgamento humano, a teoria dos conjuntos *fuzzy* foi proposta por Zadeh (1965). Em suma, a teoria dos conjuntos difusos oferece uma maneira matematicamente precisa de modelar preferências vagas (KABIR, 2014). Para obtenção dos CSM qualitativos, serão utilizados termos linguísticos *fuzzy* trapezoidal.

Questionário III – Determinação dos valores dos Critérios de Seleção de Materiais, não numéricos, para os materiais listados

Nesta seção, você deverá realizar os julgamentos de cada um dos CSM, para cada um dos materiais participantes, utilizando para isso as variáveis linguísticas apresentadas no Quadro 13.

Quadro 13 – Termos linguísticos fuzzytrapezoidais

Variável linguística	Abrev.
Muito baixo	MB
Baixo	B
Relativamente baixo	RB
Médio	M
Relativamente alta	RA
Alto	A
Muito alto	MA

Fonte: adaptado de Kabir (2014)

ATENÇÃO: Por favor, antes de iniciar, leia as definições dos CSM, apresentadas no Quadro 14.

Quadro 14 – Definição dos CSM obtidos por termos linguísticos fuzzy

Critério de Seleção de Materiais	Definição
Disponibilidade do material (CSM 10)	Facilidade de encontrar o material no mercado nacional
Capacidade de fabricação (CSM 11)	Facilidade de processar o material até atingir as formas e dimensões pretendidas.
Capacidade de manutenção (CSM 12)	Facilidade de realizar reparos no material.
Resistência a corrosão (CSM 13)	Capacidade do material resistir a corrosão, considerando os gases provenientes do processo de carbonização (CH ₄ , CO ₂ , CO, H ₂ , O ₂ e hidrocarbonetos); e a temperatura de trabalho de 400 °C.
Reciclabilidade (CSM 14)	Capacidade do material ser transformado em matéria prima e incorporado ao processo produtivo.
Reutilização (CSM 15)	Capacidade do material ser reutilizado, mantendo suas propriedades originais.

Fonte: autoria própria (2023)

1- Com relação ao aço AISI 1020, qual seu julgamento para cada um dos CSM listados?

CSM não numéricos	MB	B	RB	M	RA	A	MA
Disponibilidade do material	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Capacidade de fabricação	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Capacidade de manutenção	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Resistência a corrosão	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Reciclabilidade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Reutilização	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Seguido o mesmo procedimento adotado para a questão 1, foram realizados os julgamentos pelos especialistas para cada um dos materiais que participaram do processo de seleção.

**APÊNDICE F - Tabelas com as conversações dos termos linguísticos para
números *fuzzy* trapezoidal para os materiais utilizados no exemplo de
aplicação**

Tabela 21 – Conversão de termos linguísticos para números *fuzzy* trapezoidal - Aço AISI 1020 (M1)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,00	0,00	0,20	0,50	0,00	0,00
	B	0,00	0,00	0,30	0,60	0,00	0,00
	C	0,10	0,10	0,40	0,70	0,10	0,10
	D	0,20	0,20	0,50	0,80	0,20	0,20
<i>Especialista 2</i>	A	0,70	0,70	0,70	0,10	0,70	0,70
	B	0,90	0,90	0,90	0,20	0,90	0,90
	C	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00	1,00
	D	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00
<i>Especialista 3</i>	A	0,70	0,70	0,70	0,10	0,70	0,20
	B	0,90	0,70	0,70	0,20	0,70	0,30
	C	1,00	0,80	0,80	0,20	0,80	0,40
	D	1,00	0,90	0,90	0,30	0,90	0,50
<i>Especialista 4</i>	A	0,70	0,40	0,40	0,00	0,40	0,10
	B	0,70	0,50	0,50	0,00	0,50	0,20
	C	0,80	0,50	0,50	0,10	0,50	0,20
	D	0,90	0,60	0,60	0,20	0,60	0,30

