

**COMO MELHORAR O CONFORTO DO USUÁRIO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO:
MODELO PARA SELEÇÃO DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM HABITAÇÕES
DE INTERESSE SOCIAL**
**HOW TO IMPROVE USER COMFORT IN CONSTRUCTED ENVIRONMENT:
SELECTION MODEL OF BUILDING SYSTEMS FOR SOCIAL HOUSING**

Stefanie Almeida Campos* E-mail: stefaniealmeidac@gmail.com
Francisco Regis Ribeiro Felix* E-mail: engenheiroregis@hotmail.com
Alexandre Araujo Bertini* E-mail: bertini@ufc.br
Vanessa Ribeiro Campos* E-mail: vanessa.campos@ufc.br

*Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE

Resumo: A escolha do sistema construtivo utilizado influencia no conforto do usuário, na quantidade de energia consumida e na viabilidade econômica do empreendimento. A construção civil carece de ferramentas modernas em seus processos de gestão, sendo necessário o desenvolvimento de metodologias que cooperem com o melhor planejamento do projeto. Devido a isto, este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de tomada de decisão para a seleção de um sistema construtivo destinado à habitação de interesse social. Foram realizadas entrevistas com especialistas em construção para a consolidação dos critérios de avaliação mais importantes, obtenção das preferências e performances das alternativas. Como resultados, foram definidos como critérios importantes: custo, produtividade, satisfação com fornecedor, resíduos gerados, isolamento térmico e acústico. A validação da metodologia proposta foi realizada com a aplicação do método multicritério PROMETHEE II em um projeto-padrão multifamiliar de habitação de interesse social. Os resultados numéricos mostram que a ordem dos sistemas construtivos foi: paredes de concreto, steel frame, alvenaria estrutural e alvenaria tradicional. Por fim, obteve-se um modelo, que pode ser utilizado para diferentes projetos de habitação de interesse social como uma ferramenta útil e simplificada na melhoria do processo de decisão.

Palavras-chave: Tomada de decisão. Sistema construtivo. Habitação de Interesse Social. Conforto do usuário.

Abstract: Used constructive systems choice influences the user's comfort, the amount of energy consumed and enterprise economic viability. Civil construction lacks modern tools in its management processes, being necessary for the development of methodologies that cooperate with the best project planning. Due to this, this study has as objective the development of a decision-making model for the selection of a constructive system destined to social housings. Interviews were conducted with construction specialists to consolidate the most important evaluation criteria, obtaining the preferences and performances of alternatives. As results, important criteria were defined as: cost, productivity, supplier satisfaction, generated waste, thermal and acoustic insulation. The validation of the proposed methodology was carried out with the application of multicriteria method PROMETHEE II in a multifamily standard project of social housing. The numerical results show that the order of constructive systems was: concrete walls, steel frame, structural masonry, and traditional masonry. Finally, a model was obtained, which can be used for different social housing projects as a useful and simplified tool in improving the decision process.

Keywords: Decision-making. Constructive system. Social housing. User comfort.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas construtivos utilizados são responsáveis por 39% da variação no consumo de energia em residências, influenciando mais no consumo energético que as variáveis sociodemográficas, as atitudes e os costumes dos usuários (HUEBNER *et al.*, 2015). Em relação ao consumo energético em habitações de interesse social, também observa-se uma diferença entre o desempenho energético previsto e o medido durante o seu uso (GUPTA; KAPSALI; HOWARD, 2018).

O entendimento das opções de sistemas construtivos existentes é essencial para a indústria entregar habitações que mantenham o desempenho esperado durante o seu ciclo de vida e atinjam a vida útil de projeto (DE WILDE, 2014). Devido a isso, é necessário que a escolha de um sistema construtivo para habitações ocorra logo na fase de projeto, com a análise necessária relacionada ao atendimento às necessidades dos usuários.

A gestão de projetos de ambientes construídos tem dificuldades a serem superadas, como o acompanhamento da evolução dos requisitos envolvidos. Nesse sentido, a gestão dos requisitos dos usuários pode contribuir positivamente no planejamento se ocorrer uma adequada estruturação e integração dos requisitos ao longo do desenvolvimento do projeto, principalmente quanto à etapa de identificação das informações de entrada do projeto (PEGORARO; SAURIN; PAULA, 2011). O modelo de tomada de decisão é utilizado para a resolução de problemas de construção, com comprovada eficácia na seleção de alternativas com critérios conflitantes, podendo ser utilizado em diversos campos, como: planejamento, projeto, estradas, edificações, materiais e gestão. Nessa análise é possível a inserção de aspectos ambientais, sociais e econômicos, contribuindo para uma decisão baseada no máximo de fatores envolvidos (JATO-ESPINO *et al.*, 2014). Patzlaff, Kern e González (2010) apresentam a estrutura de um sistema de apoio à decisão baseado em três componentes principais: análise do ciclo de vida, avaliação pós-ocupacional e modelos hedônicos de preços, comprovando o incremento da qualidade da informação utilizada na elaboração do projeto pelo uso de ferramentas tecnológicas e contribuindo para a elaboração de um projeto sustentável. Pelo ponto de vista dos usuários, o atendimento às normas de desempenho e o oferecimento de produto de qualidade podem ser observados pela estética e material da fachada, tipos de janelas dos dormitórios, tamanho dos ambientes, quantidade de banheiros e itens de áreas comuns (ADALBERTO *et al.*, 2007).

