



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

STEFANIE ALMEIDA CAMPOS

ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE VEDAÇÕES EXTERNAS PARA
EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS COM APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO

FORTALEZA

2019

STEFANIE ALMEIDA CAMPOS

ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE VEDAÇÕES EXTERNAS PARA
EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS COM APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini.
Coorientadora: Profa. Dra. Vanessa Ribeiro Campos.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C217a Campos, Stefanie Almeida.
Análise comparativa de sistemas de vedações externas para edificações habitacionais com apoio à decisão multicritério / Stefanie Almeida Campos. – 2019.
93 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Alexandre Araujo Bertini.
Coorientação: Profa. Dra. Vanessa Ribeiro Campos.
1. Vedação externa. 2. Desempenho. 3. Habitações. 4. ELECTRE. 5. Decisão em grupo. I. Título.
CDD 624.1
-

STEFANIE ALMEIDA CAMPOS

ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE VEDAÇÕES EXTERNAS PARA
EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS COM APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em: 31/01/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Vanessa Ribeiro Campos (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Patricia Stella Pucharelli Fontanini
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

A Deus.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini, pela excelente orientação e pela maneira prática e simples de ser orientador.

À Profa. Dra. Vanessa Ribeiro Campos, por ter sido mais que uma coorientadora, atuando ativamente como uma orientadora, sempre presente e disponível nos momentos de dúvida, compartilhando o seu conhecimento para nos ajudar a encontrar o melhor caminho.

Aos professores participantes da banca examinadora Patricia Stella Pucharelli Fontanini e Anselmo Ramalho Pitombeira Neto pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos diretores de empresas e professores entrevistados, pelo tempo concedido nas entrevistas e pelos verdadeiros ensinamentos dados sobre a Construção Civil.

À minha mãe, Rejane, pela força e coragem que me foram repassadas, os incentivos dados desde pequena e as abdições a qual teve que se submeter para que eu crescesse e me desenvolvesse.

Ao meu pai, Marcondes, pelo pouquinho de sua inteligência repassada, seu dom de ensinar e transmitir conhecimento, o qual foi para mim motivo de inspiração e admiração. Ao meu segundo pai, Josenildo, por não medir esforços para dar tudo o que nossa família precisava e pela luta diária de nos dar o melhor.

Às irmãs, Jeane, Yasmin e Nina, pelo companheirismo durante a vida, o ombro amigo, presença constantes e por serem as melhores amigas que eu poderia ter.

Ao namorado, Rodrigo, pelo ouvido e paciência para escutar todas as minhas lamúrias, compartilhar das minhas indecisões e me ajudar nas decisões.

Aos amigos do mestrado, Fabíola, Alisson e Felipe, pelo time formado, artigos e correções compartilhadas, pela amizade e apoio durante este mestrado. Às companheiras do CONSTRUIR, Denise e Micheline, pelos conselhos e ajuda durante a elaboração da dissertação e a todos os outros amigos pelas felicidades compartilhadas.

RESUMO

O desempenho das edificações influi diretamente na satisfação do usuário com sua moradia. A deficiência no desempenho das edificações é observada pela sua insatisfação e por medições que comprovam a diferença entre o desempenho previsto e o medido em uma edificação durante o seu funcionamento. Devido a isso, este trabalho tem como objetivo propor um modelo de decisão em grupo para seleção de um sistema construtivo de vedação de edificações habitacionais. Foram estudados os sistemas para vedações verticais externas, com foco no incentivo à inovação no setor da construção civil e a utilização de novas tecnologias, para a comparação da utilização de sistemas de vedação pré-fabricados com os sistemas tradicionais. Para a formulação do modelo, os principais critérios de avaliação foram estudados e os dados característicos dos sistemas de vedação foram consolidados com visitas a empresas executoras dos sistemas. A determinação da importância relativa e preferências dos critérios foram obtidas com a realização de entrevistas a diretores de construtoras e especialistas em conforto. O modelo foi realizado com o uso do método multicritério de apoio à tomada de decisão. Os pesos foram obtidos com o método das cartas e as preferências individuais e agregadas com os métodos ELECTRE III e ELECTRE IV utilizando-se o software ELECTRE III/IV. Como resultados, obteve-se a ordenação dos sistemas de vedação considerando-se o conforto do usuário e a rentabilidade do negócio. O resultado do modelo mostrou que a alternativa com melhor custo-benefício para uso em vedações é o painel pré-fabricado de alvenaria.

Palavras-chave: Vedação externa. Desempenho. Habitações. ELECTRE. Decisão em grupo.

ABSTRACT

Performance of buildings directly influences the user satisfaction with their dwelling. Deficiency in building performance is observed by the user dissatisfaction and by measurements that prove the difference between the expected performance and the measured in a building during its operation. Due to this, this work aims at the formulation of a group decision model for selection of a wall constructive system of residential buildings. Focusing on encouraging innovation in the construction industry and the use of new technologies, systems for external walls will be studied to compare the use of prefabricated systems with traditional ones. For model formulation, the main evaluation criteria were studied, and characteristic data of the systems studied was obtained by visits to companies. Determination of criteria relative importance and indifference and preference limits were obtained by interviews with building directors and comfort experts. The model was performed using the multicriteria decision-making. Normalized weights were obtained using the “pack of cards” and the individual and aggregated preferences with ELECTRE III and ELECTRE IV methods using ELECTRE III/IV software. As results, a wall system ordering model was obtained considering the user comfort and business profitability. Model validation showed that the most cost-effective alternative for use in external walls is prefabricated masonry panel.

Keywords: External Walls. Performance. Buildings. ELECTRE. Group decision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Vedação em alvenaria tradicional	18
Figura 2	– Sistema de vedação em alvenaria estrutural	19
Figura 3	– Montagem de painel de alvenaria	21
Figura 4	– Fechamento de formas para execução de paredes de concreto moldadas no local	22
Figura 5	– Armazenamento de painéis pré-fabricados de concreto	22
Figura 6	– Estrutura de steel frame com isolamento de lã de vidro	24
Figura 7	– Montagem de painel de wood frame	24
Figura 8	– Etapas da pesquisa	48
Figura 9	– Etapas de desenvolvimento do modelo	50
Figura 10	– Estrutura externa e interna do SV7	54
Figura 11	– Fase 1 da coleta de dados	59
Figura 12	– Fase 2 da coleta de dados	60
Figura 13	– Interface inicial do software ELECTRE III/IV	61
Figura 14	– Tela de inserção dos limites de indiferença, preferência e veto por critério.	61
Figura 15	– Aplicação do método das cartas com os diretores entrevistados	65
Figura 16	– Aplicação do método das cartas com os especialistas entrevistados	67
Figura 17	– Matriz de credibilidade das alternativas no ELECTRE IV	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Requisitos dos usuários para as edificações	28
Quadro 2 – Principais grandezas térmicas relacionadas ao cálculo do desempenho térmico	32
Quadro 3 – Valores mínimos de desempenho para vedações externas em campo e no laboratório	34
Quadro 4 – Quadro-resumo de estudos sobre tomada de decisão na construção	46
Quadro 5 – Projetos-padrão adotados para residências multifamiliares	49
Quadro 6 – Identificação dos painéis com respectivos DaTecs, material e especificações	52
Quadro 7 – Critérios de avaliação encontrados na literatura	55
Quadro 8 – Escalas e objetivos para os critérios de avaliação	58
Quadro 9 – Matriz de avaliação das alternativas	62
Quadro 10 – Características dos diretores entrevistados	64
Quadro 11 – Ordenação final das alternativas por decisor no ELECTRE III	70
Quadro 12 – Matriz de avaliação global para o ELECTRE IV	71
Quadro 13 – Pré-ordem completa das alternativas no ELECTRE IV	72
Quadro 14 – Resultados da análise de sensibilidade no ELECTRE IV	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos materiais conforme o valor do índice de propagação superficial de chamas	30
Tabela 2 – Tempos requeridos de resistência ao fogo	30
Tabela 3 – Transmitância térmica de paredes externas	33
Tabela 4 – Capacidade térmica de paredes externas	33
Tabela 5 – Preferências dos diretores de limites de indiferença, preferência e veto para cada critério	66
Tabela 6 – Preferências dos especialistas de limites de indiferença, preferência e veto para cada critério	68
Tabela 7 – Pesos normalizados obtidos pelo método das cartas por decisor e critério para o ELECTRE III	69
Tabela 8 – Parâmetros adotados em cada cenário	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	<i>Artificial Bee Colony</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytical Hierarchical Process</i>
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
CA	Concreto Armado
DATEC	Documento de Avaliação Técnica
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Expressing The Reality</i>
EPS	Poliestireno Expandido
ITA	Instituição Técnica Avaliadora
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MOGA	<i>Multi Objective Genetic Algorithm</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NIS	Solução Negativa Ideal
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PBQP-H	Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat
PIS	Solução Positiva Ideal
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrich Evaluation</i>
PVC	Policloreto de Vinila
SiNAT	Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais
SIP	Painéis de Isolamento Estrutural
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
XPS	Poliestireno Extrudido

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Fluxo de calor
W	Watts
m	metro
K	Kelvin
R_T	Resistência térmica total de ambiente a ambiente
U	Transmitância térmica
C	Capacidade térmica
J	Joule
C_T	Capacidade térmica de componentes
ϕ	Atraso térmico
e	Espessura
c	Calor específico
ρ	Densidade de massa aparente
R_t	Resistência térmica de um componente de superfície a superfície
α	Absortância à radiação solar
ren	Renovação
I_p	Índice de propagação de chama superficial
P_c	Fator de propagação de chama
Q	Fator de evolução do calor
R_w	Índice de redução sonora ponderado
$D_{nT,w}$	Diferença padronizada de nível ponderada
$D_{2m,nT,w}$	Diferença padronizada de nível ponderada a 2 m de distância da fachada
dB	Decibel
a/c	Água/cimento
P	Preferência estrita
Q	Preferência fraca
I	Indiferença
R	Incomparabilidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.2	Estrutura da dissertação	17
2	SISTEMAS CONSTRUTIVOS PARA VEDAÇÃO	18
2.1	Painéis de alvenaria	20
2.2	Painéis moldados in loco e pré-fabricados de concreto armado	21
2.3	Steel frame e wood frame	23
2.3.1	<i>Chapas de gesso</i>	24
2.3.2	<i>Placas cimentícias</i>	26
2.3.3	<i>Placas de OSB</i>	26
3	DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS	28
3.1	Indicadores de segurança	29
3.2	Indicadores de habitabilidade	31
3.3	Indicadores de sustentabilidade	35
3.4	Desempenho de sistemas construtivos brasileiros	36
4	TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO	38
4.1	Métodos multicritério de apoio à decisão	39
4.1.1	<i>ELECTRE III e ELECTRE IV</i>	41
4.1.2	<i>Método das cartas</i>	43
4.2	Aplicações na construção civil	45
5	METODOLOGIA DA PESQUISA	48
5.1	Etapas de desenvolvimento do modelo multicritério	49
5.1.1	<i>Estudo das alternativas</i>	51
5.1.2	<i>Definição dos critérios de avaliação</i>	55
5.1.3	<i>Coleta e análise de dados</i>	58
6	MODELO DE ORDENAÇÃO DOS SISTEMAS DE VEDAÇÃO	62
6.1	Definição das preferências dos decisores	63
6.2	Obtenção das preferências individuais	69
6.3	Agregação de preferências	70
6.4	Análise de sensibilidade	72
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75

REFERÊNCIAS	77
APÊNDICE A – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA O DECISOR 1	84
APÊNDICE B – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA O DECISOR 2	85
APÊNDICE C – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA O DECISOR 3	86
APÊNDICE D – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA O DECISOR 4	87
APÊNDICE E – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA O DECISOR 5	88
APÊNDICE F – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA O DECISOR 6	89
APÊNDICE G – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA O DECISOR 7	90
APÊNDICE H – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA O DECISOR 8	91
APÊNDICE I – RESULTADOS DO ELECTRE IV PARA O CENÁRIO 2	92
APÊNDICE J – RESULTADOS DO ELECTRE IV PARA O CENÁRIO 3	93

1 INTRODUÇÃO

O desempenho das edificações é um tema bastante pesquisado atualmente no Brasil, principalmente após a publicação do conjunto de normas de desempenho da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) relacionados ao tema. A NBR 15575-1:2013 define o desempenho de uma edificação como o seu comportamento em uso ao longo de sua vida útil.

Análises estatísticas sugerem que há uma diferença notável entre o desempenho previsto na fase de projeto e o desempenho medido durante o seu funcionamento. Essa diferença pode ser notada na eficiência energética, na qualidade do ar interno, no desempenho térmico, desempenho acústico, lumínico, entre outros. Conforme De Wilde (2014), numa análise da energia consumida por mês em função da temperatura média mensal, os valores simulados estão quase sempre abaixo dos medidos em campo. Os três principais causadores dessa ocorrência são: diferenças entre os conceitos previstos e os fenômenos medidos, entre os parâmetros embutidos nos softwares e os fenômenos medidos, e entre as previsões e o que exigem os certificados ambientais da legislação.

Quanto à eficiência energética, estudos na área sugerem que a energia utilizada em edificações é da ordem de 2,5 vezes o uso de energia previsto devido a diferença no seu desempenho em operação. Um dos fatores responsáveis é a ausência de monitoramento da edificação durante todo o seu ciclo de vida, impossibilitando a retroalimentação das informações do desempenho referente a operação e o consequente aprimoramento em novos projetos (MENEZES et al., 2012).

O estudo do desempenho das edificações é necessário, pois segundo o Institute for Market Transformation (2013), elas consomem grande quantidade de energia tanto durante a construção como durante o uso, resultando em custos ambientais que impactam a longo prazo. De acordo com Brasil (2015), o funcionamento das edificações (iluminação, ventilação, condicionamento, entre outros) é responsável por 15% do consumo de energia por setor, sendo 2% referentes as do setor público, 3% referentes as do setor comercial e 10% referentes às edificações habitacionais. Considerando-se apenas o consumo de energia elétrica, as edificações são responsáveis por 48% de consumo, ficando os outros 52% com o funcionamento dos setores industriais, energéticos e agropecuário. Para a redução do consumo de energia elétrica, deve-se haver uma melhoria nos projetos arquitetônicos, referentes à insolação e ventilação, bem como uma melhor definição dos sistemas construtivos utilizados, visando garantir o conforto térmico do ambiente.

Segundo Janda (2011), os usuários representam um papel crítico no consumo de energia das edificações, porém eles não são os principais responsáveis por isso. As mudanças necessárias para a redução do efeito estufa e das emissões de gás carbônico na atmosfera deverão ser desenvolvidas por arquitetos e engenheiros para melhorar o desempenho das edificações.

Um fator importante a ser observado é a satisfação do usuário no uso das edificações. Avaliações de pós-ocupação em edificações residenciais revelam as opiniões dos moradores quanto ao que eles vivenciam gerando *feedback* aos projetistas quanto a satisfação do usuário. Em uma pesquisa realizada com 923 usuários de unidades residenciais, com índice de resposta obtido de 17,9%, Brown (2016) demonstra que mais de 60% dos usuários criticam o ambiente térmico da edificação, quanto a necessidade de ventilação, resfriamento ou aquecimento. 88% dos participantes criticam o desempenho lumínico, alegando ausência ou excesso de iluminação durante o dia. Já com relação ao desempenho acústico, 90% dos usuários são insatisfeitos com as suas unidades residenciais, criticando barulhos causados por vizinhos, como conversas, passos e atividades no banheiro, comprovando a urgência do desenvolvimento de edificações com melhor desempenho

Para Borges (2008), a aplicação prática do conceito de desempenho é bastante difícil, pois envolve questões técnicas, interesses políticos, econômicos e deve atender as exigências dos usuários que são subjetivas e de difícil mensuração. Visando reduzir essa dificuldade, em 2013, foi lançada a última revisão das seis partes da NBR 15575 Edificações habitacionais – Desempenho que tratam dos requisitos gerais e específicos para os sistemas construtivos de estruturas, pisos, vedações, coberturas e instalações hidrossanitárias. Esta norma traz vários requisitos dos usuários relativos à segurança, habitabilidade e sustentabilidade que devem ser atendidos na construção de novos empreendimentos com fins habitacionais. Para cada sistema, são listados requisitos e critérios a serem atendidos, porém nem todos os requisitos têm a mesma importância para um dado sistema ou pode-se analisar o desempenho geral deste utilizando-se apenas alguns requisitos.

Desconsiderando-se os parâmetros de comportamento humano na análise de desempenho energético, os parâmetros dos sistemas de vedações são os mais influentes no desempenho da edificação, visto que as áreas das paredes são maiores que as áreas de piso e de cobertura. Em estudo realizado na Holanda, constatou-se que a condutividade térmica das paredes é um dos fatores críticos para o consumo de energia tanto em edificações novas, quanto em edificações mais antigas, além da percepção de que quando a incerteza de outros parâmetros relacionados a edificação aumenta, com o desvio padrão mudado de 10% para 30% na análise

de sensibilidade, o impacto do fator condutividade da vedação vertical aumenta consideravelmente nesse consumo (IOANNOU; ITARD, 2015).

As possibilidades de combinações para a formação de um sistema construtivo para utilização em vedação são infinitas, pois dependem do tipo do material utilizado e suas dimensões: no caso de blocos, podem ser cerâmico ou de concreto, com larguras de 9 cm, 14 cm, entre outros, do tipo de revestimento utilizado e as espessuras dos revestimentos internos e externos; podem ser de concreto moldado no local; no caso de painéis, podem ser de gesso, cimento, diferentes tipos de madeira, alvenaria ou concreto. Ademais também existem as diversas combinações entre os materiais e a utilização de resíduos na mistura.

Além dos sistemas tradicionais utilizados, podem ser utilizados sistemas com uso de vegetações, as chamadas “paredes vivas” (MATHEUS et al., 2016), sistemas com fachadas duplas (BARBOSA et al., 2013), e sistemas compostos, como o “sanduíche” de alvenaria que é formado por blocos cerâmicos e alvenaria de blocos de concretos, ligados por uma placa isolante de poliestireno extrudido, entre outros (PISELLO et al., 2012). Entender quais os sistemas oferecem melhores performances é essencial para a indústria entregar edificações que mantenham bom desempenho durante o seu ciclo de vida e sejam resistentes às mudanças climáticas ou às condições de uso dos moradores (DE WILDE, 2014).

O método multicritério de tomada de decisão consiste numa metodologia que pode ser utilizada para resolver problemas complexos de negócios, engenharias e outras áreas de atividades. Um problema multicritério é caracterizado pela presença de critérios conflitantes e incomensuráveis, como custo, desempenho, segurança, produtividade, confiabilidade, entre outros (WIECEK et al., 2008). O método também pode ser utilizado para avaliar o desempenho de edificações. Nesses casos, o contexto e os aspectos únicos de cada problema determinam os critérios de avaliação e quais os pesos de cada um. O uso apropriado dessa ferramenta possibilita a avaliação individual dos critérios e a avaliação geral multicritério juntamente com a análise de sensibilidade dos pesos considerados (SOEBARTO; WILLIAMSON, 2001).

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é propor um modelo para a análise comparativa de sistemas construtivos para vedação de edificações multifamiliares baseado em critérios de avaliação que expressem as dimensões técnicas, sustentáveis e econômicas e que forneça o sistema de vedação com melhor desempenho e menor custo.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um modelo de decisão em grupo com uso do método multicritério de tomada de decisão.
- Pesquisar sistemas construtivos inovadores de vedações externas.
- Identificar os principais requisitos relativos à segurança, habitabilidade, sustentabilidade e viabilidade econômica significantes na escolha de sistemas de vedações.
- Estruturar o modelo de ordenação dos sistemas de vedação com melhor custo-benefício por meio da teoria multicritério.
- Obter uma ordenação dos sistemas propostos conforme os critérios de análise estabelecidos.
- Realizar a validação do modelo proposto.

1.2 Estrutura da dissertação

Após a introdução, há a revisão da literatura relativa aos sistemas construtivos abordados na pesquisa, dados sobre desempenho técnico e características dos sistemas de painéis pré-fabricados de alvenaria, painéis de concreto, placas de gesso, cimento e *Oriented Strand Board* (OSB) que podem ser utilizados com o sistema de *wood frame ou steel frame*.

Em seguida, a seção 3 traz a revisão de literatura sobre o desempenho de edificações habitacionais, citando todos os requisitos dos usuários referentes à habitabilidade, segurança e sustentabilidade. O último subitem da seção aborda o desempenho de sistemas construtivos brasileiros, com a apresentação dos documentos e diretrizes decorrentes do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H). A seção 4 traz o estado da arte dos métodos multicritério de tomada de decisão aplicados à construção civil, especialmente aos sistemas construtivos, permitindo a escolha justificada do método utilizado na pesquisa e em seguida, traz a literatura referente aos métodos utilizados na pesquisa.

A seção 5 aborda a metodologia utilizada para a execução da pesquisa, iniciando pela definição do tipo de empreendimento, a elaboração do modelo multicritério escolhido com a coleta e análise dos dados e os procedimentos necessários para a correta aplicação. Em seguida, é apresentado o modelo proposto e a validação com a aplicação numérica na seção 6. Por fim, a seção 7 inclui as considerações finais desta dissertação. Após a finalização, são apresentadas as referências utilizadas e nos apêndices constam as tabelas de cálculo obtidas na execução dos métodos das cartas e ELECTRE.

2 SISTEMAS CONSTRUTIVOS PARA VEDAÇÃO EXTERNA

A utilização do tijolo cerâmico como vedação de construções data desde o início da revolução industrial no séc. XIX, por isso é chamada de alvenaria tradicional, conforme a Figura 1. Esse material é um dos mais típicos nos locais de clima mediterrâneo e tropical, tendo virtudes para o conforto da habitação que propiciaram uma expansão notável da alvenaria de tijolo cerâmico (SOUSA; DA SILVA, 2000).

Figura 1: Vedação em alvenaria tradicional.



Fonte: Autor (2018).

A alvenaria estrutural também é outro sistema de vedação bastante utilizado, principalmente pelo fato de as paredes da edificação serem estruturais, permitindo a redução das cargas nos outros elementos estruturais, como mostra a Figura 2. Esse sistema é formado por blocos de concreto vazados conectados com argamassa de assentamento. Comparada à alvenaria tradicional, a alvenaria estrutural tem menor tempo de execução, menor custo final e bom desempenho térmico e acústico (DOS SANTOS; DE CARVALHO; ROMAN, 2009).

Figura 2: Sistema de vedação em alvenaria estrutural.



Fonte: Autor (2018).