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 22 – Conversão de termos linguísticos para números *fuzzy* trapezoidal - Aço inoxidável AISI 316 L(M2)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	C	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	D	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
<i>Especialista 2</i>	A	0,40	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50
	B	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60
	C	0,50	0,50	0,70	0,70	0,70	0,70
	D	0,60	0,60	0,80	0,80	0,80	0,80
<i>Especialista 3</i>	A	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	B	0,70	0,70	0,70	0,90	0,70	0,70
	C	0,80	0,80	0,80	1,00	0,80	0,80
	D	0,90	0,90	0,90	1,00	0,90	0,90
<i>Especialista 4</i>	A	0,50	0,40	0,40	0,70	0,40	0,40
	B	0,60	0,50	0,50	0,70	0,50	0,50
	C	0,70	0,50	0,50	0,80	0,50	0,50
	D	0,80	0,60	0,60	0,90	0,60	0,60

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 23 – Conversão de termos linguísticos para números fuzzy trapezoida - Nimonic 75 (M3)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,70	0,50	0,40	0,00	0,10	0,10
	B	0,70	0,60	0,50	0,00	0,20	0,20
	C	0,80	0,70	0,50	0,10	0,20	0,20
	D	0,90	0,80	0,60	0,20	0,30	0,30
<i>Especialista 2</i>	A	0,00	0,00	0,20	0,70	0,40	0,40
	B	0,00	0,00	0,30	0,90	0,50	0,50
	C	0,10	0,10	0,40	1,00	0,50	0,50
	D	0,20	0,20	0,50	1,00	0,60	0,60
<i>Especialista 3</i>	A	0,00	0,40	0,20	0,70	0,20	0,40
	B	0,00	0,50	0,30	0,70	0,30	0,50
	C	0,10	0,50	0,40	0,80	0,40	0,50
	D	0,20	0,60	0,50	0,90	0,50	0,60
<i>Especialista 4</i>	A	0,4	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2
	B	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3
	C	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4
	D	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 24 – Conversão de termos linguísticos para números fuzzy trapezoidal - Incoloy 800 (M4)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,70	0,50	0,50	0,00	0,10	0,10
	B	0,90	0,60	0,60	0,00	0,20	0,20
	C	1,00	0,70	0,70	0,10	0,20	0,20
	D	1,00	0,80	0,80	0,20	0,30	0,30
<i>Especialista 2</i>	A	0,00	0,00	0,20	0,70	0,50	0,50
	B	0,00	0,00	0,30	0,90	0,60	0,60
	C	0,10	0,10	0,40	1,00	0,70	0,70
	D	0,20	0,20	0,50	1,00	0,80	0,80
<i>Especialista 3</i>	A	0,00	0,50	0,50	0,70	0,20	0,40
	B	0,00	0,60	0,60	0,90	0,30	0,50
	C	0,10	0,70	0,70	1,00	0,40	0,50
	D	0,20	0,80	0,80	1,00	0,50	0,60
<i>Especialista 4</i>	A	0,40	0,20	0,40	0,70	0,20	0,20
	B	0,50	0,30	0,50	0,70	0,30	0,30
	C	0,50	0,40	0,50	0,80	0,40	0,40
	D	0,60	0,50	0,60	0,90	0,50	0,50

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 25 – Conversão de termos linguísticos para números fuzzy trapezoidal -Tijolo maciço (argila comum) (I1)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,00	0,10	0,50	0,50	0,70	0,70
	B	0,00	0,20	0,60	0,60	0,90	0,90
	C	0,10	0,20	0,70	0,70	1,00	1,00
	D	0,20	0,30	0,80	0,80	1,00	1,00
<i>Especialista 2</i>	A	0,70	0,70	0,70	0,70	0,00	0,10
	B	0,90	0,90	0,90	0,90	0,00	0,20
	C	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10	0,20
	D	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	0,30
<i>Especialista 3</i>	A	0,70	0,70	0,40	0,20	0,00	0,00
	B	0,90	0,90	0,50	0,30	0,00	0,00
	C	1,00	1,00	0,50	0,40	0,10	0,10
	D	1,00	1,00	0,60	0,50	0,20	0,20
<i>Especialista 4</i>	A	0,70	0,70	0,40	0,70	0,20	0,40
	B	0,90	0,90	0,50	0,90	0,30	0,50
	C	1,00	1,00	0,50	1,00	0,40	0,50
	D	1,00	1,00	0,60	1,00	0,50	0,60