Constatada a influência do sistema construtivo no conforto do usuário, esse trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um modelo para a hierarquização de sistemas construtivos para habitações de interesse social com a utilização da metodologia multicritério de tomada de decisão. O modelo busca selecionar sistemas com maior produtividade e menor desperdício de resíduos, contribuindo para uma maior sustentabilidade. A pesquisa objetiva suprir a carência de ferramentas e métodos sistematizados que auxiliem no processo de decisão na construção civil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas construtivos para habitações de interesse social

A construção em alvenaria tradicional se constitui em uma técnica construtiva utilizada desde a antiguidade que vem obtendo significativos desenvolvimentos em seus materiais e componentes. Segundo Gouveia, Lourenço e Vasconcelos (2007) a edificação em alvenaria deve assegurar requisitos de comportamento mecânico adequado quando submetidas às ações, bem como garantir as condições de habitabilidade em relação às exigências térmicas e acústicas.

O desempenho acústico de alvenarias de blocos cerâmicos é fortemente influenciado pela espessura dos revestimentos interno e externo de argamassa aplicado sobre os blocos. Klippel Filho et al. (2018) identifica que incremento de 5 cm de espessura de revestimento proporciona um aumento de até 7 dB no isolamento sonoro da vedação, podendo ser associado o aumento de 1 dB para cada 1 cm de revestimento argamassado adicionado.

A alvenaria estrutural também é uma tecnologia utilizada em habitações, que consiste num sistema constituído de blocos de concreto, onde as paredes da edificação são utilizadas para receber as cargas, em substituição a estrutura de sustentação formada por pilares e vigas empregados no sistema convencional. A resistência à compressão de alvenarias depende dos seguintes fatores: resistência do bloco, o tipo e a resistência da argamassa e a relação altura/espessura da parede (SARHAT; SHERWOOD, 2014). A espessura da junta de argamassa de assentamento também tem influência na resistência da alvenaria estrutural, porém observa-se que há um limite para o aumento da resistência do prisma associado ao

aumento da espessura da junta, sendo observado melhor comportamento quando utilizada uma junta de 10 mm de espessura (CAVALCANTI *et al.*, 2018). 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).

Em habitações de interesse social, também se observa o uso de paredes de concreto, que é um sistema construtivo formado por paredes estruturais maciças, moldadas na obra e armadas com aço. A fundação e as lajes são definidas de acordo com o local da obra e com o tipo de solo. Esse sistema construtivo tem satisfatória resistência ao fogo, segurança estrutural e rigidez, como observa-se em uma parede de concreto armado de 15 cm de espessura que apresenta resistência à compressão aos 28 dias de 30 MPa e resistência ao fogo de 120 minutos (GO *et al.*, 2012; NGO *et al.*, 2013). Quanto ao desempenho acústico, observa-se que em sistemas construtivos rígidos de concreto, o isolamento a ruído de impacto no sistema de pisos é menor que em sistemas em que o piso não é conectado rigidamente às paredes (LEE *et al.*, 2015). Na análise do desempenho térmico, é detectada a variação do conforto proporcionado ao usuário pela variação da espessura do painel monolítico de concreto moldado in loco, dado ao fato que uma maior espessura da vedação implica numa diminuição de trocas de calor entre os ambientes interno e externo (SACHT; ROSSIGNOLO; BUENO, 2011).

Como sistema industrializado em habitações, tem-se o uso do *steel frame* que é formado por perfis de aço estruturados em painéis, vigas, tesouras e outros componentes. O fechamento das vedações é feito com placas de OSB e cimentícias na face externa e placas de gesso na face interna, que podem ser estruturais ou não estruturais. O uso de pré-moldados na construção aumenta a produtividade, independente do elemento substituído, comparado a sistemas construtivos executados dentro do local da obra (EASTMAN; SACKS, 2008). Isso ocorre devido a utilização de sistemas construtivos mais industrializados reduzirem a variabilidade nos processos de baixa qualidade de trabalho, retrabalhos e recebimento atrasado de materiais (CRUZ; SANTOS; MENDES, 2018).

A utilização de *steel frame* na construção de residências tem vantagens, como o baixo peso da estrutura utilizada, redução da espessura dos elementos estruturais, possibilidade de mudança da localização das paredes e uma maior sustentabilidade com a redução dos resíduos gerados (CHENG *et al.*, 2012). O

sistema apresenta a resistência ao fogo mínima requerida de 30 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).

2.2 Métodos de apoio à decisão

Na estruturação de um problema de tomada de decisão é fundamental a definição dos seguintes elementos: tipo de problemática, atores, alternativas e critérios de avaliação. Por fim, monta-se a matriz de decisão que tem como objetivo apresentar na forma de tabela, a relação entre as alternativas e os critérios de avaliação, consistindo no resultado conclusivo da estruturação do problema multicritério (CAMPOS; ALMEIDA, 2006).