As novas tecnologias sugerem o uso de pré-moldados na Construção Civil devido a melhor performance e produtividade. A produtividade é um fator bastante importante para os construtores, pois seu aumento significa a execução de mais serviço em menos tempo, o que reduz o custo direto com operários da obra. Estudos comprovam que o uso de pré-moldados na indústria da construção aumenta a produtividade, independente do elemento estrutural ou não-estrutural substituído. Como exemplos, citam-se: o uso de pré-moldados em sistemas de laje de concreto que aumenta em aproximadamente 1,7 vezes a produtividade em comparação ao sistema tradicional (CHO; SHIN; KIM, 2017), o uso de pré-moldados de concreto para fundações, que proporciona melhor controle do processo produtivo, construção mais rápida e um produto de melhor qualidade (YU et al., 2008), e o uso de fachada-cortina *curtain wall* pré-fabricada que também demonstra maior produtividade que sistemas construtivos executados dentro do local da obra. (EASTMAN; SACKS, 2008).

O sistema de *curtain wall* é um sistema utilizado para fachadas de edificações, que utiliza uma estrutura metálica formando quadros, geralmente composta de alumínio, e os vãos formados são isolados por elementos não estruturais, como o vidro. A estrutura de alumínio é fixada diretamente nos elementos estruturais, transferindo os esforços de vento recebido aos pilares, lajes e vigas da edificação. No caso da fachada-cortina pré-fabricada, a produtividade

dos trabalhadores, medida pelo valor agregado por empregado, cresceu linearmente no período de 10 anos analisado entre 1992 e 2002 e por volta de 1/3, enquanto a produtividade dos trabalhadores de um empreiteiro que produz a estrutura de janelas de vidro na obra permaneceu praticamente constante. No geral, a produtividade dos pré-fabricados continua crescendo e é maior que a dos fabricados na obra (EASTMAN; SACKS, 2008).

Na indústria de pré-moldados, a ergonomia deve ser observada para a maior produtividade e saúde dos funcionários durante a construção dos painéis, pois está intimamente ligada à produtividade como explica Everett e Kelly (1998) num estudo sobre a execução de juntas nas paredes *drywall*. As tarefas em que os funcionários obtiveram maior produtividade foram as que era necessário abaixar-se menos e carregar menos sobrepeso. Jia, Kim e Nussbaum (2011) fornecem um modelo que pode ser utilizado para facilitar a execução de projetos construtivos que utilizem painéis, a fim de reduzir os riscos de lesões aos funcionários durante a obra, aumentando a sua produtividade.

Para que haja um menor manejo de painéis com menor tempo de construção, pode-se aplicar uma abordagem *lean* ao empilhamento de painéis e a localização da pilha dentro do canteiro, possibilitando que os painéis sejam erguidos por meio de fluxo contínuo e reduzindo a distância de manejo dos painéis em 11%, a quantidade de espaço para o armazenamento em 25% e o trabalho requerido para a montagem em aproximadamente 25% (SHEWCHUK; GUO, 2012).

O tipo de painel também influencia a produtividade alcançada, pois eles diferenciam em peso, tamanho e forma de ligação com elementos estruturais e outros painéis. Numa comparação entre o processo construtivo com convencional *woodframe* e o uso de painéis de isolamento estrutural (SIP), observa-se que a produtividade alcançada na execução de uma parede com *woodframe* resulta era 33 homem-min/m², enquanto a mesma parede feita com o painel SIP alcançava a produtividade de 14 homem-min/m² (MULLENS; ARIF, 2006).

Com isso, observa-se uma justificativa da utilização de painéis para vedação e a seguir são explanadas características que comprovam a viabilidade técnica dos painéis de alvenaria, painéis de concreto, *steel frame* e *wood frame*, sistemas inovadores adotados para a comparação com os sistemas tradicionais apresentados anteriormente.

2.1 Painéis de alvenaria

Os painéis pré-fabricados de alvenaria podem ser fabricados com padrões de tamanho definidos ou com tamanho conforme projeto específico. São fabricados com núcleo

de blocos cerâmicos vazados, armação e cobertos com argamassa ou concreto, como mostra a Figura 3. Tais painéis são dotados de ganchos para içamento, transporte e para união com os outros painéis e elementos estruturais. Eles já são fornecidos prontos para montagem na obra e com as duas superfícies prontas para a aplicação da pintura.

Figura 3: Montagem de painel de alvenaria.



Fonte: Autor (2018).

Cesar (2007) assegura que os painéis pré-fabricados de blocos cerâmicos de vedação têm comportamento estrutural adequado para uso em habitações e que o uso desses blocos com os furos na vertical proporciona resultados similares a blocos estruturais com resistências parecidas na área líquida, com resultado de 1,22 MPa de resistência à compressão aos 28 dias para os painéis de blocos de vedação e 1,27 MPa para os painéis de blocos estruturais. A diferença na resistência à compressão é de apenas 4%. Na pesquisa, foram utilizados blocos cerâmicos de vedação de 15 furos com dimensões de 15x25x25 cm unidos por argamassa polimérica e revestidos com argamassa armada.

2.2 Painéis moldados in loco e pré-fabricados de concreto armado

A utilização de paredes de concreto moldadas in loco é uma opção para otimizar o tempo de construção, quando o pórtico estrutural da edificação também é constituído por concreto armado. Além do comprovado desempenho estrutural típico do concreto armado, a utilização de paredes de concreto promove celeridade ao processo construtivo devido a prévia utilização de formas, do próprio material concreto já estar disponível na obra e principalmente

pela maior produtividade dos funcionários da obra propiciada pelo *know-how* em estruturas de concreto, como mostrado na Figura 4.

Figura 4: Fechamento de formas para execução de paredes de concreto moldadas no local.



Fonte: IPT (2010).

No caso da utilização de painéis pré-fabricados de concreto também há vantagens na utilização devido a maior produtividade dos funcionários da obra propiciada pelo uso de pré-moldados, como mostra a Figura 5. (CRUZ; SANTOS; MENDES, 2018).

Figura 5: Armazenamento de painéis pré-fabricados de concreto.



Fonte: IPT (2015b).

Paredes de concreto armado com resistência à compressão aos 28 dias em média de 30 MPa e com 15 cm de espessura têm resistência ao fogo de 120 minutos, tanto considerando os testes padrões normatizados quando considerando-se incêndio causado por hidrocarbonetos, como querosenes, gasolinas, naftas ou líquidos inflamáveis em geral (NGO et al., 2013). O comportamento térmico em situações de incêndio também depende da espessura da parede. Paredes de 15 cm de espessura demoram mais tempo para atingir temperaturas altas na face exposta ao fogo que paredes de 20 e 25 cm, devido a maior facilidade em dissipar o calor. Para atingir 100°C, paredes de 15 cm demoram 9 minutos, enquanto as paredes de 20 cm demoram 6,8 minutos e as paredes de 25 demoram 6,3 minutos (KANG et al., 2016).

Porém, esse sistema construtivo tem uma desvantagem quanto ao seu desempenho térmico em regiões de clima tropical e quentes, como o estado do Ceará. Oliveira et al. (2015) demonstra que conforme o método prescritivo das normativas brasileiras, uma parede de 10 cm de concreto armado tem transmitância térmica maior que o limite para todas as regiões do país. Uma parede de concreto com adição de vermiculita tem transmitância térmica igual a 2,03 W/m²K, atendendo aos critérios normativos brasileiros, mas não aos internacionais e uma parede de concreto que teria desempenho térmico mínimo adequado a utilização no país seria a parede que inclui uma folha de poliestireno expandido (EPS) de 2 cm, com valor de transmitância igual a 1,4 W/m²K.

Esses painéis pré-fabricados também podem chegar à obra com acabamento pronto e definido pelo cliente, como pintura de textura acrílica ou revestimento cerâmico. Quando há esse tipo de camada, o painel geralmente é chamado de “painel arquitetônico” (MELO, 2004).

2.3 Steel frame e wood frame

Quadros estruturais de perfis e guias podem ser utilizados para a constituição de sistemas construtivos com placas leves e delgadas da Construção Civil como soluções de desempenho acústico e térmico adequados. Quando constituídos por aço galvanizado, o sistema é chamado de *steel frame*, como mostra a Figura 6 e quando há a utilização de estrutura de madeira é chamada de *wood frame*, conforme a Figura 7.

Figura 6: Estrutura de steel frame com isolamento de lã de vidro.



Fonte: IPT (2015a).

Figura 7: Montagem de painel de wood frame.



Fonte: IFBQ (2017).

Esses sistemas servem de apoio a utilização de fechamentos estruturais e não estruturais variados, que podem ser placas de gesso, cimento ou madeira. A escolha do método construtivo depende do projeto e da viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização de cada material (RIBAS; SOUZA, 2017; ASDRUBALI et al., 2017).

2.3.1 Chapas de gesso

Um dos sistemas construtivos para vedação é o constituído por chapas de gesso acartonado fixadas numa estrutura metálica de perfis guias. Entre as chapas de gesso, geralmente é feito o preenchimento com material isolante térmico ou acústico, como a lã de vidro, de rocha ou mineral. As vantagens do uso desse sistema são o baixo peso próprio do material e a possibilidade de deslocamento das paredes. São comercializados três tipos de chapas, que são a padrão, a resistente a umidade e a resistente ao fogo, cada uma com uma cor característica (HAVEEL, 2008).

Na análise da resistência ao fogo de um sistema de *steel frame* com chapas de gesso de 12,5 mm, função estrutural e isolamento acústico e térmico feito com lã de vidro, as chapas apresentaram a resistência ao fogo mínima requerida de 30 minutos, apesar de as resistentes ao fogo proporcionarem melhor performance que as chapas de modelo padrão, onde a primeira resistiu 62 minutos e a segunda 51,5 minutos até a perda de integridade e o craqueamento das chapas. Com relação a integridade, os pontos frágeis das chapas são as juntas com outros painéis. (BOLINA et al., 2017).

Além do uso de uma única chapa de gesso acartonado, existem sistemas construtivos que utilizam duas camadas de chapas, três ou quatro e a acoplagem a outros tipos de chapa. Matsumoto et al. (2006) demonstra que o uso de duas placas previne o defeito no isolamento acústico causado pelo efeito de coincidência a altas frequências, propiciando melhor performance no desempenho acústico, sendo indicado para uso em paredes divisórias de unidades residenciais.

O desempenho acústico do sistema de vedação depende da sua espessura total e da presença ou não de isolamento térmico e acústico. A Associação Brasileira de Drywall (2015) fornece as especificações necessárias à parede de *drywall* para o atendimento a cada item do desempenho acústico da tabela 18 da ABNT NBR 15575-4:2013. O tipo de parede mais econômico que atende a todos os itens da norma, independentemente da posição da parede dentro da unidade residencial, é o sistema com chapas padrão duplas de 12,5 mm nas duas faces, com espaçamento de 48 mm entre as chapas preenchido com lã mineral. Paredes desse sistema sem o preenchimento com lã mineral só podem ser utilizadas para paredes cegas de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas comuns. A placa de gesso utilizada em paredes tem a desvantagem de não ser indicada para fachadas de edificações, pois o gesso é sensível a umidade e logo se deteriora na presença de água. Visando suprir essa demanda, são utilizadas placas cimentícias para uso em fachadas.

2.3.2 Placas cimentícias

Como observado em outros elementos construtivos que se utilizam cimento, há uma busca constante para a substituição do cimento por resíduos ou outros materiais menos poluentes. Estudos mostram a viabilidade de placas de cimento com utilização de misturas com 4% de restos de cartolinas (de onde pode-se extrair polpa de kraft), madeira na proporção de 1/3 em relação a quantidade de cimento ou até 20% de lodo obtido de moinho de papel e placas cimentícias com incorporação de fibra de vidro até 3% e nanosílica que tem melhor resistência à flexão e durabilidade. (KHORAMI et al., 2017; CAVDAR et al., 2017).

Cardinale et al. (2017) comprova a resistência à compressão e flexão exigida pelas normas internacionais de placas cimentícias com proporção de 1:2,5:0,2 em cimento, areia e cal em massa, obtendo resultado de 1,1 MPa de resistência à flexão e 3,4 MPa de resistência à compressão. Ele também destaca que o uso de lã de carneiro até 2% melhora as características térmicas em comparação a placa cimentícia de referência (sem lã de carneiro), reduzindo a condutividade térmica de 0,381 W/m²K para 0,288 W/m²K e mantendo o desempenho estrutural.

Quanto ao desempenho acústico, observa-se que as placas cimentícias são mais influentes como revestimento externo na redução de transmissão sonora com $R_w = 47$ dB do que placas de OSB com $R_w = 45$ dB, poliestireno extrudido (XPS) com $R_w = 45$ dB e policloreto de vinila (PVC) com $R_w = 43$ dB, sendo portanto mais eficientes na manutenção do conforto acústico do ambiente. Todos os painéis analisados tem uma cavidade de 90 mm preenchida com lã de vidro e o revestimento interno é composto de uma combinação de chapa de OSB de 9,5mm com chapa de gesso (PAUL; RADAVELLI; DA SILVA, 2015).

2.3.3 Placas de OSB

Outro tipo de placa a ser utilizado é a placa de OSB, formada por compósitos de tiras de madeira finas, que variam em tamanho e proporção, orientadas na mesma direção, coladas com resina e prensadas a alta pressão e temperatura. O OSB foi desenhado para substituir os painéis de madeira compensada, sendo principalmente usado como placa estrutural. Desde a invenção, o uso do produto cresceu rapidamente devido ao uso de madeira de reflorestamento, reduzindo a necessidade de recursos naturais (NISHIMURA, 2015). O uso de placas OSB também é motivado pela questão ambiental, visto que a madeira é um material reciclável que pode ser reprocessado, porém o processo de produção industrial das placas não

é 100% sustentável. Ferro et al. (2018) mostra que a etapa de fabricação da placa pode causar danos a camada de ozônio, eutrofização e intoxicação da água devido à substância utilizada para aumentar a resistência da madeira ao ataque de microorganismos.

Com relação as propriedades mecânicas, Henriques et al. (2017) observaram que quando age juntamente com uma estrutura de aço, essa placa contribui para maior rigidez da estrutura, sendo a conexão feita pelo parafuso entre a placa e o aço fundamental para o comportamento global da estrutura na resistência à atuação de cargas laterais. Os painéis baseados em madeira têm maior capacidade de resistir às forças aplicadas na borda da placa do que no seu plano, ocasionando uma menor deflexão nessa direção. Esse material tem uma capacidade maior de resistir aos esforços de cisalhamento do que aos esforços de flexão. Uma placa de OSB com 18 mm de espessura e densidade de 652 kg/m^3 apresenta módulo de elasticidade E igual a 6,341 GPa e módulo de cisalhamento G igual a 1,572 GPa (YU; FAN, 2017).

Esse tipo de painel também pode ser utilizado em ambientes com contato com meio externo. A instalação na fachada aumenta o conforto térmico da edificação, melhorando os indicadores de desempenho, como a transmitância térmica e a capacidade térmica. Uma placa de OSB com 12 mm de espessura pode apresentar condutividade térmica igual a $0,20 \text{ W/mK}$ e resistência térmica de $0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$ (MARTINEZ; AYUCAR; GOIKOLEA, 2017).

O desempenho acústico da madeira não é bom pois ela é um material leve. Porém, pode-se conseguir um bom nível de isolamento acústico com o uso de multicamadas. A presença de uma placa de material poroso junto a placa de madeira, ar entre as placas de OSB ou um material isolante, cria uma placa ressonante, que ao vibrar, amortece os sons baixos que são problemas para estruturas leves, aumentando o conforto térmico do ambiente (ASDRUBALI et al., 2017).

3 DESEMPENHO DE EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS

Segundo a ABNT NBR 15575-1:2013, os requisitos dos usuários são divididos quanto à segurança, habitabilidade e sustentabilidade. O Quadro 1 mostra todos os requisitos que devem ser considerados numa construção conforme a sua especificação.

Quadro 1: Requisitos dos usuários para as edificações.

Segurança	Habitabilidade	Sustentabilidade
<ul style="list-style-type: none"> • Segurança estrutural • Segurança contra o fogo • Segurança no uso e na operação 	<ul style="list-style-type: none"> • Estanqueidade • Desempenho térmico • Desempenho acústico • Desempenho lumínico • Saúde, higiene e qualidade do ar • Funcionalidade e acessibilidade • Conforto tátil e antropodinâmico 	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilidade • Manutenibilidade • Impacto ambiental

Fonte: ABNT (2013a).

Quanto às responsabilidades dos envolvidos no projeto, cabe aos fornecedores de materiais e insumos em geral a comprovação de atendimento às normas técnicas dos seus produtos. É de responsabilidade do projetista o estabelecimento da vida de útil de projeto de cada sistema que compõe a edificação e a especificação de materiais e componentes que tenham desempenho mínimo aceitável. Ao construtor ou incorporador, cabe elaborar o manual de uso e operação da edificação que deve ser entregue ao usuário, para que este possa executar as manutenções preventivas e corretivas devidas sem prejudicar o funcionamento dos componentes da edificação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a).

Cada interveniente no processo de construção de uma edificação habitacional contribui diretamente para a qualidade do produto oferecido, sendo importante a observação da responsabilidade de cada um para o atendimento aos requisitos dos usuários que são tratados a seguir.

3.1 Indicadores de segurança

O desempenho estrutural de sistemas de vedações internas e externas representa a capacidade de as vedações resistirem às solicitações externas independente da combinação de ações. Deve-se atentar a finalidade da vedação, se é com ou sem função estrutural para o atendimento correto às normas técnicas relacionadas. Para que atendam a esse desempenho, as vedações devem ter estabilidade e resistência estrutural, limitação de deslocamentos, fissuras e descolamentos, capacidade de suporte de cargas provenientes de peças suspensas, resistência a impactos de corpo mole e de corpo duro, resistência a ações transmitidas por portas e resistência a ações estáticas horizontais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b).

Para comprovação de estabilidade e resistência estrutural de vedações externas, deve ser realizada verificação analítica ou ensaio de cargas laterais uniformemente distribuídas, visando analisar a resistência as cargas horizontais do vento. Além disso, os componentes devem suportar cargas permanentes e deformações impostas sem a ocorrência de falhas nem nas paredes nem nos seus elementos. O método de avaliação para esses critérios é a realização de ensaios de tipo, análise de projetos ou cálculos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b).

Quanto à segurança contra incêndio, os materiais utilizados para a execução da vedação não podem gerar fumaça excessiva e devem dificultar inflamação generalizada. Para analisar-se a reação ao fogo das faces dos sistemas de vedações, é necessário que seja determinado o índice de propagação superficial de chama, que segundo a ABNT NBR 9442:1986, é o produto do fator de evolução do calor pelo fator de propagação de chama. O fator de evolução de calor é a relação entre a variação da temperatura no ensaio e a razão de desenvolvimento do calor e o fator de propagação de chama é a velocidade da chama na superfície do material, nas condições de ensaio.

A ABNT NBR 15575-4:2013 estabelece que as superfícies das vedações devem classificar-se em I, II A, III A ou IV A para locais internos às habitações. Para superfícies externas, os materiais devem classificar-se como I ou II B. Segundo o método de ensaio da ABNT NBR 9442:1986, os materiais devem ter os índices de propagação conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos materiais conforme o valor do índice de propagação superficial de chamas.

Classe	Ip
I	-
II A ou II B	$Ip \leq 25$
III A ou B	$25 < Ip \leq 75$
IV A ou B	$75 < Ip \leq 150$
V	$150 < Ip \leq 400$
VI	$Ip > 400$

Fonte: ABNT (1986).

Os sistemas de vedação também são elementos de compartimentação horizontal, sendo importantes para a preservação da estabilidade estrutural da edificação em caso de incêndio. De acordo com a ABNT NBR 14432:2001, os sistemas utilizados em edificações habitacionais devem atender ao tempo requerido de resistência ao fogo, considerando a altura da edificação. O tempo mínimo de resistência que os componentes da edificação devem suportar em caso de incêndio mantendo a segurança estrutural é de 30 minutos para edificações até 12 m de altura, podendo atingir 120 minutos para edificações com altura acima de 30 metros, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Tempos requeridos de resistência ao fogo.

Altura (m)	TRRF (min)
Subsolo > 10 m	90
Subsolo \leq 10 m	60
Até 12 m	30
Entre 12 e 23 m	60
Entre 23 e 30 m	90
Acima de 30 m	120

Fonte: ABNT (2001).

Caso os sistemas construtivos utilizados para as vedações sejam estruturais, deve-se atender a ABNT NBR 5628:2001 para a determinação da resistência ao fogo. Nesse ensaio, devem ser considerados todos os vínculos, sistemas de fixação e apoio, e acabamentos utilizados. Quando a amostra não puder ter as dimensões reais da parede, deve ter no mínimo 2,5 m de altura e 2,5 m de largura. Durante o procedimento, também são medidos a resistência mecânica do elemento, estanqueidade à gases e o isolamento térmico da parede estrutural. Com

relação ao isolamento térmico, o componente não pode sofrer aumento de temperatura na face não exposta, em relação à temperatura inicial, maior que 180°C em qualquer ponto e 140°C maior em média.

Outro requisito a ser atendido é a segurança no uso e na ocupação, que diz respeito a segurança do usuário na utilização do imóvel. Os sistemas utilizados não podem apresentar deformações, partes expostas cortantes ou defeitos que possam colocar em risco a integridade dos ocupantes. Assim, devem ser previstas no projeto formas de minimizar quaisquer riscos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a).

3.2 Indicadores de habitabilidade

A estanqueidade no sistema de vedações internas e externas é necessária para evitar a infiltração de águas provenientes de chuvas ou de outras fontes. As vedações devem ser estanques, considerando-se a ação dos ventos e a ABNT NBR 15575-4:2013 determina que, quando submetido ao ensaio de estanqueidade de acordo com a região do Brasil em que se encontra, a vedação externa deve ter um percentual de soma das áreas de mancha de umidade na face oposta à incidência de água, em relação à área total ensaiada de no máximo 5%, para edificações com mais de um pavimento.

O desempenho térmico é um dos requisitos dos usuários mais buscado pelos construtores, visto a sua grande importância na edificação habitacional. A ABNT NBR 15220-1:2005 define conforto térmico como “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas de um ambiente”. A busca por materiais e sistemas construtivos que atendam a esse critério e tenham menor custo e menor impacto ambiental proporciona o desenvolvimento de novas pesquisas, como ambientes com fachadas duplas e envoltórias vegetadas na tentativa de melhorar o conforto térmico dos usuários.

Além dos sistemas convencionais utilizados, estudos indicam que o uso de paredes vivas em projetos habitacionais proporciona maior eficiência energética e conforto térmico no interior das edificações, amenizando em diferentes escalas os extremos de temperatura observados em regiões de clima tropical e subtropical. (MATHEUS et al., 2016).

Outro sistema inovador, a fachada dupla, que consiste de duas camadas de vidro separadas por uma distância conhecida em que o ar circula, proporciona menores oscilações de condições externas de temperatura que as fachadas simples, segundo simulação de ambientes utilizando-se o programa de simulação *EnergyPlus*. (BARBOSA et al., 2013) .