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 26 – Conversão de termos linguísticos para números fuzzy trapezoidal -Tijolo refratário (I2)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,00	0,20	0,40	0,20	0,70	0,70
	B	0,00	0,30	0,50	0,30	0,90	0,90
	C	0,10	0,40	0,50	0,40	1,00	1,00
	D	0,20	0,50	0,60	0,50	1,00	1,00
<i>Especialista 2</i>	A	0,40	0,40	0,20	0,70	0,10	0,20
	B	0,50	0,50	0,30	0,90	0,20	0,30
	C	0,50	0,50	0,40	1,00	0,20	0,40
	D	0,60	0,60	0,50	1,00	0,30	0,50
<i>Especialista 3</i>	A	0,50	0,70	0,20	0,20	0,00	0,00
	B	0,60	0,70	0,30	0,30	0,00	0,00
	C	0,70	0,80	0,40	0,40	0,10	0,10
	D	0,80	0,90	0,50	0,50	0,20	0,20
<i>Especialista 4</i>	A	0,70	0,70	0,50	0,70	0,20	0,40
	B	0,90	0,90	0,60	0,90	0,30	0,50
	C	1,00	1,00	0,70	1,00	0,40	0,50
	D	1,00	1,00	0,80	1,00	0,50	0,60

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 27 – Conversão de termos linguísticos para números *fuzzy* trapezoidal – Tijolo isolante (I3)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,00	0,10	0,50	0,70	0,70	0,70
	B	0,00	0,20	0,60	0,70	0,90	0,90
	C	0,10	0,20	0,70	0,80	1,00	1,00
	D	0,20	0,30	0,80	0,90	1,00	1,00
<i>Especialista 2</i>	A	0,20	0,20	0,20	0,70	0,10	0,10
	B	0,30	0,30	0,30	0,90	0,20	0,20
	C	0,40	0,40	0,40	1,00	0,20	0,20
	D	0,50	0,50	0,50	1,00	0,30	0,30
<i>Especialista 3</i>	A	0,20	0,70	0,20	0,50	0,00	0,00
	B	0,30	0,70	0,30	0,60	0,00	0,00
	C	0,40	0,80	0,40	0,70	0,10	0,10
	D	0,50	0,90	0,50	0,80	0,20	0,20
<i>Especialista 4</i>	A	0,70	0,70	0,40	0,70	0,20	0,40
	B	0,70	0,90	0,50	0,90	0,30	0,50
	C	0,80	1,00	0,50	1,00	0,40	0,50
	D	0,90	1,00	0,60	1,00	0,50	0,60

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 28 – Conversão de termos linguísticos para números *fuzzy* trapezoidal - Argamassa com cimento, areia e pedra (I4)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,00	0,20	0,10	0,50	0,70	0,70
	B	0,00	0,30	0,20	0,60	0,90	0,90
	C	0,10	0,40	0,20	0,70	1,00	1,00
	D	0,20	0,50	0,30	0,80	1,00	1,00
<i>Especialista 2</i>	A	0,70	0,70	0,70	0,70	0,10	0,00
	B	0,90	0,90	0,90	0,90	0,20	0,00
	C	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	0,10
	D	1,00	1,00	1,00	1,00	0,30	0,20
<i>Especialista 3</i>	A	0,70	0,70	0,70	0,20	0,00	0,00
	B	0,90	0,90	0,90	0,30	0,00	0,00
	C	1,00	1,00	1,00	0,40	0,10	0,10
	D	1,00	1,00	1,00	0,50	0,20	0,20
<i>Especialista 4</i>	A	0,70	0,70	0,50	0,70	0,10	0,10
	B	0,90	0,90	0,60	0,90	0,20	0,20
	C	1,00	1,00	0,70	1,00	0,20	0,20
	D	1,00	1,00	0,80	1,00	0,30	0,30