O método multicritério conhecido como PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) constitui uma família de métodos da escola francesa e têm como objetivo estabelecer uma relação de sobreclassificação. Utiliza comparações binárias entre as alternativas pela comparação dos desempenhos das ações em todos os critérios e faz uso do conceito de pseudocritério, com a possibilidade de definição de limites de indiferença e de preferência estrita, conforme a preferência do decisor (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

O método PROMETHEE II é utilizado para resolução de problemas de ordenação e encontra como resultado uma pré-ordem completa das alternativas. Para a definição da função de preferência de cada critério, utilizam-se seis tipos de pseudocritérios, também denominados de critérios generalizados, que são: critério usual, quase-critério, critério com preferência linear, critério de nível, critério com preferência linear e área de indiferença e critério gaussiano, sendo os quatro primeiros os mais utilizados. A representação da indiferença ocorre quando o valor da função é igual a 0, já quando a função assume o valor de 0,5 há preferência fraca e só há preferência estrita quando a função assume o valor igual a 1 (BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986).

No critério do tipo I, que é o critério usual, não há definição de parâmetros e a função pode ser representada pela Equação 1.

$$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} = 0 \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

No critério do tipo II (quase-critério), há a definição do limite de indiferença (q) e a função de preferência do critério é definida pela Equação 2.

$$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} \leq q \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > q \end{cases} \quad (2)$$

No critério do tipo III (critério com preferência linear), há a introdução do limite de preferência (p) e a representação da função de preferência é dada pela Equação 3.

$$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} \frac{\delta_{ik}}{p} & \text{se } q < \delta_{ik} \leq p \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > p \end{cases} \quad (3)$$

No critério do tipo IV (critério de nível), a definição do limite de indiferença (q) e do limite de preferência (p) definem zonas de indiferença, preferência fraca e estrita, como explicitado na Equação 4.

$$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} \leq q \\ 0,5 & \text{se } q < \delta_{ik} \leq p \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > p \end{cases} \quad (4)$$

Após a definição da matriz de decisão com os desempenhos das alternativas em relação aos critérios, os pesos e as funções de preferência relativa para cada critério, inicia-se a aplicação do método PROMETHEE II. Calcula-se a diferença de desempenho (δ_{ik}) entre as avaliações das alternativas x_i e x_k , para cada critério j em que uma alternativa supera a outra ($x_i \text{ S } x_k$) com a expressão em módulo da Equação 5.

$$\delta_{ik} = |u_j(x_i) - u_j(x_k)| \quad (5)$$

Procede-se o cálculo da função de preferência relativa, para cada um dos critérios j , através da Equação 6.

$$P_j(x_i, x_k) = P_j(\delta_{ik}) = P_j(|u_j(x_i) - u_j(x_k)|) \quad (6)$$

Após a definição das funções de preferências relativas para os critérios, calculam-se os índices de preferências (s_{ik}) entre as alternativas x_i e x_k pela Equação 7. O índice de preferência mostra a intensidade da preferência da alternativa x_i sobre a alternativa x_k , ao considerar todos os critérios.

$$s_{ik} = \frac{\sum_j w_j P_j(\delta_{ik})}{\sum_j w_j} \quad (7)$$

Onde:

w_j representa os pesos definidos para os critérios;

$P(\delta_{ik})$ são as funções de preferências.

Com os valores dos índices de preferências, calculam-se os fluxos de superação positivos (ϕ_i^+) pela Equação 8 e os fluxos de superação negativos (ϕ_i^-) pela Equação 9, referentes às alternativas x_i . A quantidade de alternativas é representada por m .

$$\phi_i^+ = \frac{1}{m-1} \sum_k S_{ik} \quad (8)$$

$$\phi_i^- = \frac{1}{m-1} \sum_k S_{ki} \quad (9)$$

Por fim, deve-se calcular o fluxo de superação neto (ϕ_i) para as alternativas, que é o resultado da diferença entre os fluxos de superação positivos e negativos representado pela Equação 10. Realiza-se uma ordenação das alternativas em uma

hierarquia de eficiência pela ordem decrescente de valores dos fluxos netos encontrados.

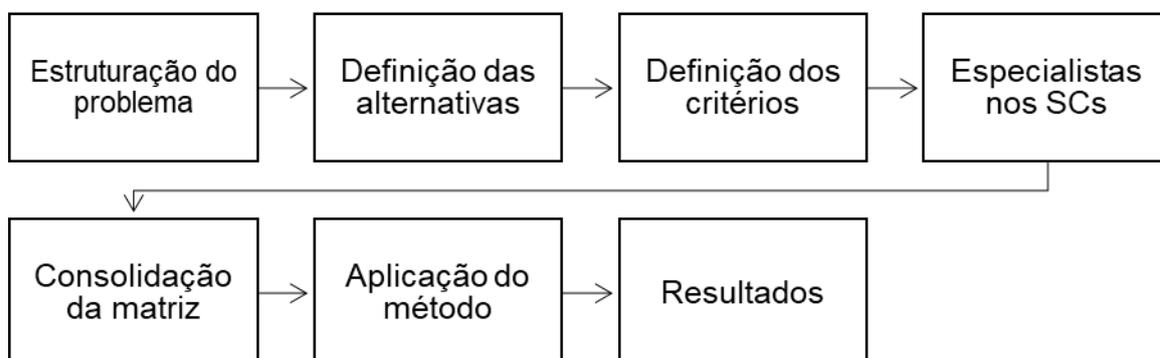
$$\phi_i = \phi_i^+ - \phi_i^- \quad (10)$$

De acordo com Gomes, Gomes e Almeida (2002), ao ser aplicado um método multicritério deve-se proceder uma análise de sensibilidade, com o objetivo de saber como as variações dos parâmetros característicos do método agem sobre os resultados encontrados, possibilitando uma análise da qualidade do modelo. A análise de sensibilidade possibilita que uma solução encontrada em um problema multicritério demonstre: estabilidade fraca, quando a melhor alternativa permanece no conjunto de soluções não dominadas após a mudança de cenários ou estabilidade forte, quando não observada alteração no conjunto de soluções não dominadas após a mudança dos cenários.