Assim, segue-se a procura por componentes e sistemas que melhorem a questão do desempenho térmico. Há inúmeros índices que podem ser utilizados para o cálculo do conforto térmico em edificações, como índices baseados no balanço térmico do corpo humano, na tensão fisiológica, com o uso de parâmetros físicos do ambiente e recentemente, foram publicados novos índices que avaliam as condições de conforto térmico em uma edificação a longo prazo. Até 2012, mais de 70 índices haviam sido pesquisados e publicados com esse intuito. (CARLUCCI; PAGLIANO, 2012).

A ABNT NBR 15220-1:2005 traz as grandezas relativas às características térmicas de materiais, elementos e componentes construtivos no cálculo do desempenho e no Quadro 2 estão listadas as principais grandezas utilizadas.

Quadro 2: Principais grandezas térmicas relacionadas ao cálculo do desempenho térmico.

Grandeza	Definição	Símbolo	Unidade
Fluxo de calor ou taxa de fluxo de calor	Quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo pela duração desse intervalo	Q	W
Resistência térmica de elementos e componentes	Quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário	R	(m ² .K)/W
Resistência térmica total	Somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa	R _T	(m ² .K)/W
Transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor	Inverso da resistência térmica total	U	W/(m ² .K)
Capacidade térmica	Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema)	C	J/K
Capacidade térmica de componentes	Quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área	C _T	J/(m ² .K)
Atraso térmico	Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor	φ	h

Fonte: ABNT (2005a).

A ABNT NBR 15220-2:2005 descreve os métodos de cálculo das grandezas térmicas de elementos e componentes para a execução do procedimento simplificado de verificação do atendimento de uma edificação ao desempenho térmico. Nesta norma, há a apresentação de equações para o cálculo da transmitância térmica, baseado na espessura e na condutividade térmica do material de cada camada do sistema construtivo e da capacidade térmica conforme as áreas de cada seção, a espessura (e), calor específico (c) e densidade de massa aparente de cada seção (ρ). Conforme a ABNT NBR 15575-4:2013, os valores admissíveis de transmitância térmica de paredes externas estão na Tabela 3.

Tabela 3: Transmitância térmica de paredes externas.

Transmitância térmica U (W/m²K)		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	$\alpha_a \leq 0,6$	$\alpha_a > 0,6$
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

Fonte: ABNT (2013b).

Os valores admissíveis para capacidade térmica de paredes externas conforme a ABNT NBR 15575-4:2013 são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Capacidade térmica de paredes externas.

Capacidade térmica CT (kJ/m²K)	
Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	Zona 8
≥ 130	Sem requisito

Fonte: ABNT (2013b).

Caso o desempenho térmico da edificação não seja atendido pelo uso do procedimento simplificado, ele deve ser analisado como um todo pelo método da simulação computacional. Para essa análise, a ABNT NBR 15575:2013 recomenda o uso do *software EnergyPlus*, considerando-se a unidade habitacional com o maior número de paredes expostas no caso de habitações térreas e a unidade do último andar, com cobertura exposta, no caso de um edifício multi piso. A análise deve ser feita para um dia típico de verão e um dia típico de inverno com as propriedades térmicas dos materiais e elementos construtivos utilizados na construção. A simulação deve ocorrer para uma condição padrão, que corresponde a uma taxa de ventilação do ambiente de 1 ren/h e para três alternativas de cor, clara, média ou escura, conforme a absorvância à radiação solar das superfícies expostas (α). A cor clara apresenta $\alpha =$

0,3, a cor média tem $\alpha = 0,5$ e a cor escura tem $\alpha = 0,7$. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a). Em caso de não atendimento aos critérios estabelecidos para o verão, a simulação deve ser realizada novamente, considerando-se novos critérios que propiciarão um melhor desempenho térmico dos sistemas construtivos analisados, que são:

- a) Ventilação: taxa de ventilação de 5 ren/h e janelas sem sombreamento.
- b) Sombreamento: taxa de ventilação de 1 ren/h e inserção de dispositivo de sombreamento com capacidade de redução de 50% da radiação solar direta.
- c) Ventilação e sombreamento: taxa de ventilação de 5 ren/h e dispositivo de redução de 50% da radiação solar (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a).

O desempenho acústico também é um dos requisitos críticos aos sistemas de vedações internas e externas. Segundo a ABNT NBR 15575-4:2013, os parâmetros acústicos para verificação são: o índice de redução sonora ponderado (R_w), utilizado em medições laboratoriais; a diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$), utilizada em vedações verticais internas e a diferença padronizada de nível ponderada a 2 m de distância da fachada ($D_{2m,nT,w}$), utilizada em vedações verticais externas de edificações.

Os requisitos que as vedações verticais devem atender quanto ao desempenho acústico são referentes aos valores mínimos de diferença padronizada de nível ponderada, ou seja, é medido o quanto a vedação consegue atenuar os ruídos decorrentes de outros ambientes e ambiente externo, e o índice de redução sonora. No caso do ensaio de campo, as medições são feitas somente em dormitórios, porém ele é o ensaio exigido para comprovação do atendimento à norma. Os valores mínimos de desempenho requeridos são categorizados conforme a classe do ruído e são apresentados na Quadro 3.

Quadro 3: Valores mínimos de desempenho para vedações externas em campo e no laboratório.

Classe de ruído	Localização da habitação	$D_{2m,nT,w}$ (dB)	R_w (dB)
I	Habitação localizada distante de fontes de ruído intenso de quaisquer naturezas	≥ 20	≥ 25
II	Habitação localizada em áreas sujeitas a situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III	≥ 25	≥ 30
III	Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que esteja de acordo com a legislação	≥ 30	≥ 35

Fonte: ABNT (2013b).

Outro critério a ser atendido é o desempenho mínimo de vedações entre ambientes internos segundo o resultado de $D_{nT,w}$. Na ABNT NBR 15575-4:2013 constam os valores relativos ao desempenho em ensaios utilizando-se o método de campo. A menor atenuação permitida é de 30 dB e ocorre entre paredes cegas de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas comuns, como corredores.

O item de desempenho lumínico estabelece os requisitos de iluminação natural e iluminação artificial que devem ser encontrados nas dependências de edificações habitacionais. Tal item não está relacionado ao sistema construtivo de vedação vertical utilizado, mas sim às aberturas para ventilação presentes em tais sistemas, sendo essas aberturas as responsáveis pelos níveis de iluminância geral nas diferentes dependências, seja obtido pelo exterior ou indiretamente, pelos ambientes adjacentes. Como afirma a ABNT NBR 15575-1 (2013, p. 29),

Os requisitos de iluminância natural podem ser atendidos mediante adequada disposição dos cômodos (arquitetura), correta orientação geográfica da edificação, dimensionamento e posição das aberturas, tipos de janelas e de envidraçamentos, rugosidade e cores dos elementos (paredes, tetos, pisos, etc.), inserção de poços de ventilação e iluminação, eventual introdução de domo de iluminação etc.

Os requisitos de saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, e de conforto tátil e antropodinâmico não se aplicam diretamente aos sistemas de vedações verticais, porém contribuem para a escolha dos materiais utilizados, pois os sistemas utilizados devem impedir a proliferação de micro-organismos e poluentes na atmosfera interna à habitação, além de não apresentar rugosidades ou outras irregularidades nos elementos que compõem o sistema de vedação. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a).

3.3 Indicadores de sustentabilidade

As edificações são projetadas para atender aos usuários durante muito tempo e na sua construção exigem um alto desembolso financeiro e causam grande impacto ambiental, não podendo jamais serem consideradas como produtos descartáveis, que ao não atingirem o desempenho mínimo requisitado são substituídas por novas. Devido a isso, durabilidade e manutenibilidade são dois conceitos intimamente conectados, pois a manutenção do desempenho dos sistemas e elementos construtivos ao longo da vida útil de uma edificação só ocorre com a execução de programas de manutenção preventiva e corretiva afim de garantir sua durabilidade. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

Os sistemas de vedações verticais internas e externas devem atender aos períodos mínimos estabelecidos de vida útil de projeto na ABNT NBR 15575-1:2013. As vedações externas devem ter vida útil de projeto mínima de 40 anos, enquanto as vedações internas necessitam apenas de um mínimo de 20 anos, sendo necessária a especificação do sistema construtivo utilizado em projeto de maneira a atender a essa exigência.

Quanto ao requisito de manutenibilidade, os construtores devem oferecer aos usuários um manual de uso, operação e manutenção dos sistemas de vedação vertical conforme a ABNT NBR 14037:2011. Tal manual especifica as condições de uso dos sistemas; a periodicidade, forma de realização e registro das manutenções e inspeções, além de todas as técnicas e previsão de materiais necessárias às manutenções preventivas inclusas no manual.

A adequação ambiental é um item muito importante, visto que cada vez mais os recursos naturais são escassos. Portanto, é fundamental que sejam utilizados novos materiais na execução de sistemas construtivos, como também o uso de materiais inovadores provenientes de reciclagem ou reuso de resíduos das diversas áreas de produção industrial.

3.4 Desempenho de sistemas construtivos brasileiros

No Brasil, junto com o lançamento das normas técnicas de desempenho, o poder público atuou para o desenvolvimento e melhoria dos sistemas construtivos brasileiros. Em parceria com entidades privadas, como fornecedores, projetistas, construtores e entidades, foi criado o Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), no âmbito da Secretaria Nacional da Habitação do Ministério das Cidades, órgão do Governo Federal responsável pelo desenvolvimento urbano, habitação, mobilidade urbana e saneamento.

Com maior incentivo à inovação, agentes do setor privado mobilizaram-se para a inclusão de sistemas inovadores dentro dos seus processos construtivos. A comunidade acadêmica participou ativamente do processo de desenvolvimento tecnológico, atuando para uma melhor utilização dos recursos naturais com maior produtividade e possibilidade de maior satisfação dos usuários.

Em 2007, foi instituído o Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais (SiNAT). O SiNAT tem como objetivo ser o sistema responsável pela avaliação dos sistemas inovadores ainda não normalizados pela ABNT, novos produtos ou processos da cadeia construtiva, tendo como base o seu desempenho técnico. Para atestar o desempenho satisfatório de tal produto analisado, criou-se o Documento de Avaliação Técnica (DATec) que é um documento de prazo de validade definido e concedido por uma

Instituição Técnica Avaliadora (ITA) após a realização de avaliação de desempenho no sistema ou produto requerido (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2016a).

O procedimento de avaliação técnica no âmbito do SiNAT do PBQP-H é regularizado pelo Ministério das Cidades para que sejam utilizadas as mesmas diretrizes, independente da instituição avaliadora selecionada. Nesse processo, são utilizadas fichas de verificação para avaliação dos requisitos relativos à segurança, habitabilidade e sustentabilidade conforme descrito na ABNT NBR 15575 Edificações Habitacionais – Desempenho. As auditorias técnicas iniciais são realizadas nas fábricas dos produtos ou nas obras em que ele esteja em execução. No caso de auditoria periódica em sistemas, subsistemas ou processos construtivos, ela deve ser realizada em obra em execução ou finalizada. Na auditoria, devem ser analisados os documentos técnicos, como especificações do produto, projetos e procedimentos de produção e manutenção, resultados de ensaios de controle e caracterização do produto, controle de qualidade, entre outros (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2016b).

Quanto à execução e utilização de painéis pré-fabricados para habitações e paredes de concreto armado moldadas no local, foram publicadas até 2018, seis diretrizes para guiar a avaliação de desempenho dos sistemas construtivos analisados:

- a) Diretriz SiNAT nº 001 – Diretriz para a avaliação técnica de paredes estruturais de concreto moldadas no local (concreto leve ou concreto reforçado com fibra de vidro).
- b) Diretriz SiNAT nº 002 – Sistemas de paredes integrados por painéis pré-moldados de concreto ou mistos para emprego em edifícios habitacionais;
- c) Diretriz SiNAT nº 003 – Diretriz para a avaliação técnica de sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformados a frio, com fechamento em chapas delgadas (sistemas leves tipo “*light steel frame*”);
- d) Diretriz SiNAT nº 005 – Sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada, com fechamento em chapas (sistemas leves tipo “*light wood frame*”);
- e) Diretriz SiNAT nº 009 – Sistema de vedação vertical externa, sem função estrutural, multicamadas, formado por perfis leves de aço zincado e fechamentos em chapas delgadas com revestimento de argamassa (fachada leve em *steel frame*);
- f) Diretriz SiNAT nº 010 – Diretriz para avaliação técnica de sistemas construtivos formados por painéis pré-fabricados de chapas delgadas vinculadas por núcleo de isolante térmico rígido.

4 TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Na elaboração de um modelo de tomada de decisão participam vários atores com atividades definidas. Dentre esses atores, podem-se destacar o analista, que é o responsável por fornecer as informações técnicas necessárias para o suporte da decisão da melhor alternativa e o decisor que é de fato quem toma a decisão final, tendo poder de veto, mesmo que uma alternativa esteja em primeira decisão (GOMES; GOMES, 2014).

Na modelagem, o analista segue uma metodologia que pode ser definida como: estabelecer o objeto da decisão, desenvolver os critérios e analisar as medidas das consequências, modelar as preferências e investigar o método mais adequado, aplica-lo e por fim desenvolver uma recomendação ao decisor, baseado nos resultados obtidos (ROY, 1996).

Inicialmente, deve ser estabelecida a problemática de apoio à decisão, que pode ser $P.\alpha$, $P.\beta$, $P.\gamma$ e $P.\delta$. A problemática $P.\alpha$ esclarece a decisão pela escolha de um subconjunto o mais restrito possível, sendo possível a seleção de uma única alternativa. A $P.\beta$ classifica cada ação a uma categoria, resultando em um procedimento de classificação. Por sua vez, a problemática $P.\gamma$ ordena as ações conforme as preferências, resultando em um procedimento de ordenação e a problemática $P.\delta$ resolve o problema por uma descrição das ações e consequências, resultando em um procedimento descritivo (ROY, 1996).

Na modelagem de preferências são descritas quatro principais relações de preferência na comparação entre duas alternativas a e b pertencentes ao conjunto A de alternativas (VINCKE, 1992). São elas:

- a) Preferência forte (P): preferência significativa de uma ação em favor de outra.
- b) Preferência fraca (Q): preferência com hesitação de uma ação em favor de outra.
- c) Indiferença (I): ações equivalentes.
- d) Incomparabilidade (R): ações que não se aplicam a nenhuma das situações anteriores.

Após a modelagem de preferências, o passo seguinte é a modelagem das consequências. São definidos critérios iniciais e pela análise intracritério (comparação no mesmo critério) e análise intercritério (comparação entre os critérios) são definidos os critérios finais. Eles podem ser classificados como verdadeiro-critério, quase-critério e pseudocritério (GOMES; GOMES, 2014).

Na consideração de um verdadeiro-critério, qualquer diferença entre os valores da função g implica uma preferência estrita de a sobre b , como mostram as Equações 1 e 2. A estrutura de preferência que domina sobre o conjunto de alternativas é a pré-ordem completa.

$$a P b \leftrightarrow g(a) > g(b) \quad (1)$$

$$a I b \leftrightarrow g(b) = g(a) \quad (2)$$

Onde:

$g(a)$: avaliação da alternativa a no critério g .

No caso de um quase-critério, há a introdução do limite de indiferença (q). A alternativa a somente pode ser considerada preferível a b se a diferença entre as medidas de consequências das duas alternativas for maior que q , conforme as Equações 3 e 4. A estrutura de preferência das alternativas é uma quase-ordem (para q constante).

$$a P b \leftrightarrow g(a) - g(b) > q \quad (3)$$

$$a I b \leftrightarrow g(a) - g(b) \leq q \quad (4)$$

Na consideração de um pseudocritério, há a introdução do limite de preferência estrita (p), podendo ser considerada uma preferência forte ou uma preferência fraca entre as alternativas. Caso a diferença entre os valores das funções $g(a)$ e $g(b)$ seja maior que p , considera-se que a é preferível a b . Caso essa diferença esteja entre os valores p e q , considera-se que a preferência de a sobre b é fraca e caso a diferença seja menor que q , as alternativas são indiferentes como mostram as Equações 5 a 7. A estrutura de preferência que caracteriza essa relação entre as alternativas é a pseudo-ordem:

$$a P b \leftrightarrow g(a) - g(b) > p \quad (5)$$

$$a Q b \leftrightarrow q < g(a) - g(b) \leq p \quad (6)$$

$$a I b \leftrightarrow g(a) - g(b) \leq q \quad (7)$$

A situação de incomparabilidade é definida quando não existem razões claras que justifiquem uma das três situações anteriores, sendo expressa pela relação $a R b$ (GOMES; GOMES, 2014). Após a definição dos critérios, deve ser feita a sua ponderação, que expressa as preferências do decisor através da explicitação da importância relativa de um critério em comparação a outro (BANA E COSTA, 1988). Com essas informações, é montada a matriz de decisão que é utilizada para a aplicação de um método multicritério de apoio à decisão, resultando na solução do problema proposto. Visando verificar o grau de estabilidade das alternativas, é realizada uma análise de sensibilidade com a mudança dos pesos adotados para cada alternativa (GOMES; GOMES, 2014).

4.1 Métodos multicritério de apoio à decisão

Um dos métodos mais utilizados pelos pesquisadores é o *Analytical Hierarchical Process* (AHP), pois é de fácil aplicação e tem uma estrutura que permite que os decisores

resolvam o problema de modo intuitivo, o que não é adequado, visto que o ideal é que se resolva de modo científico (ISHIZAKA; LABIB, 2011). Ele visa a obtenção de dominâncias entre pares de elementos, desde as alternativas até os critérios de avaliação escolhidos, possibilitando a classificação dos elementos numa hierarquia (SAATY, 1994). Por isso, há grandes críticas quanto a utilização do método mostrando que a sua aplicação deve ser feita com cautela. Uma das críticas é quanto aos seus axiomas. Smith, Winterfeldt e Smith (2004) observaram que os axiomas do AHP são distantes dos axiomas da teoria da utilidade clássica. Outra crítica diz respeito a inconsistência imposta pela utilização de escala de 1 a 9 como forma de atribuir “pesos” aos elementos, para a comparação entre dados científicos (BERNASCONI; CHOIRAT; SERI, 2010).

Também bastante utilizado, o *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) é um método de tomada de decisão utilizado em problemas de ordenação que objetiva escolher a alternativa que seja mais próxima da solução ideal positiva (PIS) e mais distante da solução ideal negativa (NIS) (KUO, 2017). Como balancear a separação de uma alternativa do PIS e do NIS é o grande problema do método, uma vez que Opricovic e Tzeng (2004) observam que a importância dessa separação não é devidamente considerada. Já a teoria dos conjuntos *Fuzzy* é uma formulação matemática que pode ser aplicada conjuntamente com um método de tomada de decisão (KABAK et. al, 2014). Porém, seu uso só é indicado em casos de múltiplos objetivos interdependentes, fornecendo um modelo com respostas bem-sucedidas (CARLSSON, 1982).

O *Preference Ranking Organization Method for Enrich Evaluation* (PROMETHEE) pertence à família dos métodos de superação e consiste na construção de relações de superação entre as alternativas e a exploração dessa relação para a obtenção da resposta. O resultado da comparação entre as alternativas é dado em termos de preferência e pode-se resultar em uma preferência fraca, forte, estrita ou indiferente (BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986). A família de métodos *Elimination and Choice Expressing The Reality* (ELECTRE) também é baseada em relações de superação entre as alternativas. O primeiro método multicritério foi proposto por Bernard Roy em 1968 e em seguida foram publicados os restantes possibilitando outras aplicações e aprimoramentos. Considerando-se as comparações entre os métodos PROMETHEE e ELECTRE, os primeiros são mais utilizados por analistas iniciantes devido à facilidade de aplicação (GOMES, 2007).

Os métodos ELECTRE têm uma série de pontos fortes, como a possibilidade de lidar tanto com escalas quantitativas quanto qualitativas, a heterogeneidade de escalas, a não relevância dos efeitos compensatórios, possibilidade de tratar dados incertos e a análise de

razões a favor e contra uma superação (FIGUEIRA et al., 2013). Os métodos ELECTRE I e IS são utilizados em problemas de seleção e os métodos ELECTRE II, III e IV são utilizados para ordenação (ROY, 1991).

Os métodos ELECTRE são propostos para a solução de um problema no caso de um único decisor. No caso de múltiplos decisores, pode ser usado um modelo de agregação de preferências dos decisores baseado nesses métodos. Alencar, Almeida e Morais (2010) estabelecem um modelo multicritério de decisão em grupo, onde num primeiro momento utilizam o ELECTRE II para gerar uma ordenação das alternativas para cada um dos decisores e em seguida utilizam o ELECTRE IV para a avaliação coletiva dos decisores. A razão para a escolha do método ELECTRE II se dá pelo fato dele utilizar verdadeiros-critérios. O ELECTRE III utiliza pseudocritérios, portanto pode ser estabelecido um modelo de agregação de preferências, aplicando-se o ELECTRE III para a classificação das alternativas e em seguida, o ELECTRE IV para a avaliação entre os decisores. A principal diferença entre esses dois métodos é que o segundo não utiliza pesos para os critérios (GOVINDAN; JEPSEN, 2016).

4.1.1 ELECTRE III e ELECTRE IV

Para a aplicação do método ELECTRE III, devem ser estabelecidos três parâmetros: limite de indiferença (q), limite de preferência (p) e limite de veto (v), para cada um dos critérios j e também a sua importância relativa (w). Esse método se diferencia dos outros por sua capacidade de lidar com dados incertos e imprecisos (MARZOUK, 2011).