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 29 – Conversão de termos linguísticos para números *fuzzy* trapezoidal – Manta cerâmica (I5)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,00	0,20	0,40	0,40	0,70	0,70
	B	0,00	0,30	0,50	0,50	0,90	0,90
	C	0,10	0,40	0,50	0,50	1,00	1,00
	D	0,20	0,50	0,60	0,60	1,00	1,00
<i>Especialista 2</i>	A	0,40	0,40	0,40	0,70	0,10	0,10
	B	0,50	0,50	0,50	0,90	0,20	0,20
	C	0,50	0,50	0,50	1,00	0,20	0,20
	D	0,60	0,60	0,60	1,00	0,30	0,30
<i>Especialista 3</i>	A	0,40	0,40	0,20	0,70	0,00	0,00
	B	0,50	0,50	0,30	0,70	0,00	0,00
	C	0,50	0,50	0,40	0,80	0,10	0,10
	D	0,60	0,60	0,50	0,90	0,20	0,20
<i>Especialista 4</i>	A	0,50	0,40	0,40	0,70	0,10	0,10
	B	0,60	0,50	0,50	0,90	0,20	0,20
	C	0,70	0,50	0,50	1,00	0,20	0,20
	D	0,80	0,60	0,60	1,00	0,30	0,30

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 30 – Conversão de termos linguísticos para números *fuzzy* trapezoidal – Lã de rocha (I6)

		CSM 10	CSM 11	CSM 12	CSM 13	CSM 14	CSM 15
<i>Especialista 1</i>	A	0,10	0,10	0,50	0,50	0,70	0,70
	B	0,20	0,20	0,60	0,60	0,90	0,90
	C	0,20	0,20	0,70	0,70	1,00	1,00
	D	0,30	0,30	0,80	0,80	1,00	1,00
<i>Especialista 2</i>	A	0,40	0,40	0,40	0,70	0,10	0,10
	B	0,50	0,50	0,50	0,90	0,20	0,20
	C	0,50	0,50	0,50	1,00	0,20	0,20
	D	0,60	0,60	0,60	1,00	0,30	0,30
<i>Especialista 3</i>	A	0,50	0,40	0,40	0,50	0,00	0,00
	B	0,60	0,50	0,50	0,60	0,00	0,00
	C	0,70	0,50	0,50	0,70	0,10	0,10
	D	0,80	0,60	0,60	0,80	0,20	0,20
<i>Especialista 4</i>	A	0,70	0,50	0,40	0,70	0,10	0,10
	B	0,70	0,60	0,50	0,90	0,20	0,20
	C	0,80	0,70	0,50	1,00	0,20	0,20
	D	0,90	0,80	0,60	1,00	0,30	0,30

Fonte: Autoria própria (2023)

**APÊNDICE G -Etapas do processo de ranqueamento dos materiais do
exemplo de aplicação**

Tendo como referência inicial a Tabela 14 para o ranqueamento dos materiais que participaram do processo de seleção, serão aplicados os passos do método multicritério TOPSIS estendido, conforme seção 3.3.1.

Etapa 01. Converta as medidas brutas (x_{ij}) nas medidas padronizadas (r_{ij}) Tabela 31.