3 MÉTODO

Na elaboração do modelo multicritério utilizou-se a revisão bibliográfica acerca dos sistemas construtivos para habitações de interesse social e a teoria multicritério de tomada de decisão. A pesquisa buscou identificar o método matemático mais adequado ao tipo de problema que se deseja resolver, as alternativas e os critérios utilizados no modelo seguindo as etapas apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de pesquisa.



Fonte: Autor (2018).

3.1 Estruturação do problema

A estruturação do problema é composta pela definição da tipologia do empreendimento, dos atores, decisores, escolha do método, definição das alternativas e dos critérios do problema de decisão. As edificações habitacionais podem ser divididas em duas tipologias:

- a) edificações residenciais unifamiliares.
- b) edificações residenciais multifamiliares.

Nesse estudo, adotou-se como edificação padrão uma do tipo multifamiliar, por permitir um maior número de unidades habitacionais por área ocupada de terreno, o que minimiza os custos com infraestrutura e aquisição de terreno. A edificação considerada neste estudo é um bloco de apartamentos destinado à HIS com quatro pavimentos, sendo um térreo e três superiores, constando de quatro apartamentos de 47,30 m² por pavimento e totalizando 16 apartamentos por bloco.

Os atores são os envolvidos de forma direta ou indireta no processo de decisão e que estão interessados no resultado da decisão. Neste estudo os atores são:

- Engenheiros civis com experiência construtiva nos sistemas construtivos utilizados no modelo.
- Gerência de habitação da Caixa Econômica Federal de Fortaleza.
- Consultor da área de acústica que contribuiu com informações sobre sua especialidade no critério de isolamento acústico.

O decisor é o indivíduo ou grupo de indivíduos que emite juízo de valor e faz a tomada de decisão final, sendo representado neste trabalho por um engenheiro especialista, diretor em uma construtora na cidade de Fortaleza e com experiência na construção de edificações destinadas à Habitações de Interesse Social (HIS). Levando-se em consideração o tipo de problemática abordada que é de ordenação das alternativas e as informações intercritério e intracritério, escolheu-se o método PROMETHEE II para a resolução do problema. Este método permite obter como resultado uma pré-ordem completa e não admite a incomparabilidade entre as alternativas, dispondo-as em uma ordenação hierárquica.

3.1.1 Definição das alternativas

Para a definição das alternativas presentes na tomada de decisão, fez-se uma revisão bibliográfica com a identificação dos sistemas construtivos mais utilizados na construção de HIS e foram identificadas quatro alternativas: alvenaria tradicional, alvenaria estrutural, paredes de concreto e *steel frame*.

- Alvenaria tradicional (A1)

Sistema construtivo convencional que utiliza elementos de concreto armado para estruturação e sustentação das edificações verticalizadas, com paredes de fechamento em alvenaria de tijolos cerâmicos. Emprega elementos estruturais como fundações, pilares, vigas e lajes e está fundamentada na produção artesanal com o uso de intensiva mão de obra, reduzida mecanização e elevado desperdício.

- Alvenaria estrutural (A2)

A alvenaria estrutural pode ser desenvolvida com blocos de concreto, proporcionando uma simplificação na concepção do projeto de arquitetura, por consistir em um sistema onde as paredes são utilizadas para receber as cargas da edificação, substituindo a estrutura de sustentação formada por pilares e vigas. Esse sistema possibilita a redução do número de etapas executivas, que pode ocasionar uma redução nos custos da obra em virtude da simplificação das atividades nas fases de estrutura e alvenaria de vedação.

- Paredes de concreto (A3)

Sistema construtivo com paredes estruturais maciças de concreto de 25 MPa de resistência à compressão, moldadas na obra com 10 cm de espessura e armadas com telas metálicas colocadas no centro das paredes. A fundação é definida de acordo com o tipo de solo e as lajes são do tipo maciça em concreto armado com 10 cm de espessura. A cobertura é com estrutura de madeira e telhas cerâmicas.

- Steel frame (A4)

Sistema industrializado de construção à seco formado por painéis estruturais de perfis em aço galvanizado e fechamento em placas de OSB, cimentícias e de gesso. O conforto térmico e acústico das edificações é obtido com o uso de lã de rocha mineral ou lã de vidro, aplicadas no interior dos painéis entre os montantes da edificação.

3.1.2 Definição dos critérios

A definição dos critérios é uma fase importante na estruturação do modelo multicritério, pois reflete as preferências do tomador de decisão e permite a comparação entre as alternativas. Inicialmente, foram pesquisados critérios utilizados em modelos de tomada de decisão de sistemas construtivos para habitações na literatura. O Quadro 1 mostra o levantamento inicial dos critérios conforme o tipo.

Quadro 1 - Critérios para seleção de sistema construtivo para HIS.