O limite de veto de um dado critério j é o valor $v_j(g_j(a)) > p(g_j(a)) \geq 0$. Quando um critério g_j opõe-se fortemente a afirmação a S b, esse critério veta a superação (FIGUEIRA et al., 2013). Essa representação é dada pela Equação 8.

$$g_j(a) - g_j(b) > v_j(g_j(a)) \quad (8)$$

Todos os métodos que se baseiam em relações de superação dependem dos conceitos de concordância e discordância. A concordância refere-se a um subconjunto significativo de critérios a favor da relação de superação a S b (ROY, 1991). O índice de concordância total é a soma ponderada dos índices de concordância parciais pelos pesos de cada critério, como mostrado nas Equações 9 e 10.

$$C(a, b) = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^n w_j c_j(a, b) \quad (9)$$

$$W = \sum_{j=1}^n w_j \quad (10)$$

O índice de concordância parcial é calculado pela Equação 11.

$$c_j(a, b) = \begin{cases} 0, \text{ se } g_j(a) + p(g_j(a)) \leq g_j(b) \\ 1, \text{ se } g_j(a) + q(g_j(a)) > g_j(b) \\ \frac{g_j(a) - g_j(b) + p_j(a)}{p_j - q_j}, \\ \text{ se } -p(g_j(a)) < g_j(a) - g_j(b) \leq -q(g_j(a)) \end{cases} \quad (11)$$

A discordância refere-se ao subconjunto de critérios que estão em oposição com a afirmação a S b. Enquanto os índices de concordância parcial são agregados, os índices de discordância não são agregados. O índice de discordância é calculado individualmente para cada critério pela Equação 12.

$$D_j(a, b) = \begin{cases} 0, \text{ se } g_j(a) + p(g_j(a)) \geq g_j(b) \\ 1, \text{ se } g_j(b) \geq g_j(a) + v(g_j(a)) \\ \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j(a)}{v_j - p_j}, \\ \text{ se } -v(g_j(a)) < g_j(a) - g_j(b) \leq -p(g_j(a)) \end{cases} \quad (12)$$

Os métodos da família ELECTRE compreendem duas fases: a agregação e a exploração. Na agregação, são construídas relações de superação baseadas na avaliação de cada alternativa em cada critério, resultando para cada par de alternativas uma situação de preferência entre elas. No ELECTRE III é associado a cada par de alternativas um índice de credibilidade (σ), que também pode ser interpretado como grau de credibilidade e representa o subconjunto de critérios que são a favor da afirmativa a S b e o subconjunto de critérios que é contra, combinando o índice de concordância e o de discordância (FIGUEIRA et al., 2013). Esse índice é calculado pela Equação 13

$$\sigma(a, b) = \begin{cases} C(a, b) \text{ se } D_j(a, b) \leq C(a, b), \forall_j \\ C(a, b) \prod_{j \in \Psi(a, b)} \frac{1 - D_j(a, b)}{1 - C(a, b)} \end{cases} \quad (13)$$

No método ELECTRE IV são utilizadas cinco relações de superação, que são a quase-dominância (S_q), dominância canônica (S_c), pseudo-dominância (S_p), sub-dominância (S_s) e dominância de veto (S_v), que estão organizadas conforme a Equação 14 (ROY, 1991).

$$S_q \subset S_c \subset S_p \subset S_s \subset S_v \quad (14)$$

Para cada relação de dominância há um valor de índice de credibilidade para que seja construída a matriz de credibilidade (DIAS; FIGUEIRA; ROY, 2006). Esses valores estão expressos na Equação 15.

$$\sigma(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{se } a S_q b \\ 0,8 & \text{se } a S_c b \\ 0,6 & \text{se } a S_p b \\ 0,4 & \text{se } a S_s b \\ 0,2 & \text{se } a S_v b \\ 0 & \text{se não há uma das relações anteriores para } (a, b) \end{cases} \quad (15)$$

Após a obtenção da ordenação obtida pelo método, deve ser feita a análise de sensibilidade. Segundo Campos (2011), a análise de sensibilidade no ELECTRE IV pode ser feita com variação sobre as ponderações e mudanças nos parâmetros. Como neste método não são definidos pesos, a análise de sensibilidade se dá pela definição de novos limites de indiferença e preferência para os critérios.

4.1.2 Método das cartas

A metodologia do método das cartas é utilizada para estimar a importância relativa entre os critérios conforme as preferências de cada decisor. É pedido que o decisor ordene do menos importante para o mais importante os critérios de avaliação do problema, em seguida, ele tem a opção de adicionar cartas em branco entre os critérios caso deseje que a diferença de importância entre os critérios seja maior. Também é perguntado quantas vezes mais importante é o primeiro critério relativo ao último, esse valor é definido como parâmetro z . Com a ordenação das cartas obtidas é aplicada a metodologia descrita em Figueira e Roy (2002) e Marzouk, Amer e El-Said (2013) para a obtenção dos pesos normalizados.

Inicialmente, devem ser calculados os parâmetros das Equações 16, 17 e 18 para o cálculo do peso não-normalizado $k(r)$.

$$e_r = e'_r + 1, \forall r = 1, \dots, \bar{n} - 1 \quad (16)$$

Onde:

\bar{n} é o número de níveis de classificação

e'_r é o número de cartas separando a classe r e a classe $r + 1$.

$$e = \sum_{r=1}^{\bar{n}-1} e_r \quad (17)$$

$$u = \frac{z - 1}{e} \quad (18)$$

Com os parâmetros acima, calcula-se o peso não-normalizado $k(r)$ pela Equação 19. Em caso de critérios classificados no mesmo nível, todos do mesmo nível recebem o mesmo peso $k(r)$.

$$k(r) = 1 + u(e_0 + \dots + e_{r-1}), \text{ com } e_0 = 0 \quad (19)$$

Em seguida, devem ser calculados os pesos normalizados. Para isso, faz-se o cálculo da Equação 20.

$$k'_i = k(r) \quad (20)$$

Depois são estimados os parâmetros das Equações 21 e 22.

$$K' = \sum_{i=1}^n k'_i \quad (21)$$

$$k_i^* = \frac{100}{K'} k'_i \quad (22)$$

Onde:

n é o número de critérios.

Esse valor precisa ser corrigido a 0, 1 ou 2 casas decimais. k''_i é o valor k^*_i corrigido a w casas decimais, que são:

$w = 0$, nenhuma casa decimal.

$w = 1$, uma casa decimal.

$w = 2$, duas casas decimais.

Para a verificação de necessidade do arredondamento final, visando evitar distorções na normalização, são calculadas as Equações 23 e 24 para cada critério.

$$d_i = \frac{10^{-w} - (k_i^* - k''_i)}{k_i^*} \quad (23)$$

$$\bar{d}_i = \frac{(k_i^* - k''_i)}{k_i^*} \quad (24)$$

Após isso, são criadas duas listas, L e \bar{L} , com a lista L contendo os critérios e seus valores d_i em ordem crescente e a lista \bar{L} contendo os critérios e seus valores \bar{d}_i em ordem decrescente. Dentro dessas listas, são formadas duas classes, F^+ e F^- . Os critérios dentro de F^+ são arredondados para cima e os critérios dentro de F^- são arredondados para baixo. A divisão de F é feita da seguinte maneira (FIGUEIRA; ROY, 2002):

- Se $(m + v) \leq n$, a lista F^- é formada com os últimos critérios $(n - v - m)$ da lista \bar{L} onde $d_i < \bar{d}_i$. F^+ é formada com os primeiros v critérios de \bar{L} onde $d_i < \bar{d}_i$.
- Se $(m + v) > n$, a lista F^+ é formada com os $(n - m)$ critérios de L onde $d_i < \bar{d}_i$ e os primeiros $(v + m - n)$ critérios de L onde $d_i > \bar{d}_i$. F^- é formada dos últimos $n - v$ critérios de L onde $d_i < \bar{d}_i$.

Onde:

m é o número de critérios onde $d_i > \bar{d}_i$.

v é o número de critérios pertencentes a F^+ .

Por fim, são obtidos os pesos normalizados para mensuração da importância relativa de cada critério e uso nos métodos multicritério.

4.2 Aplicações na construção civil

A tomada de decisão pode ser utilizada para a obtenção de respostas de problemas da construção civil, como observa-se a seguir em problemas relacionados a sistemas construtivos. Balali, Zahraie e Roozbahani (2014) desenvolveram um novo algoritmo utilizando a combinação de dois métodos tradicionais, o ELECTRE III e o PROMETHEE II para a seleção de sistemas estruturais. A metodologia considera os limites de preferência, indiferença e veto como intervalos a fim de considerar as incertezas inerentes ao processo. A abordagem de intervalos possibilita a inclusão de conceito de risco, incerteza e confiabilidade, fornecendo um *ranking* completo que pode ser utilizado como ferramenta para a tomada de decisão no processo de gerenciamento da construção.

Sob uma perspectiva diferente, Attallah et al. (2017) utilizaram uma metodologia de tomada de decisão para a seleção de créditos em sistemas de classificação de edificações sustentáveis, como o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) utilizando o método ELECTRE III para a comparação com a abordagem baseada na intuição utilizada pelos construtores. A validação do modelo demonstrou que a metodologia pode ajudar na fase inicial do projeto de edificações, fornecendo orientações para a seleção de créditos.

Com relação a pesquisas voltadas à área de desempenho energético de edificações e de conforto térmico, Delgarm, Sajadi e Delgarm (2016) apresentaram um método de otimização multiobjetivo implementando o algoritmo *Artificial Bee Colony* (ABC) com uma ferramenta de simulação de energia do *EnergyPlus* no MATLAB. O objetivo do trabalho foi encontrar a solução ótima para as configurações de um envelope de edificação com melhor eficiência energética e conforto térmico. Em seguida, utilizou-se o método TOPSIS para a escolha da melhor solução ótima para quatro diferentes condições climáticas.

No contexto brasileiro, Silva, Almeida e Ghisi (2016) destacaram a importância do método TOPSIS para a ordenação por preferência de oito diferentes tipos de sistemas construtivos de vedação em quatro climas no Brasil, em conjunto com o método AHP para a construção dos cenários de tomada de decisão, de modo a gerar um vetor de preferência para os critérios de desempenho. O estudo possibilitou a avaliação de desempenho das alternativas quanto ao desempenho térmico e energético de edificações residenciais.

Voltados para a questão, Han, Chen e Wang (2013) desenvolveram uma ferramenta de avaliação da sensibilidade das paredes externas de casas residenciais às ondas de calor, com oito diferentes tipos de sistemas construtivos de vedação para a identificação dos que mais propiciam conforto térmico em edificações não condicionadas durante o dia no verão. As alternativas foram classificadas para cada critério e a escolha das melhores alternativas foi feita numa análise visual sobre quais tipos de parede ocupavam as melhores posições num maior número de critérios. Da mesma forma, Sabapathy e Maithel (2013) fizeram uso de uma estrutura de análise de decisão multicritério com uma pontuação numérica em uma escala normalizada desenvolvida pelo desempenho de cada um dos 12 tipos de parede para cada critério. O Quadro 4 traz um resumo de estudos sobre tomada de decisão na construção civil explicitando o método utilizado e o objetivo pretendido.

Quadro 4: Quadro-resumo de estudos sobre tomada de decisão na construção.

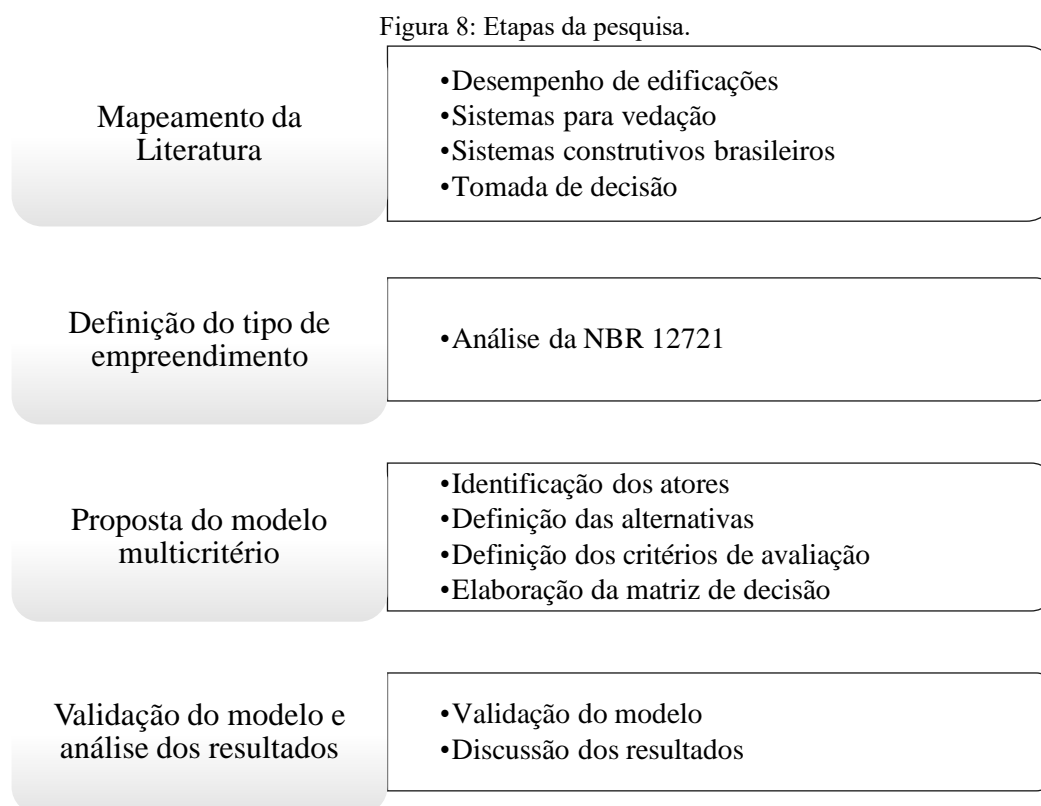
Autores	Método	Objetivo
Attallah et al. (2017)	ELECTRE III	Seleção de créditos em sistemas de classificação
Wang et al. (2017)	TOPSIS	Comparação do desempenho energético de edificações
Delgarm, Sajadi e Delgarm (2016)	ABC + TOPSIS	Seleção da melhor solução ótima para melhor eficiência energética e conforto térmico
Silva, Almeida e Ghisi (2016)	AHP + TOPSIS	Classificação de sistemas construtivos
Balali, Zahraie e Roozbahani (2014)	ELECTRE III + PROMETHEE II	Seleção de sistemas estruturais
Kabak et al. (2014)	Fuzzy + Analytic Network Process (ANP)	Classificação de edificações conforme o desempenho energético
Baglivo, Congedo e Fazio (2014)	Multi Objective Genetic Algorithm (MOGA) II	Otimização de parede externa para clima quente
Han, Chen e Wang (2013)	Análise multicritério	Classificação de sistemas de vedação externa de maior resistência ao calor
Hopfe, Augenbroe e Hensen (2013)	AHP	Seleção de sistemas de aquecimento/resfriamento para melhor desempenho de um projeto de edificação
Sabapathy e Maithel (2013)	Análise multicritério	Classificação de vedações quanto ao impacto ambiental

Fonte: Autor (2018).

Finalmente, Jato-Espino et al. (2014) apresentam uma revisão da literatura sobre a aplicação de métodos de tomada de decisão na construção nas últimas duas décadas. São expostos 88 artigos científicos relacionados ao tema. Dentre estes, 50 abordagens utilizam um método único de apoio à decisão e 38 abordam combinações de diferentes métodos científicos. Observa-se que o método AHP é o mais recorrente tanto em abordagens simples (22,73% do total) como em abordagens conjuntas (29,54%). O método é utilizado em seleções de rodovias, empreiteiros, sistemas construtivos, entre outros casos típicos da construção civil. Na sequência, a lógica *Fuzzy* ocupa a segunda posição nas abordagens híbridas com 27,27% das ocorrências, acompanhada pelo método TOPSIS que representa 12,50% do total das abordagens em conjunto.

5 METODOLOGIA DA PESQUISA

O procedimento metodológico utilizado para a elaboração deste modelo foi dividido nas seguintes etapas apresentadas na Figura 8.



Fonte: Autor (2018).

Após a revisão da literatura, houve a definição do tipo de empreendimento analisado. Segundo a ABNT NBR 12721:2006, projeto-padrão é um projeto selecionado para representar os diferentes tipos de edificações definidos pelas características principais: número de pavimentos, número de dependências por unidade, áreas equivalentes, padrão de acabamento da construção e número total de unidades.

A norma estabelece 12 tipos de projetos-padrão, sendo quatro tipos de residência unifamiliar: residência padrão baixo, normal, alto e popular; oito tipos de residência multifamiliar: projeto de interesse social, prédio popular de padrão baixo e normal, R8 de padrão baixo, normal e alto e R16 de padrão normal e alto; quatro tipos de edificações comerciais: comercial – salas e lojas padrões normal e alto, comercial – andar livre e galpão industrial. Para este trabalho, são utilizados os quatro tipos de residência unifamiliar e os oito projetos-padrões de residências multifamiliares. O Quadro 5 traz as características da

composição do edifício e a área real e a equivalente para a devida correspondência com os projetos reais multifamiliares.

Quadro 5: Projetos-padrão adotados para residências multifamiliares.

	Projeto de Interesse Social (PIS)	Prédio popular - padrão baixo (PP-B)	Prédio popular - padrão normal (PP-N)	R8 - Padrão baixo (R8 - B)
Composição do edifício	Pavimento térreo e 4 pavimentos-tipo	Pavimento térreo e 3 pavimentos-tipo	Pilotis e 4 pavimentos-tipo	Pavimento térreo e 7 pavimentos-tipo
Área real (m²)	991,45	1415,07	2590,35	2801,64
Área equivalente (m²)	978,09	927,08	1840,45	1885,51
	R8 - Padrão normal (R8 - N)	R8 - Padrão alto (R8 - A)	R16 - Padrão normal (R16 - N)	R16 - Padrão alto (R16 - A)
Composição do edifício	Garagem, pilotis e 8 pavimentos-tipo	Garagem, pilotis e 8 pavimentos-tipo	Garagem, pilotis e 16 pavimentos-tipo	Garagem, pilotis e 16 pavimentos-tipo
Área real (m²)	5998,73	5917,79	10562,07	10461,85
Área equivalente (m²)	4135,22	4644,79	8224,5	8371,4

Fonte: ABNT NBR 12721 (2006).

Para a elaboração deste trabalho, considerou-se um prédio de padrão normal do tipo R16, com garagem, pilotis e 16 pavimentos tipo, área real de 10562,07 m² e área equivalente de 8224,5 m².

5.1 Etapas de desenvolvimento do modelo multicritério

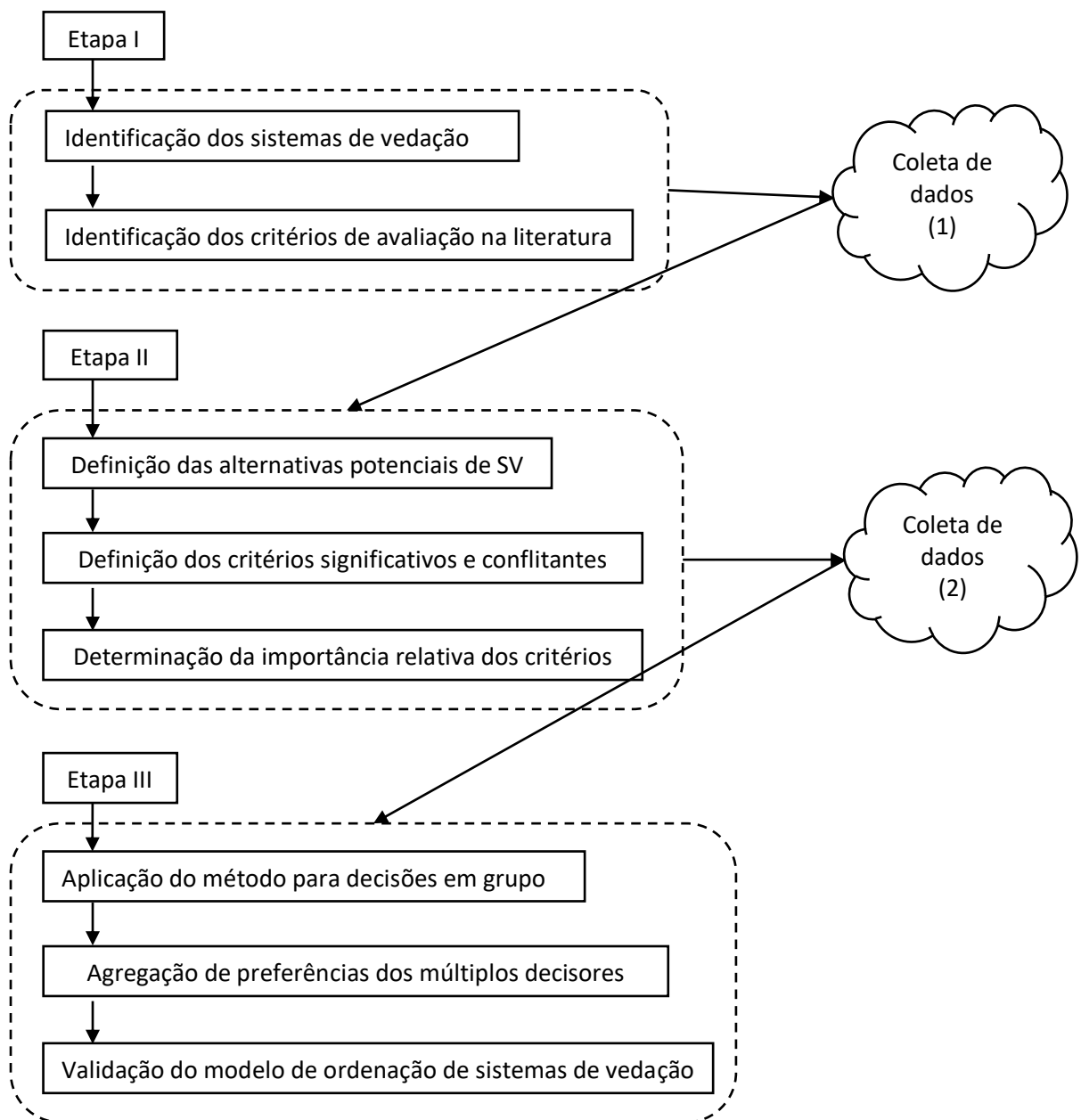
Para a elaboração do modelo multicritério de decisão em grupo, foram necessários os seguintes procedimentos:

- Identificação dos atores: Devem ser listados os atores envolvidos na resolução do problema. Foram definidos os decisores, responsáveis pela tomada de decisão, e o analista, profissional com conhecimento técnico na área para fornecer informações cruciais à tomada de decisão.

- b) Definição das alternativas: escolha dos sistemas construtivos para vedações verticais que foram as alternativas potenciais para a realização da seleção.
- c) Definição dos critérios de avaliação: Os critérios de avaliação foram definidos pela listagem dos principais requisitos relativos à segurança, habitabilidade e sustentabilidade aplicáveis aos sistemas de vedações externas por meio da análise da norma de desempenho e dos critérios importantes para a decisão.

A Figura 9 descreve as etapas de elaboração do modelo, com a indicação da ordem de execução de cada fase.

Figura 9: Etapas de desenvolvimento do modelo.



Fonte: Autor (2018).

O modelo multicritério foi desenvolvido considerando-se a zona bioclimática 8, que corresponde a 53,7 % do território brasileiro (ABNT, 2005c) e onde está situada a cidade de Fortaleza – CE, local de desenvolvimento desta pesquisa. No caso da escolha de um sistema construtivo para vedação de edificações numa empresa, o decisor pode ser representado pelo incorporador ou diretor técnico da empresa. Ele é o responsável por ratificar ou vetar a escolha dos analistas. Os especialistas em conforto também participam da decisão representando a visão do usuário. Nessa pesquisa, foram coletadas as preferências de múltiplos decisores, visando a formulação de um modelo que possa ser utilizado em decisões de grupo. Os analistas são os responsáveis pela estruturação e análise do problema, sendo representados pela equipe responsável pelo projeto básico do empreendimento, arquiteto, engenheiro estrutural e engenheiro de planejamento e orçamento.