Tabela 31 – Matriz r_{ij}

Materiais	CSM 1	CSM2	CSM3	CSM4	CSM 5	CSM6	CSM7	CSM8	CSM9	CSM 10	CSM 11	CSM12	CSM13	CSM14	CSM15
M1 (I)	0,000	1,000	0,315	0,000	0,914	0,968	0,970	0,890	0,596	0,912	0,469	0,775	0,000	1,000	0,784
M2 (I)	0,119	0,994	0,000	0,147	0,907	0,780	0,836	0,704	1,000	0,328	0,211	0,252	0,431	0,667	0,846
M3 (I)	0,142	0,995	0,069	0,175	0,888	0,017	0,001	0,007	0,798	0,018	0,000	0,000	0,399	0,000	0,000
M4 (I)	0,177	1,000	0,111	0,218	0,910	0,224	0,053	0,060	0,798	0,283	0,049	0,414	0,494	0,438	0,632
I1 (I)	0,534	0,803	0,988	0,638	0,266	0,998	1,000	0,984	0,005	1,000	0,828	1,000	0,680	0,542	0,896
I2 (I)	0,166	0,748	0,920	0,204	0,000	0,889	0,767	0,254	0,010	0,519	0,631	0,317	0,680	0,697	1,000
I3 (I)	1,000	0,816	1,000	1,000	1,000	0,885	0,942	0,831	0,000	0,093	0,586	0,317	1,000	0,624	0,896
I4 (I)	0,154	0,760	0,972	0,190	0,056	1,000	0,996	1,000	0,000	1,000	1,000	0,712	0,680	0,554	0,567
M1+I5 (II)	0,735	0,377	0,991	0,829	0,879	0,951	0,969	0,884	0,596	0,447	0,282	0,435	0,444	0,777	0,733
M1+I6 (II)	0,747	0,062	0,995	0,839	0,871	0,953	0,969	0,883	0,596	0,751	0,340	0,706	0,481	0,777	0,733
M2+I5 (II)	0,718	0,309	0,990	0,815	0,875	0,763	0,835	0,698	1,000	0,155	0,153	0,173	0,661	0,610	0,764
M2+I6 (II)	0,733	0,000	0,992	0,827	0,867	0,765	0,834	0,696	1,000	0,461	0,211	0,445	0,700	0,610	0,764
M3+I5 (II)	0,735	0,340	0,990	0,829	0,853	0,000	0,000	0,002	0,798	0,000	0,048	0,049	0,644	0,275	0,342
M3+I6 (II)	0,735	0,031	0,993	0,838	0,844	0,002	0,000	0,000	0,798	0,308	0,106	0,317	0,683	0,275	0,342
M1+I5 (III)	0,735	1,000	0,991	0,829	0,879	0,951	0,969	0,884	0,596	0,447	0,282	0,435	0,444	0,777	0,733
M1+I6 (III)	0,747	1,000	0,995	0,839	0,871	0,953	0,969	0,883	0,596	0,751	0,340	0,706	0,481	0,777	0,733
M2+I5 (III)	0,718	0,994	0,990	0,815	0,875	0,763	0,835	0,698	1,000	0,155	0,153	0,173	0,661	0,610	0,764
M2+I6 (III)	0,733	0,994	0,992	0,827	0,867	0,765	0,834	0,696	1,000	0,461	0,211	0,445	0,700	0,610	0,764
M3+I5 (III)	0,735	0,995	0,990	0,829	0,853	0,000	0,000	0,002	0,798	0,000	0,048	0,049	0,644	0,275	0,342
M3+I6 (III)	0,735	0,995	0,993	0,838	0,844	0,002	0,000	0,000	0,798	0,308	0,106	0,317	0,683	0,275	0,342

Fonte: Autoria própria (2023)

Etapa 02. A determinação do pesos dos CSM. Ver seção 4.1.2.1.

Etapa 03. Multiplique as colunas da matriz (r_{ij}) pesos associados Figura 38.