Econômico	Custo total; Produtividade; Tempo de execução; Custo mão de obra; Manutenção; Vida útil; Taxa interna de retorno (TIR); Valor presente líquido (VPL)
Técnico	Equipamentos; Fornecedores; Logística; Construtibilidade; Qualidade; Tecnologia; Qualificação profissional; Desempenho do sistema construtivo; Projetos; Térmica; Acústica; Racionalização; Flexibilidade
Segurança	Estrutural; Funcional; Intempéries; Ao fogo; Salubridade; Fenômenos naturais
Ambiental	Volume de resíduos; Reciclagem; Consumo de energia; Recursos naturais; Sustentabilidade

Fonte: Autor (2018).

As adaptações e melhorias no modelo foram feitas por meio das sugestões e críticas apresentadas em entrevistas pelos especialistas em cada sistema construtivo. Assim, os critérios finais foram definidos como: custo, produtividade, satisfação com fornecedor, resíduos gerados, isolamento térmico e isolamento acústico.

Na coleta de dados, cada especialista forneceu os valores dos critérios quantitativos e qualitativos referentes a cada sistema construtivo. No caso dos dados qualitativos, após a coleta dos dados dos especialistas, foi utilizada uma escala numérica para a conversão da escala verbal em valores numéricos.

- Custo (C1)

Refere-se a soma do custo da mão de obra com o dos materiais necessários por metro quadrado de área construída de edificação. É um critério quantitativo, sendo expresso de forma numérica em R\$/m². O objetivo a ser atingido é a minimização dos valores atribuídos aos sistemas construtivos.

- Produtividade (C2)

Esse critério expressa a produtividade média por dia de um operário e tem como objetivo a sua maximização. Pode-se medir de forma objetiva mediante valores numéricos em $m^2/(\text{homem-dia})$. Influencia diretamente no tempo de execução da obra e constitui juntamente com os custos, os fatores considerados mais importantes pelos gestores por sua interferência direta nos resultados financeiros do empreendimento.

- Satisfação com fornecedor (C3)

A relação de satisfação com o fornecedor é um critério que a cada dia assume uma relevância para o bom desempenho de uma obra e tem como objetivo a sua maximização. Esse critério é do tipo qualitativo e de análise subjetiva. Adotou-se uma escala numérica de avaliação das alternativas variando de 10 a 0, com o índice 10 para alta satisfação com fornecedor, 8 para boa satisfação com fornecedor, 7 para média satisfação com fornecedor, 5 para baixa e 0 para nenhuma satisfação.

- Resíduos gerados (C4)

O critério resíduos gerados serve para o decisor avaliar o volume de resíduos produzidos na obra por cada sistema construtivo, independentemente do tipo. É um critério de difícil medição e requer uma análise subjetiva por ser um critério qualitativo. Nesse caso, utilizou-se uma escala numérica para sua avaliação, variando de 0 a 10, com 0 para alto volume elevado de resíduos gerados, 5 para médio volume, 6 para volume entre baixo e médio, 7,5 para baixo e 10 para baixíssimo volume gerado. Os resíduos representam desperdícios de recursos nas obras e ocasionam problemas ambientais, portanto, tem-se como objetivo de satisfação a sua minimização.

- Isolamento térmico (C5)

Esse critério permite ao decisor avaliar a satisfação que as alternativas dos sistemas construtivos para HIS propiciam em termos de conforto térmico. O nível de isolamento térmico nas edificações traduz a qualidade das condições de habitabilidade e o desempenho térmico dos sistemas construtivos, o que garante o bem-estar para seus usuários. É um critério com objetivo de maximização e usou-se uma escala numérica para traduzir a sua análise subjetiva, com 10 para alto isolamento e nível de conforto, 9 para nível bom, 7 para isolamento e conforto

satisfatórios, 5 para isolamento e conforto deficitários e 0 para baixo nível de conforto e isolamento.

- Isolamento acústico (C6)

Esse critério permite ao decisor avaliar a satisfação que as alternativas de sistemas construtivos para HIS proporcionam em termos de conforto acústico. O nível de isolamento acústico nas edificações traduz-se pela qualidade de conforto por evitar a propagação das ondas sonoras, o que gera um bom desempenho dos sistemas construtivos. É um critério com objetivo de maximização e utilizou-se a mesma escala numérica do critério C5.

Com as alternativas de sistemas construtivos para a tipologia de HIS deste estudo, os critérios de avaliação das alternativas e as preferências do decisor obtidas por meio de entrevista, elaborou-se a matriz de avaliação. A matriz de decisão estruturada no problema multicritério desta pesquisa foi definida com quatro sistemas construtivos e seis critérios de decisão.

Após o preenchimento da matriz de decisão, aplicou-se o método multicritério de decisão PROMETHEE II, com o objetivo de fazer uma hierarquia das alternativas. Em seguida, realizou-se a análise de sensibilidade por meio da variação dos pesos atribuídos aos critérios. Com os resultados, elaborou-se as conclusões e recomendações, tendo como objetivo apoiar a tomada de decisão sob o enfoque multicritério para seleção de sistema construtivo voltado para HIS, indicando ao decisor um conjunto de ações e recomendações na busca da solução do problema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizou-se a modelagem de preferências por meio de entrevista com o decisor para a obtenção dos pesos, das funções de preferência relativas e os parâmetros de indiferença ou preferência (quando necessários) para cada critério. Os pesos atribuídos demonstram a importância relativa entre os critérios preferida pelo decisor, que define o maior peso ao critério que julgar mais importante. Os dados obtidos estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelagem de preferência do decisor para o PROMETHEE II