5.1.1 Estudo das alternativas

Dentre os sistemas construtivos para vedação que possuíam DATec, foram encontradas paredes de bloco de gesso, paredes de concreto moldadas no local e painéis pré-fabricados. Foram selecionados os aplicáveis a edifícios multifamiliares para serem comparados aos sistemas tradicionalmente utilizados, formando um conjunto finito de alternativas. Foram desconsideradas paredes de blocos de gesso, por serem aplicáveis somente a vedações internas; relatórios emitidos antes de 2013 por não atenderem a última revisão da ABNT NBR 15575 durante a execução deste trabalho; e relatórios de sistemas construtivos não avaliados para a zona bioclimática cenário deste trabalho. Por fim, foram eleitas 8 alternativas para a composição da aplicação numérica deste trabalho. O Quadro 6 apresenta a identificação das 8 alternativas de sistemas de vedação com a indicação da existência de DATec (se houver), materiais principais e características específicas.

Quadro 6: Identificação dos painéis com respectivos DaTecs, material e especificações.

SV	DA Tec	Material	Características
SV 1	-	Blocos cerâmicos	Painel de alvenaria moldado in loco, sem comprimento máximo definido e com uso de tijolo cerâmico
SV 2	DA Tec 21	Alvenaria pré-fabricada	Painel estrutural pré-moldado em alvenaria com blocos cerâmicos e concreto armado com comprimento máximo de 5 m e ligação entre painéis por meio de solda e preenchimento com graute
SV 3	-	Blocos de concreto	Painel de alvenaria moldado in loco, sem comprimento máximo definido e com uso de blocos de concreto
SV 4	-	Painel arquitetônico	Painel maciço de concreto pré-fabricado não-estrutural pronto com acabamento definido pelo cliente. A fixação dos painéis é feita por meio de inserts metálicos embutidos aparafusados à estrutura.
SV 5	-	Concreto in loco	Painel estrutural de concreto armado moldado no local sem definição de comprimento máximo
SV 6	DA Tec 03	Concreto pré-fabricado	Painel maciço pré-moldado de concreto armado com comprimento máximo de 6 m e ligação entre os painéis por meio de solda e posterior preenchimento com graute
SV 7	DA Tec 20	Wood frame	Painel com sistema estruturado em peças leves de madeira serrada - <i>light wood framing</i> com espaçamento máximo entre os montantes de 0,6 m. A ligação entre as chapas e o quadro estrutural é feita com pregos específicos ou grampos galvanizados e a entre duas placas é feita por meio de parafusos
SV 8	DA Tec 14	Steel frame	Painel com sistema construtivo em <i>light steel frame</i> com espaçamento máximo entre os montantes de 0,6 m. A ligação entre as chapas e entre as chapas e o quadro estrutural é feita com parafusos específicos

Fonte: Autor (2018).

Os sistemas de vedação apresentados são utilizados para a finalidade construtiva multifamiliar. Conforme as alternativas potenciais elencadas, foi montada uma matriz de

avaliação para uso em edificações multifamiliares, permitindo a tomada de decisão acerca do sistema construtivo para vedações externas. A seguir, são explanadas as especificações e detalhes construtivos de cada um dos oito sistemas de vedação indicados para a análise.

- Sistema de vedação 1 (SV1)

O sistema de vedação 1 é composto por alvenaria moldada in loco com tijolo cerâmico furado de 140x190x190 mm, com argamassa de assentamento de 20 mm e revestimento interno e externo de chapisco de argamassa de cimento e areia de 5 mm e emboço de argamassa mista de 20 mm. O encunhamento da alvenaria de vedação é feito com espuma de poliuretano expansiva.

- Sistema de vedação 2 (SV2)

O sistema de vedação 2 é um pré-moldado constituído de blocos cerâmicos de 8 furos com 70x190x190 mm, revestido por uma camada de concreto armado de 25 MPa e massa específica de 2365 kg/m³ em uma face e uma camada de argamassa de resistência à compressão de 10 MPa aos 28 dias na outra face. O painel é armado com treliças, barras de aço CA-50 e tela tipo Q61. A espessura total do painel é de 122 mm (IFBQ, 2016).

- Sistema de vedação 3 (SV3)

O sistema de vedação 3 é composto por alvenaria moldada in loco com blocos de concreto vazados de 140x190x390 mm, com argamassa de assentamento mista e revestimento interno e externo de chapisco de argamassa de cimento e areia de 5 mm e emboço de argamassa mista de 20 mm.

- Sistema de vedação 4 (SV4)

O sistema de vedação 4 é composto por um painel pré-fabricado arquitetônico de concreto armado não-estrutural acabado com cor e tipo de acabamento definido pelo cliente. O painel é maciço, com concreto de resistência à compressão de 35 MPa, armado com aço CA-50 e com uso de aditivos superplastificantes e retardadores de pega.

- Sistema de vedação 5 (SV5)

O sistema de vedação 5 é composto de concreto armado moldado no local com uso de formas metálicas, resultando em uma parede de concreto de 100 mm de espessura. O concreto utilizado tem densidade próxima a 2500 kg/m³, resistência à compressão mínima de 25 MPa e armadura em tela (tipo Q61 ou aço CA 60) na espessura das paredes e reforços com barras de aço CA-50 conforme projeto estrutural.

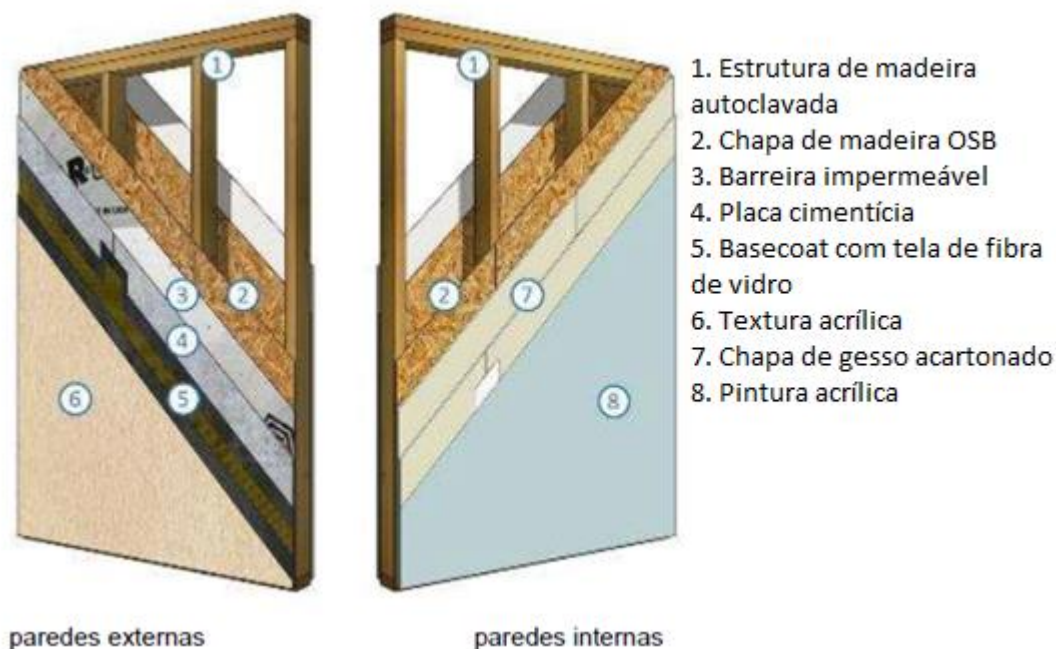
- Sistema de vedação 6 (SV6)

O sistema de vedação 6 é um pré-moldado de concreto armado maciço com espessura de 100 mm. O concreto utilizado tem resistência à compressão de 25 MPa e massa específica de 2400 kg/m³. A armadura dos painéis é formada por dupla tela soldada em aço CA-50.

- Sistema de vedação 7 (SV7)

O sistema de vedação 7 é formado por quadros de peça de madeira serrada do tipo Pinus e dimensões da seção transversal de 38x140 mm. Os painéis de paredes externas são compostos por chapas delgadas. Na face externa, há uma placa de OSB do tipo 3 de 9,5 mm de espessura acoplada a uma placa cimentícia classe A3 de 8 mm e na face interna, há duas camadas de chapa de gesso para drywall de 12,5 mm de espessura sobre uma camada de chapa de OSB conforme a Figura 10. As juntas internas entre as chapas de gesso são preenchidas com massa e fita para drywall e as juntas externas podem ser do tipo dissimulada ou aparente (IFBQ, 2017).

Figura 10: Estrutura externa e interna do SV7.



Fonte: IFBQ (2017).

- Sistema de vedação 8 (SV8)

O sistema de vedação 8 é formado por quadros estruturais de perfis leves de aço revestidos com zinco de no mínimo 275 g/cm², no caso de atmosferas rurais e urbanas. As fixações entre as guias, os montantes e as chapas são feitas por parafusos com resistência à corrosão de no mínimo 240 horas em câmara de névoa salina. O fechamento da face externa é

feito por uma placa cimentícia classe A3 de 10 mm de espessura, o núcleo é preenchido com manta de lã de vidro de 50 mm de espessura e o fechamento da face interna é feito com chapa de gesso para *drywall* de 12,5 mm. As juntas entre as chapas de gesso são tratadas com massa e fita para *drywall* e as juntas entre as placas cimentícias são tratadas com primer, fundo de junta, massa para junta, telas de fibra de vidro e massa para acabamento (IPT, 2015a).

5.1.2 Definição dos critérios de avaliação

A literatura aponta critérios de avaliação que podem ser utilizados para a seleção de sistemas construtivos, sendo encontrados critérios ambientais, técnicos e econômicos. O Quadro 7 apresenta os principais critérios de avaliação utilizados para a resolução desse tipo de problema.

Quadro 7: Critérios de avaliação encontrados na literatura.

Ambientais	Técnicos	Econômicos
Consumo de energia na fabricação	Segurança estrutural	Custo de aquisição
Consumo de energia na operação	Segurança contra o fogo	Custo de execução
Emissão de gases tóxicos	Estanqueidade	Custo de manutenção
Reciclabilidade	Desempenho térmico	Produtividade
Geração de resíduos	Desempenho acústico	Velocidade de construção
	Vida útil e durabilidade	Saúde e segurança no trabalho
	Manutenibilidade	

Fontes: Silva, Almeida e Ghisi (2016); Bernardo, Gaspar e Antunes (2017); Martabid e Mourgues (2015); Balali, Zahraie e Roozbahani (2014); Sabapathy e Maithel (2013) e Soebarto e Williamson (2001).

Após a análise da literatura foram propostos como critérios iniciais de avaliação os critérios técnicos, ambientais e econômicos apresentados a seguir:

- Segurança estrutural
- Estanqueidade
- Desempenho térmico
- Desempenho acústico
- Segurança contra o fogo
- Durabilidade
- Sustentabilidade

- Custo de execução
- Custo de manutenção
- Produtividade

Pela análise da avaliação das alternativas nos DATecs dos sistemas construtivos em cada um dos critérios, foi possível a eliminação de alguns critérios por não apresentarem diferença significativa entre as alternativas. Quando todas as alternativas têm o mesmo valor em um critério de avaliação, não há diferença significativa na avaliação intracritério. Foram eliminados todos os critérios que representam a segurança estrutural: impacto de corpo mole, impacto de corpo duro, cargas suspensas e ações transmitidas por portas, e o critério de estanqueidade por serem verificados apenas quanto ao atendimento ao requisito mínimo, não sendo avaliados até a ruptura ou até a capacidade máxima.

A segurança contra o fogo também foi eliminada, pois foi observado na análise dos DATecs dos sistemas construtivos que eles atendem apenas ao requisito mínimo de tempo de resistência ao fogo, não sendo um critério de diferenciação entre as alternativas. Outro critério eliminado foi a durabilidade, pois também só é especificado que atendem ao nível mínimo de desempenho especificado em norma, de 40 anos de vida útil para vedações externas. O custo de manutenção é importante, mas também foi descartado como critério de avaliação por não ser considerado essencial na tomada de decisão relativa a escolha da metodologia utilizada. Portanto, foram definidos como critérios finais de avaliação: desempenho térmico, desempenho acústico, emissão de CO₂, custo e produtividade.

O desempenho térmico dos sistemas construtivos propostos é analisado pelo procedimento de simulação computacional nas quatro situações: condição padrão, condição com ventilação, condição com sombreamento e condição com ventilação e sombreamento. Pelo estudo da literatura, nota-se que a condição padrão é a condição mais crítica, seguida pela condição apenas com ventilação, condição com sombreamento e finalizando com o uso simultâneo de sombreamento e ventilação, que torna a simulação bastante favorável para que a vedação apresente desempenho térmico satisfatório. As alternativas propostas são analisadas nas quatro condições com o resultado de não atende, atende na cor clara, atende na cor clara ou média ou ainda atende na cor clara, média ou escura, de acordo com o índice de absorvância das paredes externas utilizado na simulação.

Portanto, o critério de desempenho térmico pode ser analisado numa escala numérica, definindo-se como desejado que o sistema de vedação atenda ao desempenho mínimo logo na condição padrão e como menos desejado um sistema de vedação que atenda somente na condição de sombreamento e ventilação, devido ao maior custo embutido na condição de

sombreamento e ventilação. A escala foi numerada da seguinte maneira: condição padrão = 1, condição com ventilação = 2, condição com sombreamento = 3 e condição com ventilação e sombreamento = 4. A coleta de dados desse critério é feita pela análise dos DATecs das alternativas propostas.

O desempenho acústico pode ser analisado por medição em campo e por medição em laboratório. No caso desse trabalho, foram considerados os resultados obtidos em laboratório, expressos pelo índice de redução sonora ponderado (R_w) medido na unidade decibéis. Quanto maior esse índice, melhor o desempenho acústico do sistema construtivo, pois é indicado que a vedação consegue reduzir mais eficazmente a transmissão de ruídos externos para os ambientes internos, portanto esse critério pode ser analisado numa escala quantitativa, sendo desejada a sua maximização. A coleta de dados relativa a esse critério é feita pela análise dos DATecs dos sistemas construtivos analisados.

A sustentabilidade das alternativas pode ser analisada pelo potencial de aquecimento global, medido pela quantidade de CO₂ equivalente. Esse fator representa a emissão do gás CO₂ em kg equivalente por unidade do material. O fator de emissão de cada sistema de vedação foi analisado pela produção do seu núcleo principal, seja blocos cerâmicos, blocos de concreto, concreto, aço ou madeira. Pode ser definida uma escala quantitativa para a avaliação desse critério, visando a sua minimização.

O custo de execução é um critério econômico de bastante importância para o construtor, visto que influi diretamente na rentabilidade do negócio e desembolso do cliente. Pode ser medido em R\$/m², sendo considerados o custo do material e o custo da mão de obra na execução de 1m² de painel analisado. Nesse critério, objetiva-se a minimização. A produtividade está diretamente ligada ao custo, pois uma maior produtividade reduz o custo, devido ao menor gasto com mão de obra. É um critério importante na escolha de sistemas construtivos e é medido na unidade m²/homem.dia, sendo desejada a sua maximização. O Quadro 8 apresenta o resumo dos critérios, escalas estabelecidas e objetivos desejados.

Quadro 8: Escalas e objetivos para os critérios de avaliação.

Critério	Escala	Objetivo
	Com sombreamento e ventilação (4)	
Desempenho térmico (C1)	Condição com sombreamento (3) Condição com ventilação (2) Condição padrão (1)	↓ Minimização
Desempenho acústico (C2)	Quantitativa (dB)	↑ Maximização
Emissão de CO₂ (C3)	Quantitativa (kgCO _{2e} /m ²)	↓ Minimização
Custo de execução (C4)	Quantitativa (R\$/m ²)	↓ Minimização
Produtividade (C5)	Quantitativa (m ² /homem.dia)	↑ Maximização

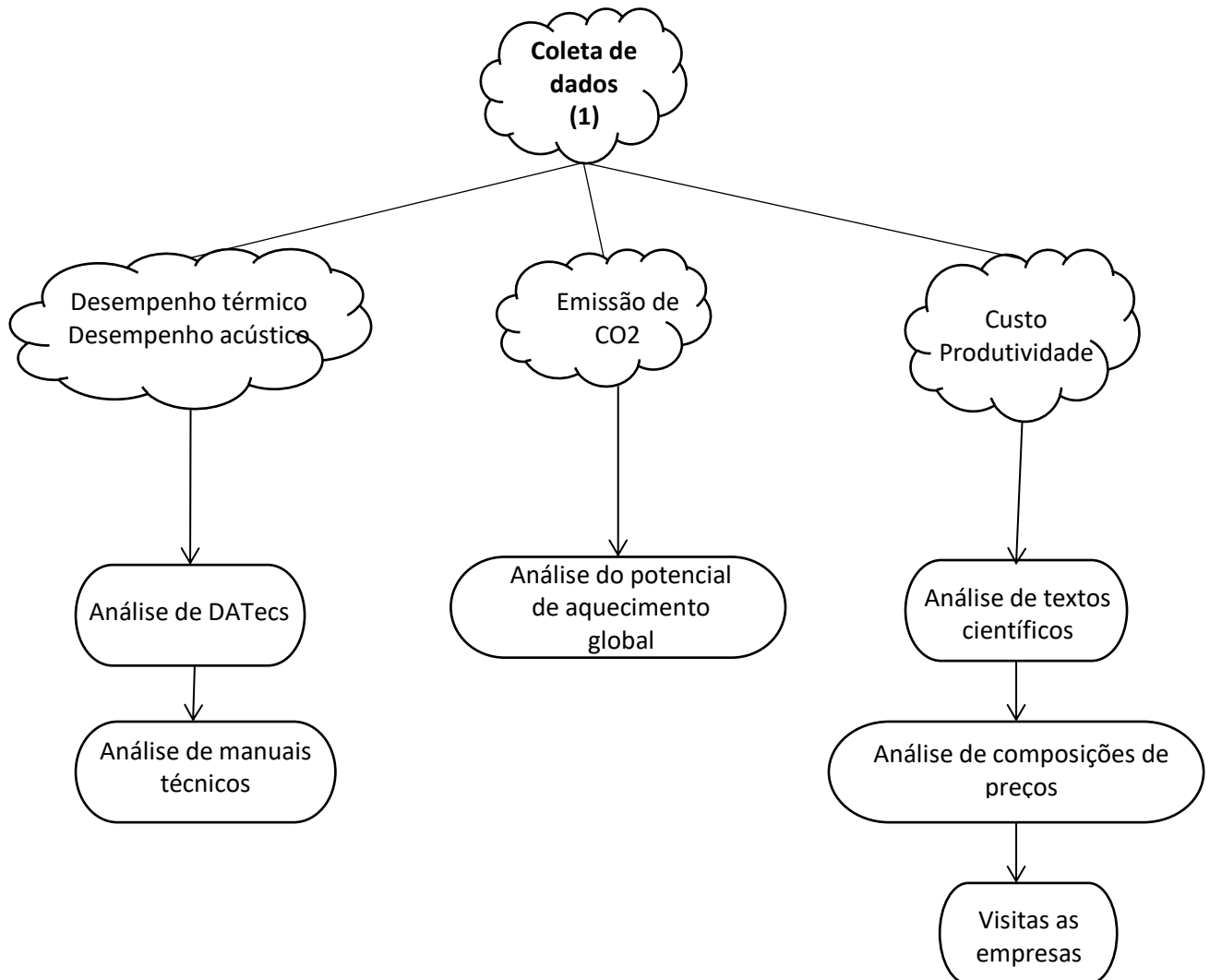
Fonte: Autor (2018).

5.1.3 Coleta e análise de dados

A coleta de dados foi feita por visitas as empresas, entrevistas, pesquisa bibliográfica e documental. Os dois tipos de pesquisa são sinônimos, pois têm como objeto de investigação o documento, porém o tipo de documento analisado difere. A pesquisa bibliográfica utiliza documentos de reconhecido domínio científico, como livros, periódicos, dicionários, artigos científicos e enciclopédias, já a pesquisa documental, utiliza documentos que não receberam nenhum tratamento científico, como relatórios, revistas, cartas, fotos, filmes, entre outros (OLIVEIRA, 2007).

A primeira parte consiste na coleta dos dados relativa a avaliação da performance de cada sistema de vedação no critério de avaliação analisado. A Figura 11 mostra as técnicas utilizadas para a obtenção de dados de cada critério. Foram utilizados os Documentos Técnicos de Avaliação do SINAT dos sistemas construtivos de vedações para a obtenção dos valores relativos a desempenho das alternativas escolhidas, assim como manuais técnicos dos sistemas tradicionais. Foram coletados dados climáticos do potencial do aquecimento global para a análise das alternativas quanto à sustentabilidade.

Figura 11: Fase 1 da coleta de dados.



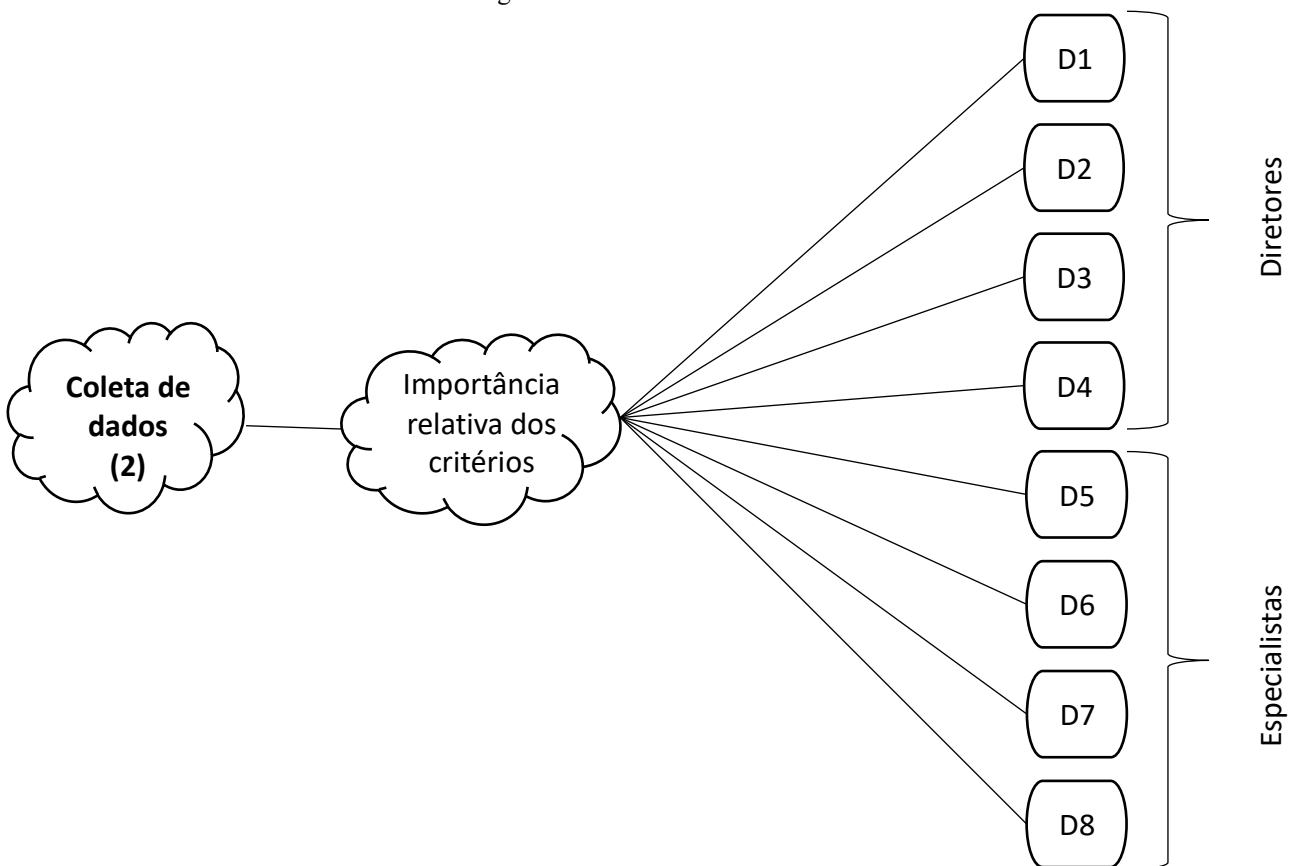
Fonte: Autor (2018).