Tabela 32 – Matriz v_{ij}

	CSM 1	CSM2	CSM3	CSM4	CSM 5	CSM6	CSM7	CSM8	CSM9	CSM 10	CSM 11	CSM12	CSM13	CSM14	CSM15
Materiais	0.061	0.058	0.051	0.060	0.044	0.063	0.062	0.058	0.087	0.077	0.057	0.057	0.090	0.086	0.087
M1 (I)	0,000	0,058	0,016	0,000	0,040	0,061	0,060	0,052	0,052	0,070	0,027	0,045	0,000	0,086	0,069
M2 (I)	0,007	0,058	0,000	0,009	0,040	0,049	0,052	0,041	0,087	0,025	0,012	0,014	0,039	0,057	0,074
M3 (I)	0,009	0,058	0,004	0,011	0,039	0,001	0,000	0,000	0,069	0,001	0,000	0,000	0,036	0,000	0,000
M4 (I)	0,011	0,058	0,006	0,013	0,040	0,014	0,003	0,003	0,069	0,022	0,003	0,024	0,045	0,038	0,055
I1 (I)	0,033	0,047	0,050	0,039	0,012	0,063	0,062	0,057	0,000	0,077	0,047	0,057	0,062	0,046	0,078
I2 (I)	0,010	0,044	0,047	0,012	0,000	0,056	0,047	0,015	0,001	0,040	0,036	0,018	0,062	0,060	0,087
I3 (I)	0,061	0,048	0,051	0,060	0,044	0,055	0,058	0,048	0,000	0,007	0,034	0,018	0,090	0,053	0,078
I4 (I)	0,009	0,044	0,049	0,011	0,002	0,063	0,061	0,058	0,000	0,077	0,057	0,041	0,062	0,047	0,050
M1+I5 (II)	0,045	0,022	0,050	0,050	0,039	0,060	0,060	0,051	0,052	0,035	0,016	0,025	0,040	0,067	0,064
M1+I6 (II)	0,046	0,004	0,051	0,051	0,039	0,060	0,060	0,051	0,052	0,058	0,019	0,041	0,044	0,067	0,064
M2+I5 (II)	0,044	0,018	0,050	0,049	0,039	0,048	0,051	0,040	0,087	0,012	0,009	0,010	0,060	0,052	0,067
M2+I6 (II)	0,045	0,000	0,050	0,050	0,038	0,048	0,051	0,040	0,087	0,036	0,012	0,026	0,063	0,052	0,067
M3+I5 (II)	0,045	0,020	0,050	0,050	0,038	0,000	0,000	0,000	0,069	0,000	0,003	0,003	0,058	0,024	0,030
M3+I6 (II)	0,045	0,002	0,051	0,051	0,037	0,000	0,000	0,000	0,069	0,024	0,006	0,018	0,062	0,024	0,030
M1+I5 (III)	0,045	0,058	0,050	0,050	0,039	0,060	0,060	0,051	0,052	0,035	0,016	0,025	0,040	0,067	0,064
M1+I6 (III)	0,046	0,058	0,051	0,051	0,039	0,060	0,060	0,051	0,052	0,058	0,019	0,041	0,044	0,067	0,064
M2+I5 (III)	0,044	0,058	0,050	0,049	0,039	0,048	0,051	0,040	0,087	0,012	0,009	0,010	0,060	0,052	0,067
M2+I6 (III)	0,045	0,058	0,050	0,050	0,038	0,048	0,051	0,040	0,087	0,036	0,012	0,026	0,063	0,052	0,067
M3+I5 (III)	0,045	0,058	0,050	0,050	0,038	0,000	0,000	0,000	0,069	0,000	0,003	0,003	0,058	0,024	0,030
M3+I6 (III)	0,045	0,058	0,051	0,051	0,037	0,000	0,000	0,000	0,069	0,024	0,006	0,018	0,062	0,024	0,030

Fonte: Autoria própria (2023)

Etapa 04. Identifique solução ideal positiva (PIS) Tabela 33.

Tabela 33 – Matriz PIS

Materiais	CSM 1	CSM2	CSM3	CSM4	CSM 5	CSM6	CSM7	CSM8	CSM9	CSM 10	CSM 11	CSM12	CSM13	CSM14	CSM15
M1 (I)	0,0037	0,0000	0,0012	0,0037	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0000	0,0009	0,0002	0,0082	0,0000	0,0004
M2 (I)	0,0029	0,0000	0,0026	0,0027	0,0000	0,0002	0,0001	0,0003	0,0000	0,0027	0,0020	0,0018	0,0026	0,0008	0,0002
M3 (I)	0,0027	0,0000	0,0022	0,0025	0,0000	0,0038	0,0038	0,0033	0,0003	0,0058	0,0033	0,0033	0,0030	0,0073	0,0077
M4 (I)	0,0025	0,0000	0,0020	0,0022	0,0000	0,0024	0,0034	0,0030	0,0003	0,0031	0,0030	0,0011	0,0021	0,0023	0,0010
I1 (I)	0,0008	0,0001	0,0000	0,0005	0,0011	0,0000	0,0000	0,0000	0,0075	0,0000	0,0001	0,0000	0,0008	0,0015	0,0001
I2 (I)	0,0026	0,0002	0,0000	0,0023	0,0020	0,0000	0,0002	0,0019	0,0074	0,0014	0,0004	0,0015	0,0008	0,0007	0,0000
I3 (I)	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0076	0,0049	0,0006	0,0015	0,0000	0,0010	0,0001
I4 (I)	0,0027	0,0002	0,0000	0,0024	0,0017	0,0000	0,0000	0,0000	0,0076	0,0000	0,0000	0,0003	0,0008	0,0015	0,0014
M1+I5 (II)	0,0003	0,0013	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0018	0,0017	0,0011	0,0025	0,0004	0,0005
M1+I6 (II)	0,0002	0,0030	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0004	0,0014	0,0003	0,0022	0,0004	0,0005
M2+I5 (II)	0,0003	0,0016	0,0000	0,0001	0,0000	0,0002	0,0001	0,0003	0,0000	0,0043	0,0024	0,0023	0,0009	0,0011	0,0004
M2+I6 (II)	0,0003	0,0034	0,0000	0,0001	0,0000	0,0002	0,0001	0,0003	0,0000	0,0017	0,0020	0,0010	0,0007	0,0011	0,0004
M3+I5 (II)	0,0003	0,0015	0,0000	0,0001	0,0000	0,0039	0,0038	0,0033	0,0003	0,0060	0,0030	0,0030	0,0010	0,0039	0,0033
M3+I6 (II)	0,0003	0,0032	0,0000	0,0001	0,0000	0,0039	0,0038	0,0034	0,0003	0,0029	0,0026	0,0015	0,0008	0,0039	0,0033
M1+I5 (III)	0,0003	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0018	0,0017	0,0011	0,0025	0,0004	0,0005
M1+I6 (III)	0,0002	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0004	0,0014	0,0003	0,0022	0,0004	0,0005
M2+I5 (III)	0,0003	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0002	0,0001	0,0003	0,0000	0,0043	0,0024	0,0023	0,0009	0,0011	0,0004
M2+I6 (III)	0,0003	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0002	0,0001	0,0003	0,0000	0,0017	0,0020	0,0010	0,0007	0,0011	0,0004
M3+I5 (III)	0,0003	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0039	0,0038	0,0033	0,0003	0,0060	0,0030	0,0030	0,0010	0,0039	0,0033
M3+I6 (III)	0,0037	0,0000	0,0012	0,0037	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0000	0,0009	0,0002	0,0082	0,0000	0,0004