Critério	Objetivo	Função	q	p	Peso
C1. Custo MDO/material	Minimizar	Tipo II	50	-	10
C2. Produtividade por homem	Maximizar	Tipo I	0	1	9

C3. Satisfação com fornecedor	Maximizar	Tipo IV	1	2	8
C4. Resíduos gerados	Maximizar	Tipo II	2	-	3
C5. Isolamento térmico	Maximizar	Tipo II	3	-	7
C6. Isolamento acústico	Maximizar	Tipo II	3	-	4

Observa-se que o decisor considerou os critérios custo de mão de obra/material e de produtividade como os mais importantes, pois atribuiu-lhes os maiores pesos. O critério menos importante na preferência do decisor para a escolha de um sistema construtivo para habitações de interesse social é o de resíduos gerados e o segundo critério considerado menos importante é o isolamento acústico. Ainda com os dados obtidos nas entrevistas, elaborou-se a matriz de decisão com os valores da avaliação da performance de cada alternativa em cada um dos critérios. A matriz de decisão final encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de avaliação numérica dos sistemas construtivos para HIS

Alternativas	Critérios					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	1.694,00	12	5	0	7	7
A2	1.355,00	8,4	8	5	7	7
A3	1.420,00	20	7	7,5	5	9
A4	1.907,00	20	8	10	10	10

Quanto ao custo, observa-se que o sistema mais caro é o sistema industrializado, que é o steel frame, porém o sistema tradicional que é bastante artesanal também apresenta um valor alto comparado as alternativas de paredes de concreto e alvenaria estrutural. Na análise da produtividade, o sistema de steel frame apresenta a maior quantidade de serviço realizada por um homem em um dia, juntamente com o sistema de paredes de concreto, que têm essa alta produtividade devido ao fato de a vedação ser executada com o mesmo processo construtivo da estrutura. Nos critérios de satisfação com o fornecedor e resíduos gerados, a alvenaria tradicional recebeu a menor nota, reafirmando a necessidade de mudança no sistema construtivo utilizado atualmente. Em mais um critério, o sistema de steel

frame recebeu a melhor avaliação, tendo a melhor satisfação com o fornecedor e o menor volume de resíduos gerados entre as alternativas avaliadas. Quanto ao isolamento térmico, as paredes de concreto apresentam o pior desempenho e quanto ao isolamento acústico, as alternativas de alvenaria estrutural e tradicional têm juntas o pior desempenho. O sistema de steel frame, apesar do alto preço, é o sistema com melhor desempenho térmico e acústico ofertado ao usuário.

Para a resolução do problema de tomada de decisão, calculou-se a diferença de desempenho (δ_{ik}) entre todas as alternativas x_i e x_k para cada critério j , onde uma alternativa supera a outra ($x_i S x_k$) pela Equação 5. Em seguida, calculou-se a função de preferência relativa para cada um dos critérios, conforme os parâmetros e os pesos definidos pelo agente de decisão da Tabela 1, relativa à modelagem de preferência do decisor. Os pesos foram normalizados, dividindo-se cada um pelo somatório total dos pesos. Após a definição das funções de preferências relativas para todos os critérios, calcularam-se os índices de preferências (s_{ik}) entre as alternativas do modelo com a Equação 7.

Com os valores dos índices de preferências, foram encontrados os fluxos de superação positivos (ϕ_i^+) e os fluxos de superação negativos (ϕ_i^-) referentes às alternativas x_i , pelas fórmulas definidas nas Equações 8 e 9. Por fim, calculou-se o fluxo de superação neto (ϕ_i) para as alternativas pela Equação 10. Os índices de preferências, os fluxos de superação positivos, negativos e os fluxos netos calculados, estão organizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Índices de preferências, fluxos de superação positivos, negativos e netos

s_{ik}	A1	A2	A3	A4	ϕ_i^+
A1	–	0,22	0	0,24	0,15
A2	0,51	–	0,24	0,24	0,33
A3	0,63	0,29	–	0,24	0,39
A4	0,49	0,29	0,24	–	0,34
ϕ_i^-	0,54	0,27	0,16	0,24	
ϕ_i	- 0,39	0,06	0,23	0,10	

Obtém-se o resultado da aplicação do método PROMETHEE II pela ordem decrescente de valores dos fluxos netos, o que define uma pré-ordem completa das

alternativas. A Figura 2 mostra quais alternativas superam as outras em cada critério e a Figura 3 mostra a ordenação final das alternativas.

Figura 2 - Demonstração de alternativas favoritas por cada critério.