Para a obtenção dos parâmetros econômicos inerentes a cada sistema construtivo foram coletados dados de tabelas de preço do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), da Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA) e material bibliográfico. Esses dados foram ajustados com os dados obtidos de visitas as empresas executoras dos sistemas analisados. Foram realizadas entrevistas não-estruturadas a diretores de empresas que utilizam os seguintes sistemas de vedação: painéis pré-fabricados de alvenaria, painéis pré-fabricados de concreto, paredes de concreto moldadas no local e painéis leves com estrutura de steel frame.

A segunda fase da coleta de dados consiste na obtenção da importância relativa e dos limites de indiferença, preferência e veto de cada critério de avaliação do modelo para a tomada de decisão em grupo. Nessa fase foram realizadas entrevistas a oito decisores, sendo

quatro diretores técnicos de quatro diferentes empresas na cidade de Fortaleza e quatro especialistas em conforto em edificações. As empresas escolhidas são empresas com foco em obras de edificações habitacionais multifamiliares de médio e alto padrão, que se destacam no cenário estadual pela qualidade dos produtos oferecidos, interesse em satisfazer as necessidades dos usuários e a busca da melhoria contínua em seus processos construtivos. Também foram coletadas as opiniões de quatro especialistas em conforto do usuário para a obtenção de diferentes visões acerca do modelo. A Figura 12 mostra a execução da fase 2 da coleta.

Figura 12: Fase 2 da coleta de dados.



Fonte: Autor (2018).

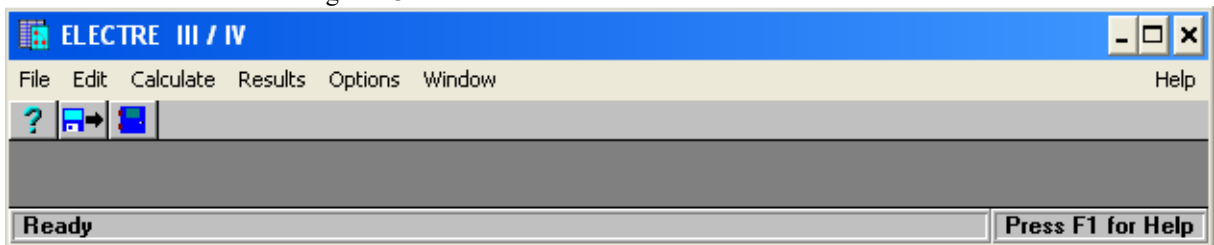
Em seguida, foi elaborado um modelo para ordenação dos sistemas de vedação de edificações habitacionais com melhor custo-benefício utilizando-se o método multicritério de apoio à decisão. Nessa pesquisa, são utilizados pseudocritérios, portanto foi estabelecido um modelo de agregação de preferências, aplicando-se o ELECTRE III para a classificação das alternativas e em seguida, o ELECTRE IV para a avaliação entre os decisores por meio do software ELECTRE III/IV. Para a resolução de problemas com os métodos citados, pode-se utilizar o software ELECTRE III-IV desenvolvido pela Universidade Paris-Dauphine conforme

Dias, Figueira e Roy (2006). Esse software utiliza a metodologia de Roy (1991) e fornece os resultados do algoritmo de ordenação, a ordenação na pré-ordem parcial, a ordenação na pré-ordem completa e a matriz de classificação, que fornece uma visão sintética dos resultados pela seguinte representação:

- a) P expressa que a alternativa a é melhor que b ;
- b) I expressa que a é equivalente a b ;
- c) P^- expressa que a é pior que b ;
- d) R expressa que a é incomparável a b .

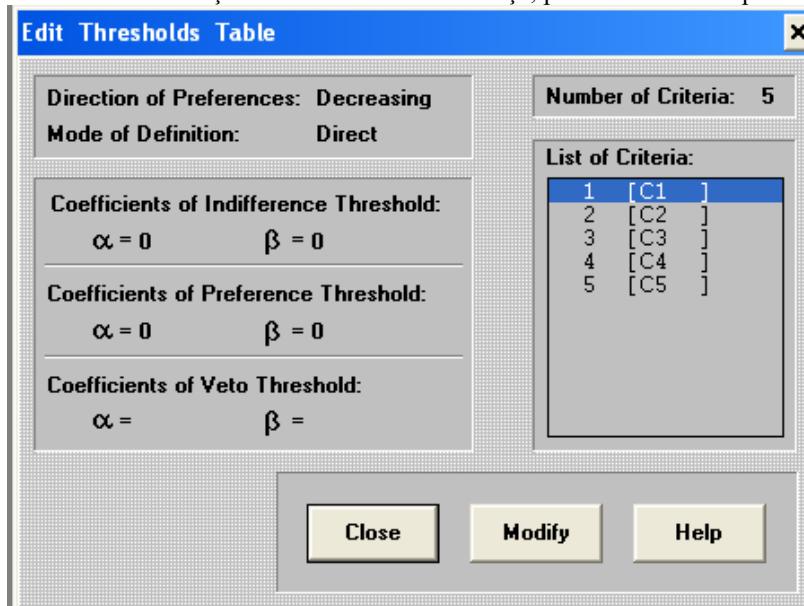
A interface inicial do programa apresenta sete menus iniciais: arquivo, editar, calcular, resultados, opções e janela como mostrado na Figura 13. No menu editar é possível escolher o método utilizado, informar os critérios, pesos e direção da preferência, informar as alternativas e as suas performances e também os limites de indiferença, preferência e veto e se foram definidos de forma direta ou inversa (DIAS; FIGUEIRA; ROY, 2006). Na Figura 14, apresenta-se um exemplo da janela de edição dos limites de cada critério.

Figura 13: Interface inicial do software ELECTRE III/IV.



Fonte: ELECTRE III/IV (2018).

Figura 14: Tela de inserção dos limites de indiferença, preferência e veto por critério.



Fonte: ELECTRE III/IV (2018).

6 MODELO DE ORDENAÇÃO DOS SISTEMAS DE VEDAÇÃO

Após a primeira fase da coleta de dados, foi montada a matriz de avaliação das alternativas com a análise dos desempenhos dos sistemas de vedações em cada um dos critérios analisados como mostra o Quadro 9.

Quadro 9: Matriz de avaliação das alternativas.

	C1	C2 (dB)	C3 (kgCO₂e/m²)	C4 (R\$/m²)	C5 (m²/H.dia)
SV 1	condição padrão (1)	38	31,2	150	10
SV 2	condição padrão (1)	45	31,2	100	42
SV 3	condição com sombreamento (3)	48	24,2	115	13
SV 4	com sombreamento e ventilação (4)	45	32,5	220	36
SV 5	com sombreamento e ventilação (4)	47	32,5	130	20
SV 6	com sombreamento e ventilação (4)	46	32,5	110	30
SV 7	condição padrão (1)	48	6,0	270	35,2
SV 8	condição com sombreamento (3)	50	8,0	240	30

Observa-se que quanto ao desempenho térmico, todos os sistemas de vedação atingem o desempenho mínimo, variando apenas se atingem em condições padrões ou com a adição de algum dispositivo que aumente a ventilação ou sombreamento sobre as unidades habitacionais. Como visto na literatura, comprova-se que os sistemas maciços de concreto são os que têm os piores desempenhos comparados aos outros, enquanto os sistemas que utilizam isolamento térmico de lã de vidro ou de rocha fornecem condições de conforto térmico melhores aos usuários.

Na análise do desempenho acústico, todas as alternativas também atendem ao desempenho mínimo conforme a norma de desempenho. Apenas o SV1 não atinge os desempenhos intermediário e superior, pois a norma estabelece o mínimo de 40 dB no índice de redução sonora ponderado para as fachadas no nível intermediário, considerando-se a classe de ruído III. Como observado na literatura, os sistemas que utilizam o isolamento acústico de

lã de vidro ou de rocha são os que fornecem o melhor conforto acústico aos usuários, igualmente ao observado no desempenho térmico.

Quanto à emissão de gás carbônico e outros gases prejudiciais na atmosfera durante a produção dos sistemas de vedação, observa-se que o potencial de aquecimento global dos materiais utilizados é bem diferente. Os sistemas maciços de concreto acabam se tornando mais prejudiciais devido ao grande volume de concreto utilizado para a produção. O aço também é um material bastante prejudicial, porém devido ao menor volume utilizado na execução de 1 m² de painel de steel frame, o seu indicador de sustentabilidade compara-se ao painel de wood frame, sistema com menor emissão de CO₂ por m² de painel, além do que é comprovado na literatura que o uso da madeira plantada capta o gás carbônico presente na atmosfera pela ocorrência do fenômeno da fotossíntese nas árvores.

Os custos dos sistemas de vedação apresentados correspondem a custos de material e mão-de-obra. Nota-se que já existem sistemas mais baratos que o sistema tradicional, SV1, porém a cultura e o conhecimento da mão-de-obra acerca da vedação de blocos cerâmicos favorecem o seu uso. Como observado nas entrevistas, os diretores relatam que falta mão-de-obra capacitada nos outros sistemas construtivos. Os sistemas de wood frame e steel frame exigem mão-de-obra especializada, além de materiais industrializados de qualidade, como isolamentos e membranas hidrófugas, resultando nos sistemas de vedação mais caros. O painel arquitetônico também apresenta um valor mais elevado que os demais, porém é o único que já tem acabamento pronto, cerâmica ou pintura, conforme definido pelo cliente. Quanto aos outros sistemas de vedação, observa-se vantagens do seu uso em relação ao fechamento com o sistema tradicional.

A produtividade mostrada das alternativas refere-se à quantidade de serviço em m² que um homem consegue fazer em um dia. Atualmente, a produtividade observada em obras é bastante baixa com o fechamento de alvenaria tradicional, chapisco e reboco. Os entrevistados relatam a necessidade da otimização da produtividade e da redução das equipes de obra. Observa-se que os sistemas pré-fabricados e pré-moldados oferecem produtividade bastante superior aos demais, devido ao fato de o painel ser produzido em fábrica ou pré-moldado antes e ser apenas montado no local.

6.1 Definição das preferências dos decisores

Com a definição das alternativas e critérios finais juntamente com a coleta dos dados iniciais, pode-se dar início a execução da segunda fase da coleta de dados. Foram

entrevistados 4 diretores técnicos de empresas de Fortaleza com diferentes experiências para a modelagem da preferência em uma decisão em grupo. Os resultados estão no Quadro 10.

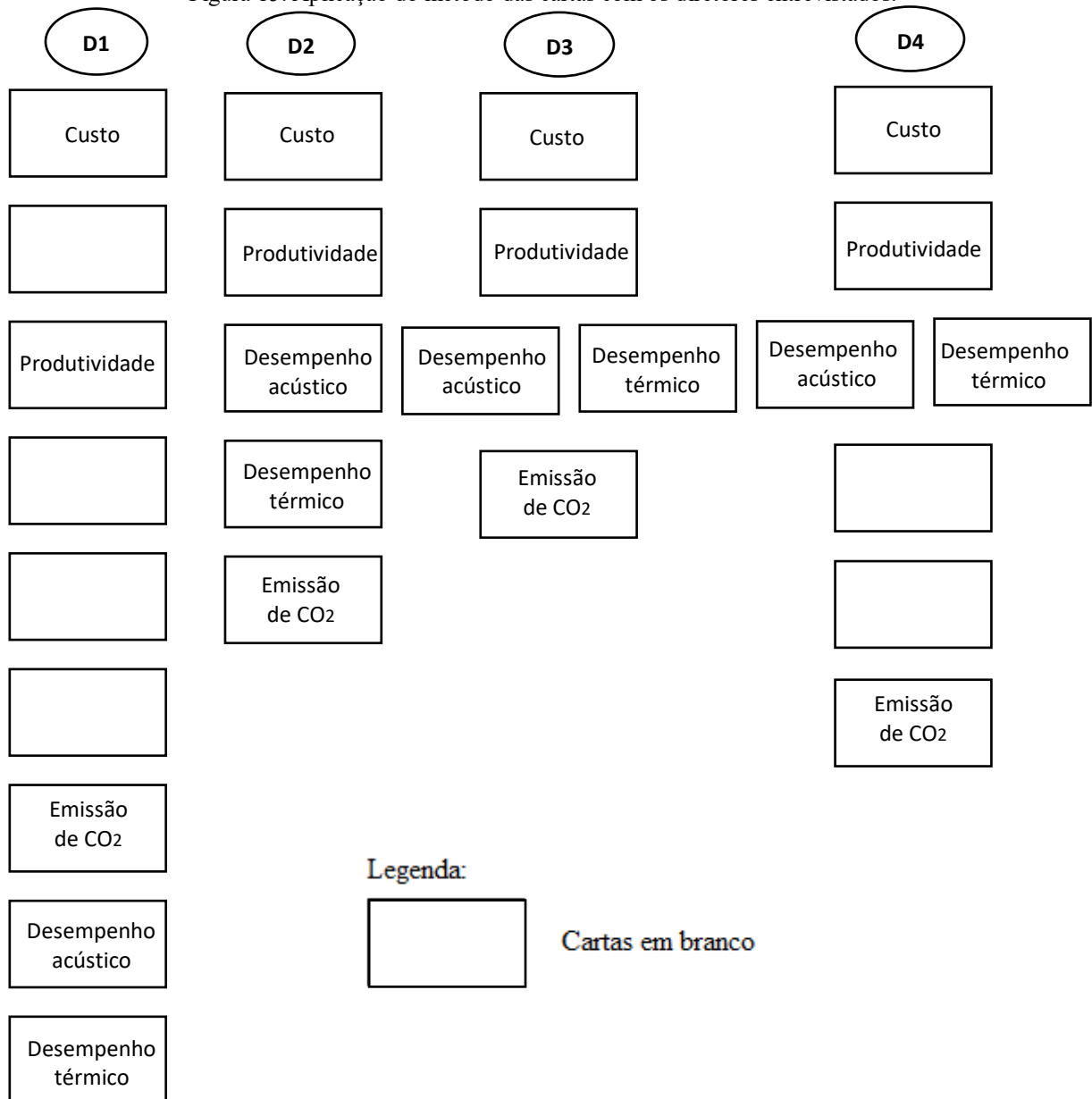
Quadro 10: Características dos diretores entrevistados.

	D1	D2	D3	D4
Empresa atuante	Empresa nacional de médio porte com atuação na cidade de Fortaleza.	Empresa nacional de médio porte com atuação em todo o estado do Ceará.	Empresa nacional de médio porte com atuação no Nordeste.	Empresa nacional de médio porte com atuação na cidade de Fortaleza.
Tempo de experiência	20 anos	22 anos	15 anos	30 anos
Sistemas de vedação utilizados	SV 1 e SV 3	SV 1, SV 2, SV 3 e SV 5	SV 1	SV 1, SV 3 e SV 5

O tempo de experiência apresentado é o tempo total de experiência com obras de edificações. Observa-se que todos têm mais de 15 anos de experiência, sendo pessoas experientes na escolha de sistemas construtivos. Também são apresentados os sistemas de vedação já utilizados pelos decisores. Todos já trabalharam com o sistema de vedação 1, que é o tradicional de fechamento com bloco cerâmico. Apenas um utilizou o sistema de painel pré-fabricado de alvenaria, enquanto 2 tiveram a oportunidade de realizar paredes de concreto moldadas no local e 3 deles utilizaram vedação com bloco de concreto em alvenaria estrutural. Quanto aos outros sistemas, nenhum decisor teve a oportunidade de executar.

Na coleta da importância relativa dos critérios de avaliação, foi utilizado o método das cartas. A ordenação das cartas de cada um dos decisores entrevistados está apresentada na Figura 15.

Figura 15: Aplicação do método das cartas com os diretores entrevistados.



Para todos os diretores entrevistados, o critério mais importante na avaliação de um sistema de vedação é o custo. Em segundo lugar, vem a produtividade que é diretamente ligada ao custo, por interferir na quantidade de operários necessários na execução da obra. Em seguida, para a maioria, são mais importantes os requisitos técnicos de desempenho acústico e desempenho térmico e por último, o indicador de emissão de CO₂, que representa a sustentabilidade. O único diretor que considerou o critério de sustentabilidade mais importante que os critérios técnicos é diretor de uma empresa que é referência em ações de sustentabilidade e na preservação do meio ambiente, com certificado LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) em seus projetos. Para os outros diretores, a obrigatoriedade recente do

cumprimento da norma de desempenho, com implementação de metodologias antes não usadas nas empresas, e a atual crise econômica são obstáculos para o crescimento da preocupação com a sustentabilidade nas obras.

As preferências dos diretores foram coletadas na entrevista expressas pelos limites de indiferença, preferência e veto para cada critério. Os resultados estão na Tabela 5.

Tabela 5: Preferências dos diretores de limites de indiferença, preferência e veto para cada critério.

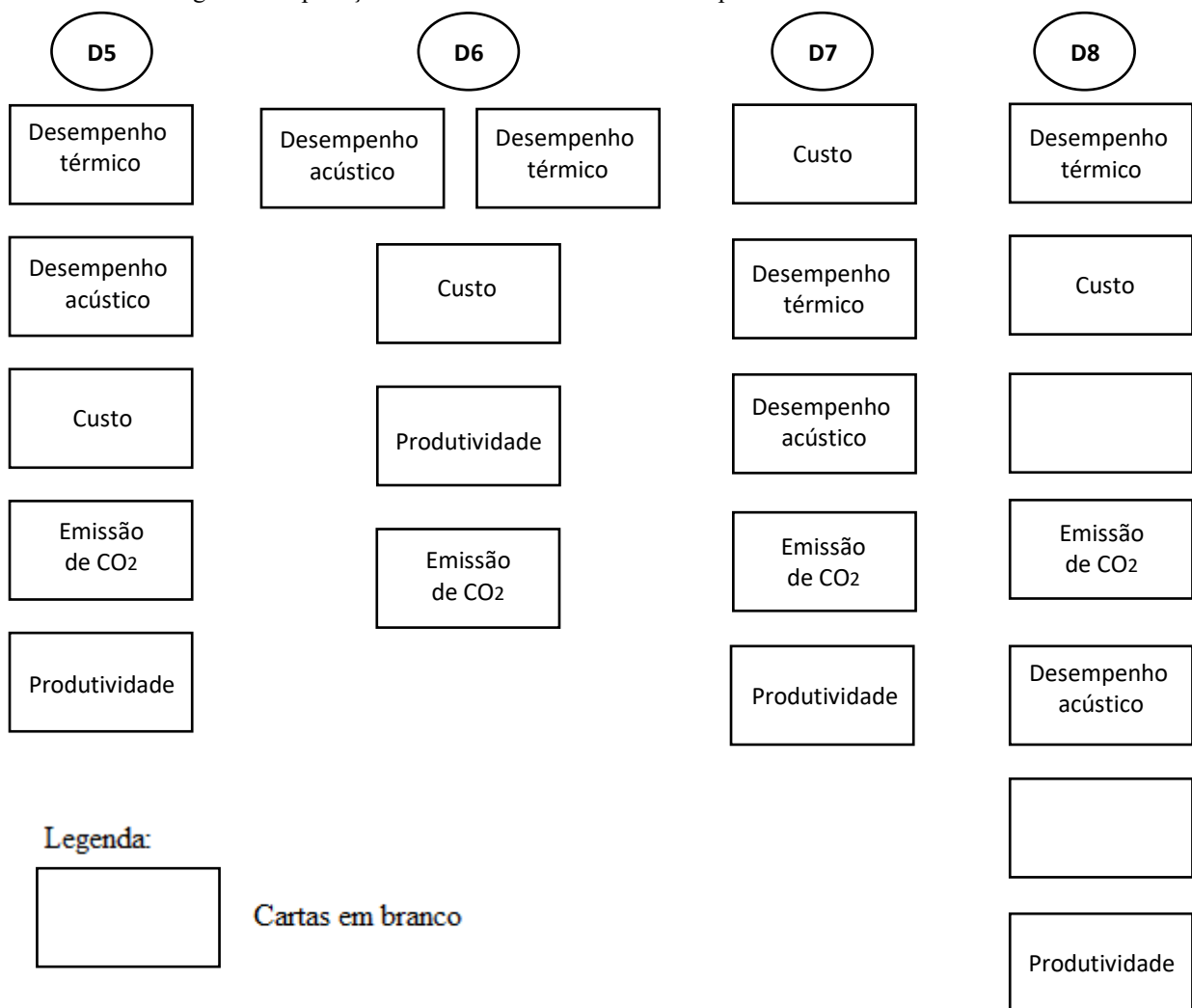
Decisores	Limites	C1	C2	C3	C4	C5
D1	Limite de indiferença (q)	-	-	-	10	5
	Limite de preferência (p)	-	2	-	50	20
	Limite de veto (v)	-	14	-	-	21
D2	Limite de indiferença (q)	-	-	-	-	-
	Limite de preferência (p)	-	-	-	-	-
	Limite de veto (v)	-	-	-	-	-
D3	Limite de indiferença (q)	-	2	-	10	3
	Limite de preferência (p)	-	3	-	11	10
	Limite de veto (v)	-	4	-	-	20
D4	Limite de indiferença (q)	-	-	-	-	-
	Limite de preferência (p)	-	-	-	1	1
	Limite de veto (v)	-	-	-	-	20

Pela tabela acima, pode ser constatada a importância dada pelos diretores aos critérios produtividade e custo. 75% dos entrevistados têm definições claras de indiferença, preferência e veto para as avaliações das alternativas nesses critérios. Alguns também definiram

os limites para o desempenho acústico. Observa-se que apesar da mesma matriz de decisão ter sido exposta aos diretores, a dimensão do que é indiferente, preferível ou vetado comparando-se as alternativas é diferente para cada um.