Fonte: Autoria própria (2023)

Etapa 05. Identifique solução ideal negativa (NIS) Tabela 34.

Tabela 34 – Matriz NIS

Materiais	CSM 1	CSM2	CSM3	CSM4	CSM 5	CSM6	CSM7	CSM8	CSM9	CSM 10	CSM 11	CSM12	CSM13	CSM14	CSM15
M1 (I)	0,0000	0,0034	0,0003	0,0000	0,0016	0,0037	0,0036	0,0027	0,0027	0,0050	0,0007	0,0020	0,0000	0,0073	0,0047
M2 (I)	0,0001	0,0034	0,0000	0,0001	0,0016	0,0024	0,0027	0,0017	0,0076	0,0006	0,0001	0,0002	0,0015	0,0033	0,0055
M3 (I)	0,0001	0,0034	0,0000	0,0001	0,0015	0,0000	0,0000	0,0000	0,0048	0,0000	0,0000	0,0000	0,0013	0,0000	0,0000
M4 (I)	0,0001	0,0034	0,0000	0,0002	0,0016	0,0002	0,0000	0,0000	0,0048	0,0005	0,0000	0,0006	0,0020	0,0014	0,0031
I1 (I)	0,0011	0,0022	0,0025	0,0015	0,0001	0,0039	0,0038	0,0033	0,0000	0,0060	0,0022	0,0033	0,0038	0,0022	0,0061
I2 (I)	0,0001	0,0019	0,0022	0,0002	0,0000	0,0031	0,0022	0,0002	0,0000	0,0016	0,0013	0,0003	0,0038	0,0036	0,0077
I3 (I)	0,0037	0,0023	0,0026	0,0037	0,0020	0,0031	0,0034	0,0023	0,0000	0,0001	0,0011	0,0003	0,0082	0,0029	0,0061
I4 (I)	0,0001	0,0020	0,0024	0,0001	0,0000	0,0039	0,0038	0,0034	0,0000	0,0060	0,0033	0,0017	0,0038	0,0023	0,0025
M1+I5 (II)	0,0020	0,0005	0,0025	0,0025	0,0015	0,0036	0,0036	0,0026	0,0027	0,0012	0,0003	0,0006	0,0016	0,0044	0,0041
M1+I6 (II)	0,0021	0,0000	0,0026	0,0026	0,0015	0,0036	0,0036	0,0026	0,0027	0,0034	0,0004	0,0016	0,0019	0,0044	0,0041
M2+I5 (II)	0,0019	0,0003	0,0025	0,0024	0,0015	0,0023	0,0026	0,0016	0,0076	0,0001	0,0001	0,0001	0,0036	0,0027	0,0045
M2+I6 (II)	0,0020	0,0000	0,0025	0,0025	0,0015	0,0023	0,0026	0,0016	0,0076	0,0013	0,0001	0,0007	0,0040	0,0027	0,0045
M3+I5 (II)	0,0020	0,0004	0,0025	0,0025	0,0014	0,0000	0,0000	0,0000	0,0048	0,0000	0,0000	0,0000	0,0034	0,0006	0,0009
M3+I6 (II)	0,0020	0,0000	0,0026	0,0026	0,0014	0,0000	0,0000	0,0000	0,0048	0,0006	0,0000	0,0003	0,0038	0,0006	0,0009
M1+I5 (III)	0,0020	0,0034	0,0025	0,0025	0,0015	0,0036	0,0036	0,0026	0,0027	0,0012	0,0003	0,0006	0,0016	0,0044	0,0041
M1+I6 (III)	0,0021	0,0034	0,0026	0,0026	0,0015	0,0036	0,0036	0,0026	0,0027	0,0034	0,0004	0,0016	0,0019	0,0044	0,0041
M2+I5 (III)	0,0019	0,0034	0,0025	0,0024	0,0015	0,0023	0,0026	0,0016	0,0076	0,0001	0,0001	0,0001	0,0036	0,0027	0,0045
M2+I6 (III)	0,0020	0,0034	0,0025	0,0025	0,0015	0,0023	0,0026	0,0016	0,0076	0,0013	0,0001	0,0007	0,0040	0,0027	0,0045
M3+I5 (III)	0,0020	0,0034	0,0025	0,0025	0,0014	0,0000	0,0000	0,0000	0,0048	0,0000	0,0000	0,0000	0,0034	0,0006	0,0009
M3+I6 (III)	0,0020	0,0034	0,0026	0,0026	0,0014	0,0000	0,0000	0,0000	0,0048	0,0006	0,0000	0,0003	0,0038	0,0006	0,0009