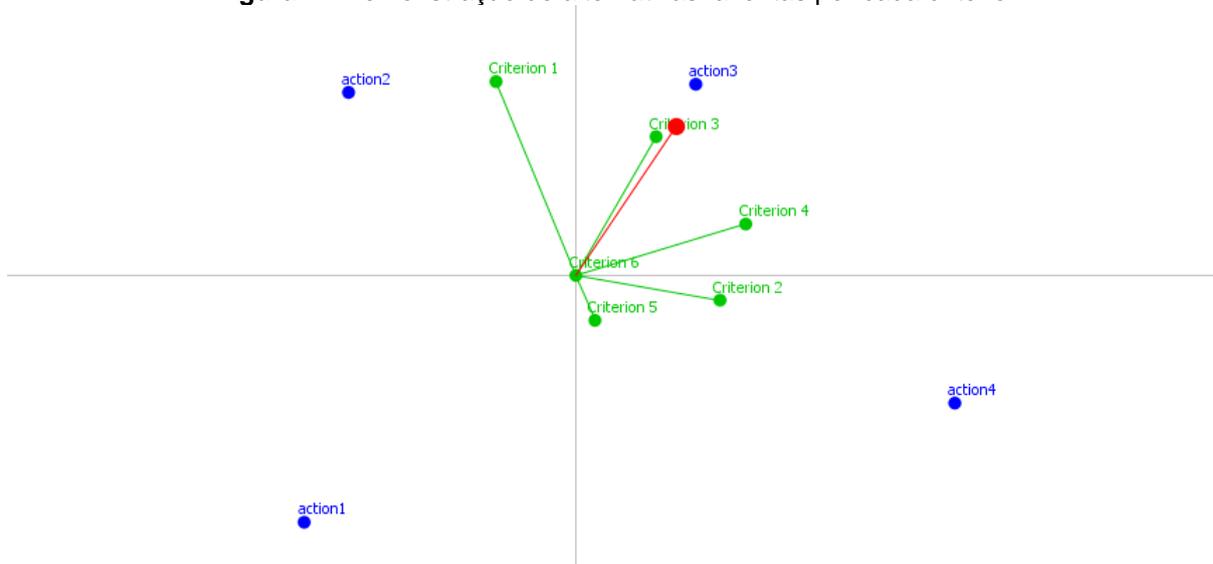
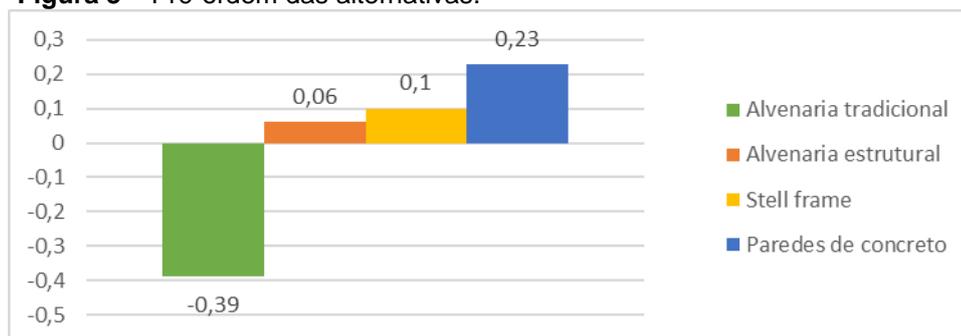


Figura 3 – Pré-ordem das alternativas.



Como resultado da aplicação do método multicritério PROMETHEE, obteve-se a ordenação das alternativas de sistemas construtivos em que o sistema com paredes de concreto tem o melhor desempenho em relação aos critérios de avaliação do modelo. A seguir, o sistema steel frame ficou na segunda posição em termos de eficiência e os sistemas de alvenaria estrutural e de alvenaria convencional foram ordenados em terceira e quarta colocação, respectivamente.

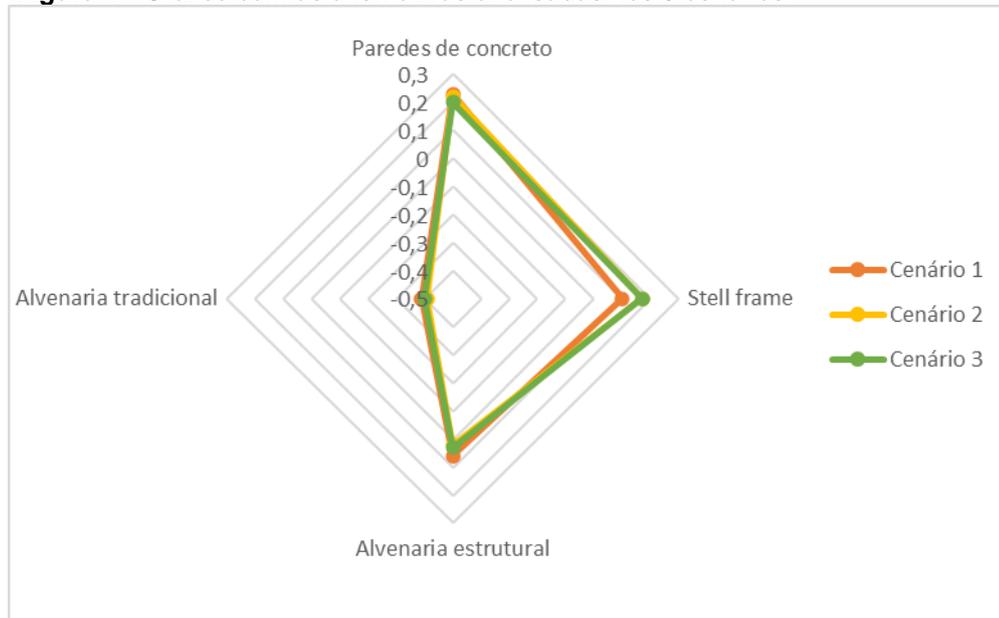
Com o objetivo de verificar a influência nos resultados encontrados pela variação dos pesos atribuídos aos critérios, fez-se a análise de sensibilidade, conforme os valores apresentados na Tabela 4, identificadas por Cenário 2 e Cenário 3. Os pesos dos critérios foram variados para cima ou para baixo visando a obtenção de diferentes cenários com diferentes parâmetros.