Também foram entrevistados 4 especialistas em conforto ambiental, que são professores renomados das principais universidades de Fortaleza. A importância relativa dos critérios para a análise comparativa entre os sistemas de vedação foi coletada com o método das cartas e está mostrada na Figura 16.

Figura 16: Aplicação do método das cartas com os especialistas entrevistados.



Para os especialistas em conforto, os principais critérios para a escolha de um sistema de vedação são os indicadores de habitabilidade, expressos por desempenho térmico e desempenho acústico juntamente com o custo. Apenas para o decisor 7 o custo está acima do conforto e para o decisor 8 a sustentabilidade deve ter maior evidência no processo decisório.

Segundo o grupo de entrevistados, a produtividade é um critério que pouco influencia o conforto do usuário.

As preferências dos especialistas foram coletadas na entrevista expressas pelos limites de indiferença, preferência e veto para cada critério. Os resultados estão na Tabela 6.

Tabela 6: Preferências dos especialistas de limites de indiferença, preferência e veto para cada critério.

Decisores	Limites	C1	C2	C3	C4	C5
D5	Limite de indiferença (q)	-	-	1	-	-
	Limite de preferência (p)	1	-	10	-	-
	Limite de veto (v)	-	-	-	-	-
D6	Limite de indiferença (q)	-	-	-	-	-
	Limite de preferência (p)	1	2	1	-	-
	Limite de veto (v)	-	-	-	-	-
D7	Limite de indiferença (q)	-	-	-	-	-
	Limite de preferência (p)	1	7	-	-	-
	Limite de veto (v)	3	-	-	-	-
D8	Limite de indiferença (q)	-	-	1	-	-
	Limite de preferência (p)	1	7	2	50	20
	Limite de veto (v)	3	12	24,5	140	30

O segundo grupo de entrevistados definiu, em sua maioria, limites para os critérios técnicos e de sustentabilidade. Apenas um decisor sentiu-se à vontade para a definição de parâmetros para os critérios econômicos. Observa-se que não há indiferença nos critérios de desempenho térmico e acústico, sendo todos os valores diferentes e importantes para a decisão. Os especialistas forneceram os limites de indiferença, preferência e veto que complementam a opinião dos diretores de empresa, fornecendo um modelo robusto para a tomada de decisão.

Utilizando-se os resultados do método das cartas mostrados nas Figuras 12 e 13, aplicou-se a metodologia descrita no item 4.2.2 para a obtenção dos pesos normalizados dos critérios conforme as preferências de cada decisor. A determinação da importância relativa de cada critério por decisor está apresentada na Tabela 7. Os cálculos para a obtenção desses valores estão nos Apêndices A, B, C, D, E, F, G e H.

Tabela 7: Pesos normalizados obtidos pelo método das cartas por decisor e critério para o ELECTRE III.

Critério	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
C1	0,59	10,95	15,22	20,00	38,10	31,58	29,05	36,7
C2	6,28	20,00	15,22	20,00	29,05	31,58	20,00	12,8
C3	12,00	1,90	3,26	1,61	10,95	2,63	10,95	18,8
C4	46,28	38,10	39,13	32,26	20,00	21,93	38,10	30,8
C5	34,85	29,05	27,17	26,13	1,90	12,28	1,90	0,9

Para os diretores entrevistados, os critérios custo e produtividade receberam os maiores pesos, seguidos pelos critérios restantes. O somatório dos pesos normalizados de todos os critérios é igual a 100. Na determinação da importância relativa de cada critério para os especialistas em conforto, nota-se que os maiores pesos foram dados aos critérios de desempenho térmico e desempenho acústico seguidos pelo restante dos critérios. Os valores obtidos são utilizados para a resolução da metodologia do ELECTRE III no tópico a seguir.

6.2 Obtenção das preferências individuais

Para a obtenção dos resultados foi feita a aplicação do método ELECTRE III no software ELECTRE III/IV conforme demonstrado em Dias, Figueira e Roy (2006). Com os dados das Tabelas 5, 6 e 7, obtiveram-se os resultados para os decisores, como mostrado no Quadro 11. As matrizes de credibilidade e de superação resultantes dos cálculos matriciais estão mostradas nos Apêndices A, B, C, D, E, F, G e H.

Quadro 11: Ordenação final das alternativas por decisor no ELECTRE III.

Ordem	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
1	SV2	SV2	SV2	SV2	SV2	SV2	SV2	SV2
2	SV6	SV6	SV3	SV7	SV3	SV7	SV3	SV3
3	SV3	SV7 SV8	SV7	SV6	SV7	SV8	SV1	SV7
4	SV4	SV3	SV6	SV8	SV6	SV3	SV6 SV7	SV8
5	SV7 SV8	SV5	SV8	SV3	SV8	SV6	SV5 SV8	SV1
6	SV5	SV4	SV1	SV5	SV5	SV5	SV4	SV5 SV6
7	SV1	SV1	SV5	SV4	SV1	SV1		SV4
8			SV4	SV1	SV4	SV4		

Por unanimidade, o sistema de vedação 2 de painel pré-fabricado de alvenaria foi considerada a primeira alternativa a ser escolhida, independente se a prioridade são os critérios econômicos ou os critérios técnicos e de sustentabilidade. Esse resultado expressa o potencial do uso de componentes pré-fabricados na Construção Civil, que garantem uma maior produtividade. Pelo fato desse pré-fabricado ser composto de materiais tradicionais, o seu custo é menor comparado aos sistemas industrializados de steel frame e wood frame e também comparado aos painéis maciços de concreto armado. Vale ressaltar que o custo aqui analisado é o custo de material e mão-de-obra, sendo necessário o estudo do custo dos sistemas de vedação incluindo equipamentos, transporte e geração de resíduos. Apesar do alto índice de emissão de gás carbônico equivalente por m², o painel pré-fabricado de alvenaria consegue fornecer um desempenho térmico padrão com um desempenho acústico de nível superior aos usuários. Como segunda alternativa de escolha, há as opções de vedação com blocos de concreto, painel pré-fabricado de concreto e wood frame. No restante da lista, há divergência entre os decisores sobre qual o melhor sistema de vedação. Para a obtenção de uma só ordenação de alternativas, é utilizado o método ELECTRE IV para a agregação de preferências dos decisores entrevistados.

6.3 Agregação de preferências

Utilizando-se o Quadro 11, fez-se a matriz global de avaliação dos sistemas de vedação, que está no Quadro 12. As alternativas continuam sendo os sistemas de vedação, enquanto os critérios passam a ser os decisores. As performances de avaliação das alternativas

são a sua posição na ordenação obtida no ELECTRE III, ou seja, o valor 1 corresponde ao primeiro lugar, o 2 corresponde ao segundo lugar, e assim, respectivamente. Os sistemas que ficaram empatados receberam a mesma posição.

Quadro 12: Matriz de avaliação global para o ELECTRE IV.

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
SV1	7	7	6	8	7	7	3	5
SV2	1	1	1	1	1	1	1	1
SV3	3	4	2	5	2	4	2	2
SV4	4	6	8	7	8	8	6	7
SV5	6	5	7	6	6	6	5	6
SV6	2	2	4	3	4	5	4	6
SV7	5	3	3	2	3	2	4	3
SV8	5	3	5	4	5	3	5	4

Para a agregação de preferências pelo ELECTRE IV não são considerados pesos, portanto todos os decisores têm a mesma importância. Os limites de indiferença, preferência e veto são considerados iguais a 0 para todos os critérios, pois qualquer diferença de posição das alternativas implica numa preferência estrita. Usando-se o software ELECTRE III/IV tem-se a matriz de credibilidade mostrada na Figura 17.

Figura 17: Matriz de credibilidade das alternativas no ELECTRE IV.

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0	0	0	0	0	0	0
SV2	1	1	1	1	1	1	1	1
SV3	1	0	1	1	1	0	0	0
SV4	0	0	0	1	0	0	0	0
SV5	0	0	0	0.2	1	0	0	0
SV6	0	0	0	1	1	1	0	0
SV7	0.2	0	0	0.2	1	0	1	1
SV8	0.2	0	0	0.2	1	0	0	1

Pelos índices de credibilidade encontrados, observa-se que não há relação de dominância entre algumas alternativas ($\sigma = 0$), nos casos onde $\sigma = 0,2$ há a relação de veto-dominância e quando $\sigma = 1$ há a quase-dominância. O sistema de vedação 2, painel pré-fabricado de alvenaria domina sobre todas as outras alternativas, enquanto o segundo que mais

domina é o SV3 com blocos de concreto. A ordenação de todas as alternativas após a aplicação do ELECTRE IV pode ser observada no Quadro 13.

Quadro 13: Pré-ordem completa das alternativas no ELECTRE IV.

Ordem	Alternativa
1	SV2
2	SV3
3	SV6
	SV7
4	SV8
5	SV1
6	SV5
7	SV4

Como analisado na matriz de credibilidade, o sistema de vedação com maior desempenho e melhor custo benefício é o sistema de painel pré-fabricado de alvenaria. O sistema de vedação com blocos de concreto em alvenaria estrutural fica em segundo lugar, devido ao baixo preço comparado ao sistema tradicional, apesar de não alcançar uma produtividade tão expressiva quantos os pré-fabricados.

Em terceiro lugar, estão o painel pré-fabricado de concreto, também com baixo custo comparado ao sistema tradicional, alta produtividade, porém com desempenho térmico ruim e o sistema de placas delgadas com wood frame, que apesar do alto custo, fornece ótimos índices de desempenho térmico, acústico e produtividade comparados a alvenaria tradicional. O sistema de placas delgadas com steel frame vem logo em seguida com as mesmas características de avaliação do sistema de wood frame. E por último, estão a alvenaria tradicional, o sistema de paredes moldadas no local e o painel arquitetônico.

6.4 Análise de sensibilidade

Para a verificação do grau de estabilidade das alternativas, foi realizada a análise de sensibilidade para o ELECTRE IV, analisando-se mais dois cenários de possibilidades, o Cenário 2 e o Cenário 3. As condições estabelecidas na ordenação principal formam o Cenário 1. Os parâmetros adotados para cada cenário estão mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros adotados em cada cenário.

Cenários	Limite de indiferença (q)	Limite de preferência (p)
Cenário 1	0	0
Cenário 2	0	1
Cenário 3	1	2

No Cenário 2, considerou-se o limite de indiferença igual a 0 e o de preferência igual a 1 e no Cenário 3 considerou-se o limite de indiferença igual a 1 e o de preferência igual a 2. Os mesmos limites de indiferença e preferência foram considerados para todos os critérios da matriz de avaliação da Tabela 8 na aplicação do ELECTRE IV para cada cenário. Utilizando-se o software ELECTRE III/IV, obtiveram-se as matrizes de credibilidade, de superação e a ordenação final para cada cenário. Os resultados dos cálculos matriciais da análise de sensibilidade estão nos Apêndices I e J. O Quadro 14 mostra a comparação da ordenação obtida em cada cenário.

Quadro 14: Resultados da análise de sensibilidade no ELECTRE IV.

Ordem	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
1	SV2	SV2	SV2
2	SV3	SV3	SV7
3	SV6 SV7	SV6 SV7	SV3
4	SV8	SV8	SV6
5	SV1	SV1	SV8
6	SV5	SV4	SV1 SV5
7	SV4	SV5	SV4

Pela análise de sensibilidade, nota-se que apesar de diferentes cenários, o sistema de vedação 2, painel pré-fabricado de alvenaria, ainda é o primeiro colocado na ordem dos sistemas de vedação. É possível observar a estabilidade das alternativas, pois a alternativa SV3, vedação com blocos de concreto, continua na mesma posição no cenário 2, indo para o terceiro

lugar no cenário 3 e a as alternativas SV6 e SV7, painel pré-fabricado de concreto e wood frame, continuam entre os quatro primeiros colocados nos dois cenários analisados.

Com os resultados finais da aplicação numérica, observa-se a necessidade da substituição da alvenaria tradicional por novos métodos construtivos. Mesmo com custo mediano e desempenhos técnicos satisfatórios, a baixa produtividade alcançada nesse sistema é fator suficiente para a busca de novas metodologias construtivas para sistemas de vedação buscando-se sempre a inovação no setor e a melhoria contínua no desempenho das edificações. Por fim, observa-se a validação do modelo proposto com os resultados numéricos da análise de sensibilidade, mostrando a relação dos resultados com o encontrado na literatura acerca dos sistemas de vedação.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como conclusão, observa-se a importância de um modelo sistematizado para a análise comparativa de sistemas de vedações para edificações habitacionais. O modelo foi definido para um prédio de padrão normal multifamiliar na cidade de Fortaleza, mas pode ser replicado para outros tipos de empreendimentos, como habitações de interesse social e também para outros locais, considerando-se as devidas mudanças nos fatores considerados. Os critérios de avaliação incluídos no modelo são representativos das dimensões técnicas, ambientais e econômicas, representando em cinco fatores: desempenho térmico, desempenho acústico, emissão de gás carbônico equivalente, custo e produtividade, os principais fatores que influenciam na construção de um empreendimento que satisfaça aos requisitos dos usuários de forma sustentável, permitindo a integração dos desejos de todos os atores envolvidos na questão da habitação.

Com esta pesquisa, também é notada a importância de uma decisão em grupo para a tomada de decisão acerca de um sistema de vedação utilizado. As habitações impactam diretamente a vida de várias pessoas, têm valor relativamente alto e são bens de longo prazo, sendo muitas vezes adquiridas apenas uma vez por uma família. Foi identificado que a preferência de um construtor é relacionada preferencialmente aos critérios econômicos, pois impactam diretamente na rentabilidade do seu negócio, enquanto a visão de um especialista busca equalizar as preferências de forma a pôr em destaque o conforto do usuário e também a sustentabilidade. O modelo inclui as diferentes visões para a escolha de sistema de vedação de habitações incluindo as preferências dos dois grupos analisados.

A aplicação numérica mostra a coerência dos resultados encontrados com o modelo formulado com os métodos ELECTRE III e ELECTRE IV, indicando dentre as alternativas potenciais para sistema de vedação o painel pré-fabricado de alvenaria como a melhor opção para um desempenho térmico e acústico com nível de desempenho superior para o usuário e custo e produtividade otimizados. O resultado do modelo mostra a tendência da utilização de pré-fabricados na Construção Civil como alternativa de inovação aos processos tradicionais e da utilização de materiais com melhor controle de qualidade.

Dentro do tema estudado, pode-se indicar como sugestões de estudos futuros, o estudo do custo dos sistemas de vedação incluindo equipamentos, transporte, geração de resíduos durante a construção de uma obra para a mensuração de um custo mais próximo ao real, pois cada sistema de vedação pode utilizar equipamentos diferentes, ter distâncias de transportes diferentes dependendo do local da fábrica, além do custo com o descarte de resíduos

ou possibilidade de reaproveitamento, o que pode impactar diretamente na viabilidade do negócio. Também se indica o estudo de novos sistemas construtivos que atendam aos requisitos dos usuários e sejam mais sustentáveis, com a adição de resíduos ou utilização de materiais menos poluentes.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, L. H.; ALMEIDA, A. T. de; MORAIS, D. C. A multicriteria group decision model aggregating the preferences of decision-makers based on electre methods. **Pesquisa Operacional**, v. 30, n. 3, p. 687–702, 2010.

ASDRUBALI, F. et al. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. **Building and Environment**, v. 114, p. 307–332, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12721**: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **ABNT NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **ABNT NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **ABNT NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.

_____. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.

_____. **ABNT NBR 15575-4**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013b.

_____. **ABNT NBR 14037**: Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações – Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **ABNT NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **ABNT NBR 9442**: Materiais de construção – Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **ABNT NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **ABNT NBR 5674**: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DRYWALL. **Desempenho acústico em sistemas drywall**. 2 ed. São Paulo, 2015.

ATTALLAH, S. O. et al. Multicriteria Decision-Making Methodology for Credit Selection in Building Sustainability Rating Systems. **Journal of Architectural Engineering**, v. 23, n. 2, p. 4017004, jun. 2017.

BANA E COSTA, C. Introdução geral às abordagens multicritério de apoio à tomada de decisão. **Investigação Operacional**, v. 8, n. 1, p. 117–139, 1988.

BAGLIVO, C.; CONGEDO, P. M.; FAZIO, A. Multi-criteria optimization analysis of external walls according to ITACA protocol for zero energy buildings in the mediterranean climate. **Building and Environment**, v. 82, p. 467–480, 1 dez. 2014.

BALALI, V.; ZAHRAIE, B.; ROOZBAHANI, A. Integration of ELECTRE III and PROMETHEE II Decision-Making Methods with an Interval Approach: Application in Selection of Appropriate Structural Systems. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 28, n. 2, p. 297–314, mar. 2014.

BARBOSA, S. A. *et al.* Método de utilização do programa Energyplus para verificação de desempenho térmico de ambientes com fachadas duplas. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 121–134, 2013.

BERNARDO, H.; GASPAR, A.; ANTUNES, C. H. An application of a multi-criteria decision support system to assess energy performance of school buildings. **Energy Procedia**, v. 122, p. 667–672, 2017.

BERNASCONI, M.; CHOIRAT, C.; SERI, R. The Analytic Hierarchy Process and the Theory of Measurement. **Management Science**, v. 56, n. 4, p. 699–711, 2010.

BOLINA, F. et al. Comparison of the Fire Resistance of two Structural Wall Systems in Light Steel Framing. **DYNA**, v. 84, n. 201, p. 123-128, 26 maio 2017.

BORGES, C. A. de M. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The Promethee method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, n. 2, p. 228–238, 1986.

BRASIL. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. Desempenho energético operacional em edificações. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID={82BBD82C-FB89-48CA-98A9-620D5F9DBD04}>>. Acesso em: 26 nov. 2017.

BROWN, C. The power of qualitative data in post-occupancy evaluations of residential high-rise buildings. **Journal of Housing and the Built Environment**, v. 31, n. 4, p. 605–620, 2016.

CAMPOS, V. R. **Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos em saneamento**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CARDINALE, T. et al. Thermal and mechanical characterization of panels made by cement mortar and sheep's wool fibres. **Energy Procedia**, v. 140, p. 159–169, dez. 2017.

CARLSSON, C. Tackling an MCDM-problem with the help of some results from fuzzy set theory. **European Journal of Operational Research**, v. 10, n. 3, p. 270–281, 1 jul. 1982.

CARLUCCI, S.; PAGLIANO, L. A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. **Energy and Buildings**, v. 53, p. 194–205, 2012.

CAVDAR, A. D. et al. Cement type composite panels manufactured using paper mill sludge as filler. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 410–416, 1 jul. 2017.

CESAR, C. G. **Desempenho estrutural de painéis pré-fabricados com blocos cerâmicos**. 219 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

CHO, K.; SHIN, Y.-S.; KIM, T. Effects of half-precast concrete slab system on construction productivity. **Sustainability**, v. 9, n.7, p. 1268, 19 jul. 2017.

CRUZ, H. M.; SANTOS, D. de G.; MENDES, L. A. Causas da variabilidade do tempo de execução dos processos em diferentes sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 49–65, 2018.

DELGARM, N.; SAJADI, B.; DELGARM, S. Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC). **Energy and Buildings**, v. 131, p. 42–53, 1 nov. 2016.

DIAS, J. A.; FIGUEIRA, J. R.; ROY, B. **The software ELECTRE III-IV: methodology and user manual (version 3.x)**. Paris: University Paris-Dauphine (LAMSADE), 2006.

EASTMAN, C. M.; SACKS, R. Relative Productivity in the AEC Industries in the United States for On-Site and Off-Site Activities. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 134, n. 7, p. 517–526, jul. 2008.

EVERETT, J. G.; KELLY, D. L. Drywall Joint Finishing: Productivity and Ergonomics. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 124, n. 5, p. 347–353, set. 1998.

FERRO, F. S. et al. Environmental aspects of Oriented Strand Boards production. A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 710-719, fev. 2018.

FIGUEIRA, J. R. et al. An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 20, n. 1–2, p. 61–85, 1 jan. 2013.

FIGUEIRA, J.; ROY, B. Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods

with a revised Simos' procedure. **European Journal of Operational Research**, v. 139, n. 1, p. 317–326, 2002.

GOMES, L. F. A. M. **Teoria da Decisão**. São Paulo: Cengage, 2007.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. São Paulo: Atlas, 2014.

GOVINDAN, K.; JEPSEN, M. B. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 250, n. 1, p. 1–29, 1 abr. 2016.

HAN, J.; CHEN, D.; WANG, X. Multi-criteria heatwave vulnerability assessment of residential wall systems. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 373–383, 1 nov. 2013.

HAVEL, G. Building Construction: Lightweight Steel Framing. **Fire Engineering**, v. 161, n. 1, p. 83–92, 2008.

HENRIQUES, J. et al. Structural performance of light steel framing panels using screw connections subjected to lateral loading. **Thin-Walled Structures**, v. 121, p. 67–88, 1 dez. 2017.

HOPFE, C. J.; AUGENBROE, G. L. M.; HENSEN, J. L. M. Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment. **Building and Environment**, v. 69, p. 81–90, 1 nov. 2013.

IOANNOU, A.; ITARD, L. C. M. Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy. **Energy and Buildings**, v. 92, p. 216–233, 2015.

INSTITUTE FOR MARKET TRANSFORMATION (IMT). **Comparing building energy performance measurement**: A framework for international energy efficiency assessment systems. Washington, 2013. 39 p. Disponível em: <<https://www.buildingrating.org/document/comparing-building-energy-performance-measurement>>. Acesso em: 26 nov. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Documento de Avaliação Técnica nº 002. São Paulo, 2010.

_____. Documento de Avaliação Técnica nº 014 A. São Paulo, 2015a.

_____. Documento de Avaliação Técnica nº 003 B. São Paulo, 2015b.

INSTITUTO FALCÃO BAUER DA QUALIDADE (IFBQ). Documento de Avaliação Técnica nº 021 A. São Paulo, 2016.

_____. Documento de Avaliação Técnica nº 020 C. São Paulo, 2017.

ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 11, p. 14336–14345, 2011.

JANDA, K. B. Buildings don't use energy: people do. **Architectural Science Review**, v. 54, n. 1, p. 15-22, 2011.

JATO-ESPINO, D. et al. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. **Automation in Construction**, v. 45, p. 151–162, 1 set. 2014.