Fonte: Autoria própria (2023)

Etapa 06. Calcular a distância para cada alternativa, tanto para a ideal (D^-), quanto para não ideal (D^+), e a proximidade relativa à solução ideal C_i . Por fim, realizar o ranqueamento dos materiais pelo maior valor de C_i (Tabela 35).

Tabela 35 – Matriz C_i							
Ranque	Materiais	Conf.	$\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2$	$\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2$	D_i^+	D_i^-	C_i
1	M1+I6	III	0,0069	0,0404	0,0828	0,2010	0,7081
2	M2+I6	III	0,0081	0,0393	0,0901	0,1983	0,6877
3	M1+I5	III	0,0097	0,0367	0,0985	0,1915	0,6603
4	M1+I6	II	0,0099	0,0370	0,0993	0,1923	0,6595
5	I1	I	0,0125	0,0420	0,1120	0,2049	0,6466
6	M2+I6	II	0,0115	0,0360	0,1073	0,1896	0,6386
7	M1+I5	II	0,0110	0,0338	0,1050	0,1837	0,6363
8	M2+I5	III	0,0124	0,0370	0,1115	0,1924	0,6330
9	I3	I	0,0160	0,0417	0,1265	0,2041	0,6175
10	M2+I5	II	0,0141	0,0340	0,1186	0,1843	0,6084
11	M1	I	0,0196	0,0376	0,1400	0,1940	0,5809
12	I4	I	0,0186	0,0351	0,1364	0,1874	0,5788
13	M2	I	0,0190	0,0307	0,1378	0,1751	0,5596
14	I2	I	0,0215	0,0282	0,1468	0,1678	0,5335
15	M3+I6	III	0,0268	0,0229	0,1637	0,1515	0,4806
16	M3+I5	III	0,0319	0,0216	0,1787	0,1468	0,4511
17	M3+I6	II	0,0300	0,0196	0,1732	0,1399	0,4468
18	M4	I	0,0285	0,0179	0,1688	0,1338	0,4421
19	M3+I5	II	0,0334	0,0186	0,1828	0,1363	0,4272
20	M3	I	0,0490	0,0112	0,2213	0,1060	0,3239

Fonte: Autoria própria (2023)