JIA, B.; KIM, S.; NUSSBAUM, M. A. An EMG-based model to estimate lumbar muscle forces and spinal loads during complex, high-effort tasks: Development and application to residential construction using prefabricated walls. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 41, n. 5, p. 437–446, 2011.

KABAK, M. et al. A fuzzy multi-criteria decision making approach to assess building energy performance. **Energy and Buildings**, v. 72, p. 382–389, 1 abr. 2014.

KANG, J. et al. Effect of Wall Thickness on Thermal Behaviors of RC Walls Under Fire Conditions. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, p. 19–31, 2 set. 2016.

KHORAMI, M. et al. Utilisation of waste cardboard and Nano silica fume in the production of fibre cement board reinforced by glass fibres. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 746–755, 15 out. 2017.

KUO, T. A modified TOPSIS with a different ranking index. **European Journal of Operational Research**, v. 260, n. 1, p. 152–160, 2017.

MARTABID, J. E.; MOURGUES, C. Criteria Used for Selecting Envelope Wall Systems in Chilean Residential Projects. **Journal of construction engineering and management**, v. 141, p. 1–12, 2015.

MARTINEZ, R. G.; AYUCAR, J. B.; GOIKOLEA, B. A. Full scale experimental performance assessment of a prefabricated timber panel for the energy retrofitting of multi-rise buildings. **Energy Procedia**, v. 122, p. 3–8, 1 set. 2017.

MARZOUK, M.; AMER, O.; EL-SAID, M. Feasibility study of industrial projects using Simos' procedure. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 19, n. 1, p. 59–68, 2013.

MARZOUK, M. M. ELECTRE III model for value engineering applications. **Automation in Construction**, v. 20, n. 5, p. 596–600, 2011.

MATHEUS, C. *et al.* Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 71–81, 2016.

MATSUMOTO, T. et al. Development of multiple drywall with high sound insulation performance. **Applied Acoustics**, v. 67, n. 6, p. 595–608, 1 jun. 2006.

MELO, C. E. E. (Org.). **Manual munte de projetos em pré-fabricados de concreto**. São Paulo: Pini, 2004.

- MENEZES, A. C. *et al.* Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap. **Applied Energy**, v. 97, p. 355–364, 2012.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional da Habitação. **Portaria nº 345, de 3 de agosto de 2007**, alterada pela Portaria nº 550, de 11 de novembro de 2016. Brasília, 2016a.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Habitação. **Portaria nº 110, de 5 de março de 2015**. Brasília, 2016b.
- MULLENS, M. A.; ARIF, M. Structural Insulated Panels: Impact on the Residential Construction Process. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 132, n. 7, p. 786–794, jul. 2006.
- NISHIMURA, T. Chipboard, oriented strand board (OSB) and structural composite lumber. In: **Wood Composites**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 103–121.
- NGO, T. *et al.* Testing of normal-and high-strength concrete walls subjected to both standard and hydrocarbon fires. **ACI Structural Journal**. v. 110, n. 3, p. 503–510, maio 2013.
- OLIVEIRA, M. M. **Como fazer pesquisa qualitativa**. Petrópolis, Vozes, 2007.
- OLIVEIRA, R. D. *et al.* Concrete Walls Thermal Performance Analysis by Brazilian Standards. **Energy Procedia**, v. 78, p. 213–218, 1 nov. 2015.
- OPRICOVIC, S.; TZENG, G. H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. **European Journal of Operational Research**, v. 156, n. 2, p. 445–455, 2004.
- PAUL, S.; RADAVELLI, G. F.; SILVA, A. R. da. Experimental evaluation of sound insulation of light steel frame facades that use horizontal inter-stud stiffeners and different lining materials. **Building and Environment**, v. 94, p. 829–839, 2015.
- PISELLO, A. L. *et al.* Network of buildings' impact on indoor thermal performance. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 1, n. 1, p. 73–86, 2012.
- RIBAS, R. A. de J.; SOUZA, H. A. Acoustical and thermal performance of multilayer closing panels used in steel-structured buildings. **REM - International Engineering Journal**, v. 70, n. 2, p. 149–156, jun. 2017.
- ROY, B. The outranking approach and the foundations of electre methods. **Theory and Decision**, v. 31, n. 1, p. 49–73, jul. 1991.
- ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Springer, v. 12, 1996.
- SAATY, T. L. Highlights and critical points in the theory and application of the Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v. 74, n. 3, p. 426–447, 1994.
- SABAPATHY, A.; MAITHEL, S. A Multi-Criteria Decision Analysis based assessment of

walling materials in India. **Building and Environment**, v. 64, p. 107–117, 1 jun. 2013.

SANTOS, F. A. dos; CARVALHO, M. C. R. de; ROMAN, H. R. Architectural conception and design in structural masonry: some practices to improve constructability. **International Journal for Housing Science**, v. 33, n. 1, p. 57–67, 2009.

SHEWCHUK, J. P.; GUO, C. Panel Stacking, Panel Sequencing, and Stack Locating in Residential Construction: Lean Approach. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 138, n. 9, p. 1006–1016, set. 2012.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 270–286, 15 set. 2016.

SMITH, J. E.; WINTERFELDT, D. V.; SMITH, J. E. Decision Analysis in Management Science. **Management Science**, v. 50, n. 5, p. 561–574, 2004.

SOEBARTO, V. I.; WILLIAMSON, T. J. Multi-Criteria Assessment of Building Performance: Theory and Implementation. **Building and Environment**, v. 36, n. 6, p. 681–690, 2001.

SOUSA, A. V. S. e; SILVA; J. A. R. M. da. (Coord.). **Manual de alvenaria de tijolo**. Coimbra: Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica, 2000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza, 2013.

VINCKE, P. **Multicriteria Decision-Aid**. Bruxelles: Wiley, 1992.

WANG, E. et al. Multi-criteria building energy performance benchmarking through variable clustering based compromise TOPSIS with objective entropy weighting. **Energy**, v. 125, p. 197–210, 15 abr. 2017.

WIECEK, M. M. et al. Multiple criteria decision making for engineering. **Omega**, v. 36, n. 3, p. 337–339, 1 jun. 2008.

WILDE, P de. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. **Automation in Construction**, v. 41, p. 40–49, 2014.

YU, H. et al. Sustainable precast concrete foundation system for residential construction. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 35, n. 2, p. 190-199, 2008.

YU, Z.; FAN, M. Short- and long-term performance of wood based panel products subjected to various stress modes. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 652–660, 2017.

**APÊNDICE A – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA
O DECISOR 1**

Pesos normalizados ($w = 2$ e $z = 10$) para D1

Nível	Critério	Pesos normalizados $k*_i$	Pesos normalizados k''_i com $w=2$	Razão d_i	Razão \bar{d}_i	Pesos normalizados k_i (corrigido)
1	C1	0,578453	0,58	0,019962	-0,002675	0,59
2	C2	6,290672	6,29	0,001483	0,000107	6,28
3	C3	12,002892	12,00	0,000592	0,000241	12,00
4	C5	34,851772	34,85	0,000236	0,000051	34,85
5	C4	46,276211	46,28	0,000298	-0,000082	46,28

Matriz de credibilidade para D1

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0	0.37	0	0.71	0.16	0	0.15
SV2	1	1	0.82	1	0.94	0.97	0.82	0.82
SV3	0.99	0	1	0	0.95	0.72	0	0.54
SV4	0.41	0.39	0.35	1	0.47	0.51	0.81	0.81
SV5	0.87	0	0.78	0.74	1	0.77	0.61	0.69
SV6	0.87	0.71	0.81	0.98	0.97	1	0.81	0.81
SV7	0.54	0.5	0.54	0.54	0.54	0.54	1	0.71
SV8	0.53	0.37	0.54	0.86	0.54	0.54	0.87	1

Matriz de superação para D1

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P ⁻	I	P	P	P ⁻	P	P
SV4	P	P ⁻	P ⁻	I	R	P ⁻	R	R
SV5	P	P ⁻	P ⁻	R	I	P ⁻	R	R
SV6	P	P ⁻	P	P	P	I	P	P
SV7	P	P ⁻	P ⁻	R	R	P ⁻	I	I
SV8	P	P ⁻	P ⁻	R	R	P ⁻	I	I

**APÊNDICE B – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA
O DECISOR 2**

Pesos normalizados ($w = 2$ e $z = 5$) para D2

Nível	Critério	Pesos normalizados k^*_i	Pesos normalizados k''_i com $w=2$	Razão d_i	Razão \bar{d}_i	Pesos normalizados k_i (corrigido)
1	C3	1,904762	1,90	0,005250	0,000000	1,90
2	C1	10,952381	10,95	0,000913	0,000000	10,95
3	C2	20,000000	20,00	0,000500	0,000000	20,00
4	C5	29,047619	29,05	0,000344	0,000000	29,05
5	C4	38,095238	38,10	0,000263	0,000000	38,10

Matriz de credibilidade para D2

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0.13	0.11	0.51	0.13	0.13	0.49	0.49
SV2	1	1	0.78	1	0.8	0.8	0.78	0.78
SV3	0.89	0.22	1	0.71	0.71	0.33	0.58	0.49
SV4	0.49	0.2	0.29	1	0.42	0.42	0.67	0.67
SV5	0.87	0.2	0.29	0.71	1	0.33	0.38	0.38
SV6	0.87	0.2	0.67	0.71	0.8	1	0.38	0.67
SV7	0.62	0.33	0.62	0.33	0.62	0.62	1	0.42
SV8	0.51	0.22	0.62	0.33	0.62	0.62	0.58	1

Matriz de superação para D2

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P'	P'	P'	P'	P'	P'	P'
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P'	I	P	P	P'	R	R
SV4	P	P'	P'	I	P'	P'	R	R
SV5	P	P'	P'	P	I	P'	R	R
SV6	P	P'	P	P	P	I	R	R
SV7	P	P'	R	R	R	R	I	I
SV8	P	P'	R	R	R	R	I	I

**APÊNDICE C – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA
O DECISOR 3**

Pesos normalizados (w = 2 e z = 4) para D3

Nível	Critério	Pesos normalizados $k*_i$	Pesos normalizados k''_i com w=2	Razão d_i	Razão \bar{d}_i	Pesos normalizados k_i (corrigido)
1	C3	3,260870	3,26	0,002800	0,000267	3,26
2	C1	15,217391	15,22	0,000829	-0,000171	15,22
2	C2	15,217391	15,22	0,000829	-0,000171	15,22
3	C5	27,173913	27,17	0,000224	0,000144	27,17
4	C4	39,130435	39,13	0,000244	0,000011	39,13

Matriz de credibilidade para D3

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0	0	0	0	0	0	0
SV2	1	1	0.81	1	1	1	0.81	0
SV3	0.85	0	1	0	0.84	0.73	0	0.68
SV4	0.42	0.31	0.27	1	0.61	0.61	0.66	0
SV5	0.81	0	0.42	0.73	1	0.34	0.54	0.39
SV6	0.81	0.54	0.81	0.88	1	1	0.73	0
SV7	0.61	0.46	0.61	0.61	0.61	0.61	1	0.61
SV8	0.46	0.18	0.61	0.49	0.61	0.61	0.73	1

Matriz de superação para D3

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P'	P'	R	R	P'	P'	P'
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P'	I	P	P	R	R	R
SV4	R	P'	P'	I	P'	P'	P'	P'
SV5	R	P'	P'	P	I	P'	R	R
SV6	P	P'	R	P	P	I	R	R
SV7	P	P'	R	P	R	R	I	R
SV8	P	P'	R	P	R	R	R	I

**APÊNDICE D – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA
O DECISOR 4**

Pesos normalizados ($w = 2$ e $z = 4$) para D4

Nível	Critério	Pesos normalizados k^*_i	Pesos normalizados k''_i com $w=2$	Razão d_i	Razão \tilde{d}_i	Pesos normalizados k_i (corrigido)
1	C3	1,612903	1,61	0,004400	0,001800	1,61
2	C1	20,000000	20,00	0,000500	0,000000	20,00
2	C2	20,000000	20,00	0,000500	0,000000	20,00
3	C5	26,129032	26,13	0,000420	-0,000037	26,13
4	C4	32,258065	32,26	0,000370	-0,000060	32,26

Matriz de credibilidade para D4

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0	0.2	0	0.14	0	0	0
SV2	1	1	0.78	1	0.8	0.8	0.78	0.78
SV3	0.8	0	1	0	0.74	0.11	0	0.17
SV4	0.46	0.18	0.26	1	0.48	0.48	0.58	0.58
SV5	0.78	0	0.26	0.6	1	0.37	0.12	0.25
SV6	0.78	0.11	0.58	0.74	0.8	1	0.32	0.58
SV7	0.68	0.42	0.68	0.47	0.68	0.68	1	0.48
SV8	0.48	0.12	0.68	0.42	0.68	0.68	0.52	1

Matriz de superação para D4

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P⁻	P⁻	P⁻	P⁻	P⁻	P⁻	P⁻
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P⁻	I	P	P	P⁻	P⁻	P⁻
SV4	P	P⁻	P⁻	I	P⁻	P⁻	P⁻	P⁻
SV5	P	P⁻	P⁻	P	I	P⁻	P⁻	P⁻
SV6	P	P⁻	P	P	P	I	P⁻	R
SV7	P	P⁻	P	P	P	P	I	P
SV8	P	P⁻	P	P	P	R	P⁻	I

**APÊNDICE E – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA
O DECISOR 5**

Pesos normalizados ($w = 2$ e $z = 5$) para D5

Nível	Critério	Pesos normalizados k^*_i	Pesos normalizados k''_i com $w=2$	Razão d_i	Razão \tilde{d}_i	Pesos normalizados k_i (corrigido)
1	C5	1,904762	1,90	0,002750	0,002500	1,90
2	C3	10,952381	10,95	0,000696	0,000217	10,95
3	C4	20,000000	20,00	0,000500	0,000000	20,00
4	C2	29,047619	29,05	0,000426	-0,000082	29,05
5	C1	38,095238	38,10	0,000388	-0,000125	38,10

Matriz de credibilidade para D5

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0.49	0.42	0.69	0.49	0.49	0.58	0.58
SV2	1	1	0.64	1	0.71	0.71	0.6	0.6
SV3	0.62	0.4	1	0.98	0.98	0.78	0.49	0.58
SV4	0.42	0.4	0.04	1	0.51	0.51	0.22	0.22
SV5	0.62	0.4	0.04	0.98	1	0.78	0.2	0.2
SV6	0.62	0.4	0.24	0.98	0.71	1	0.2	0.22
SV7	0.8	0.78	0.8	0.78	0.8	0.8	1	0.51
SV8	0.42	0.4	0.8	0.78	0.8	0.8	0.59	1

Matriz de superação para D5

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P ⁻	P ⁻	P	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P ⁻	I	P	P	P	R	R
SV4	P ⁻	P ⁻	P ⁻	I	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻
SV5	P	P ⁻	P ⁻	P	I	P ⁻	R	R
SV6	P	P ⁻	P ⁻	P	P	I	R	R
SV7	P	P ⁻	R	P	R	R	I	P
SV8	P	P ⁻	R	P	R	R	P ⁻	I

**APÊNDICE F – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA
O DECISOR 6**

Pesos normalizados ($w = 2$ e $z = 4$) para D6

Nível	Critério	Pesos normalizados k^*_i	Pesos normalizados k''_i com $w=2$	Razão d_i	Razão \tilde{d}_i	Pesos normalizados k_i (corrigido)
1	C3	2,631579	2,63	0,003200	0,000600	2,63
2	C5	12,280702	12,28	0,000757	0,000057	12,28
3	C4	21,929825	21,93	0,000464	-0,000008	21,93
4	C1	31,578947	31,58	0,000350	-0,000033	31,58
4	C2	31,578947	31,58	0,000350	-0,000033	31,58

Matriz de credibilidade para D6

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0.34	0.32	0.56	0.34	0.34	0.54	0.54
SV2	1	1	0.66	1	0.68	0.84	0.66	0.66
SV3	0.68	0.34	1	0.88	0.88	0.66	0.54	0.54
SV4	0.44	0.32	0.12	1	0.47	0.62	0.34	0.34
SV5	0.66	0.32	0.28	0.88	1	0.66	0.38	0.22
SV6	0.66	0.32	0.34	0.88	0.84	1	0.22	0.34
SV7	0.78	0.66	0.78	0.66	0.78	0.78	1	0.47
SV8	0.47	0.34	0.78	0.66	0.78	0.78	0.54	1

Matriz de superação para D6

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P ⁻	P ⁻	P	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P ⁻	I	P	P	P	P ⁻	P ⁻
SV4	P ⁻	P ⁻	P ⁻	I	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻
SV5	P	P ⁻	P ⁻	P	I	P ⁻	P ⁻	P ⁻
SV6	P	P ⁻	P ⁻	P	P	I	P ⁻	P ⁻
SV7	P	P ⁻	P	P	P	P	I	P
SV8	P	P ⁻	P	P	P	P	P ⁻	I

**APÊNDICE G – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA
O DECISOR 7**

Pesos normalizados ($w = 2$ e $z = 5$) para D7

Nível	Critério	Pesos normalizados k^*_i	Pesos normalizados k''_i com $w=2$	Razão d_i	Razão \bar{d}_i	Pesos normalizados k_i (corrigido)
1	C5	1,904762	1,90	0,002750	0,002500	1,90
2	C3	10,952381	10,95	0,000696	0,000217	10,95
3	C2	20,000000	20,00	0,000500	0,000000	20,00
4	C1	29,047619	29,05	0,000426	-0,000082	29,05
5	C4	38,095238	38,10	0,000388	-0,000125	38,10

Matriz de credibilidade para D7

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0.4	0.29	0.78	0.4	0.4	0.67	0.67
SV2	1	1	0.8	1	0.94	0.97	0.8	0.75
SV3	0.71	0.22	1	0.98	0.98	0.6	0.58	0.81
SV4	0	0	0.13	1	0.56	0.59	0	0.46
SV5	0	0	0.19	0.98	1	0.6	0	0.5
SV6	0	0	0.54	0.98	0.97	1	0	0.49
SV7	0.62	0.6	0.62	0.6	0.62	0.62	1	0.56
SV8	0.25	0.22	0.62	0.6	0.62	0.62	0.58	1

Matriz de superação para D7

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P ⁻	P ⁻	P	R	R	R	R
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P ⁻	I	P	P	P	P	P
SV4	P ⁻	P ⁻	P ⁻	I	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻
SV5	R	P ⁻	P ⁻	P	I	P ⁻	R	R
SV6	R	P ⁻	P ⁻	P	P	I	R	R
SV7	R	P ⁻	P ⁻	P	R	R	I	P
SV8	R	P ⁻	P ⁻	P	R	R	P ⁻	I

APÊNDICE H – RESULTADOS DO MÉTODO DAS CARTAS E ELECTRE III PARA O DECISOR 8

Pesos normalizados ($w = 1$ e $z = 7$) para D8

Nível	Critério	Pesos normalizados k^*_i	Pesos normalizados k''_i com $w=1$	Razão d_i	Razão \bar{d}_i	Pesos normalizados k_i (corrigido)
1	C5	0,874636	0,9	0,143333	-0,029000	0,9
2	C2	12,827988	12,8	0,005614	0,002182	12,8
3	C3	18,804665	18,8	0,005070	0,000248	18,8
4	C4	30,758017	30,8	0,004616	-0,001365	30,8
5	C1	36,734694	36,7	0,001778	0,000944	36,7

Matriz de credibilidade para D8

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0	0.35	0.86	0.74	0.62	0	0
SV2	1	1	0.76	1	0.96	0.98	0	0.15
SV3	0.63	0.11	1	0.99	1	0.96	0.19	0.77
SV4	0	0	0.027	1	0.66	0.67	0	0
SV5	0	0	0.33	0.99	1	0.87	0	0
SV6	0	0	0.41	1	0.98	1	0	0
SV7	0.5	0	0	0.69	0	0	1	0.78
SV8	0.2	0	0.37	0.87	0.69	0.25	0.4	1

Matriz de superação para D8

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P ⁻	P ⁻	P	P	P	R	R
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P ⁻	I	P	P	P	R	P
SV4	P ⁻	P ⁻	P ⁻	I	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P ⁻
SV5	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P	I	I	R	P ⁻
SV6	P ⁻	P ⁻	P ⁻	P	I	I	R	P ⁻
SV7	R	P ⁻	R	P	R	R	I	R
SV8	R	P ⁻	P ⁻	P	P	P	R	I

APÊNDICE I – RESULTADOS DO ELECTRE IV PARA O CENÁRIO 2

Matriz de credibilidade no cenário 2

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0	0	0	0	0	0	0
SV2	1	1	1	1	1	1	1	1
SV3	1	0	1	1	1	0	0	0.8
SV4	0	0	0	1	0	0	0	0
SV5	0	0	0	0	1	0	0	0
SV6	0.8	0	0	1	1	1	0	0
SV7	0.8	0	0	0.8	1	0	1	1
SV8	0.2	0	0	0.8	1	0	0	1

Matriz de superação no cenário 2

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P⁻	P⁻	P	P	P⁻	P⁻	P⁻
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P⁻	I	P	P	P	P	P
SV4	P⁻	P⁻	P⁻	I	P	P⁻	P⁻	P⁻
SV5	P⁻	P⁻	P⁻	P⁻	I	P⁻	P⁻	P⁻
SV6	P	P⁻	P⁻	P	P	I	I	P
SV7	P	P⁻	P⁻	P	P	I	I	P
SV8	P	P⁻	P⁻	P	P	P⁻	P⁻	I

APÊNDICE J – RESULTADOS DO ELECTRE IV PARA O CENÁRIO 3

Matriz de credibilidade no cenário 3

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	1	0	0	0	0.4	0	0	0
SV2	1	1	1	1	1	1	1	1
SV3	1	0	1	1	1	0.6	0	1
SV4	0	0	0	1	0.4	0	0	0
SV5	0.6	0	0	0.6	1	0	0	0
SV6	1	0	0	1	1	1	0	0.4
SV7	1	0	0.6	1	1	0	1	1
SV8	0.8	0	0	1	1	0	0.4	1

Matriz de superação no cenário 3

	SV1	SV2	SV3	SV4	SV5	SV6	SV7	SV8
SV1	I	P⁻	P⁻	P	R	P⁻	P⁻	P⁻
SV2	P	I	P	P	P	P	P	P
SV3	P	P⁻	I	P	P	P	P⁻	P
SV4	P⁻	P⁻	P⁻	I	P⁻	P⁻	P⁻	P⁻
SV5	R	P⁻	P⁻	P	I	P⁻	P⁻	P⁻
SV6	P	P⁻	P⁻	P	P	I	P⁻	P
SV7	P	P⁻	P	P	P	P	I	P
SV8	P	P⁻	P⁻	P	P	P⁻	P⁻	I