Tabela 4 – Pesos de cada critério considerados nos cenários analisados.

Pesos em cada cenário	Critérios					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Cenário 1	10	9	8	3	7	4
Cenário 2	10	10	9	6	8	7
Cenário 3	8	7	6	6	7	5

Para os cenários 2 e 3 de variações dos pesos dos critérios, calcularam-se os índices de preferências juntamente com os fluxos de superação positivos, negativos e os fluxos netos nos dois cenários considerados. Após os cálculos, foram obtidos os resultados com a ordenação das alternativas nos 3 cenários que estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Gráfico com as alternativas analisadas nos 3 cenários.



Verifica-se que não houve alteração na ordenação das alternativas, o que demonstra uma estabilidade forte do modelo. Percebe-se que os sistemas construtivos com melhor desempenho no modelo de decisão aplicado, são os sistemas com processos mais industrializados, ou seja, o sistema com paredes de concreto e o sistema steel frame. O modelo mostrou uma robustez ao manter como resultado a mesma ordem das alternativas dos sistemas construtivos e o sistema em paredes de concreto apresenta o melhor desempenho perante a variação dos pesos atribuídos aos critérios de avaliação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como conclusão, observa-se que a escolha do sistema construtivo para habitação de interesse social é uma decisão importante que necessita ser apoiada por técnicas estruturadas. Essa decisão tem influência ao longo de toda a vida útil da edificação, devendo ser tomada na fase de projeto por influenciar na manutenção do imóvel e no conforto do usuário durante o seu uso. Portanto, é responsabilidade dos construtores e incorporadores o oferecimento de um ambiente construído de qualidade para os usuários.

Pelo modelo elaborado, conclui-se que os principais critérios influentes nessa escolha são o custo, produtividade, satisfação com fornecedor, resíduos gerados e isolamento térmico e acústico. Custo e produtividade são os critérios mais importantes na visão do gestor, porém a análise desse modelo na visão do usuário poderia apresentar uma perspectiva diferente. Na aplicação do método PROMETHEE II para a resolução do problema, obteve-se como resultado a ordem: paredes de concreto, *steel frame*, alvenaria estrutural e alvenaria tradicional. As alternativas que conquistaram os melhores desempenhos foram os sistemas construtivos desenvolvidos por meio de processos industrializados, que são as paredes de concreto e o *steel frame*. A análise de sensibilidade demonstra a estabilidade do modelo, que apresenta de forma estruturada o processo de tomada de decisão, sendo observado que a utilização do método de análise multicritério PROMETHEE II contribui para a melhoria do processo de decisão nesse setor, tornando-se uma importante ferramenta de gestão.

Por fim, o modelo apresentado consiste numa ferramenta para apoiar a tomada de decisão gerencial na escolha de sistemas construtivos destinados à habitação de interesse social, contribuindo para a melhoria da qualidade das edificações residenciais entregues e do conforto do usuário durante o seu uso, assim como a redução da energia consumida durante o seu uso. Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de um modelo analisando o ponto de vista do usuário e a influência de diferentes decisores para a tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

ADALBERTO, P. et al. Modelo para avaliação e comparação de projetos de habitação com

base no valor. **Gestão & Produção**, v. 14, n. 3, p. 521–533, 2007.

<https://doi.org/10.1590/S0104-530X2007000300008>

BOLINA, F.; CHRIST, R.; METZLER, A.; QUININO, U.; TUTIKIAN, B. Comparison of the Fire Resistance of two Structural Wall Systems in Light Steel Framing. **DYNA**, v. 84, n. 201, p. 123, 26 maio 2017. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.57487>

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. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(86\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5)

CAMPOS, V. R.; ALMEIDA, A. T. de. Modelo multicritério de decisão para localização de Nova Jaguaribara com VIP analysis. **Pesquisa Operacional**, v. 26, n. 1, p. 91-107, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0101-74382006000100005>

CAVALCANTI, M. V. S.; FRANCISCO, A. M. X.; RODRIGUES, D. M.; SILVA, D. G. Optimization of structural brickwork laying joints in concrete blocks. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 7, p. 115–134, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000100007>

CHENG, X.; ZHAO, X.; CHEN, Y.; LI, Z. A model study on affordable steel residential housing in China. **Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China**, v. 6, n. 3, p. 288–296, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11709-012-0171-9>

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. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100209>

DE WILDE, P. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. **Automation in Construction**, v. 41, p. 40–49, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009>

DOS SANTOS, F. A.; DE CARVALHO, M. C. R.; 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.

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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:7\(517\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:7(517))

GO, C. G.; TANG, J. R.; CHI, J. H.; CHEN, C. T.; HUANG, Y. L. Fire-resistance property of reinforced lightweight aggregate concrete wall. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 725–733, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.081>

GOMES, L. F.A.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de Decisões em Cenários Complexos**. Editora Thomson. São Paulo, 2004.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. de. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. São Paulo: Atlas, 2002.

GOUVEIA, J. P.; LOURENÇO, P. B.; VASCONCELOS, G. **Soluções construtivas em alvenaria**. Universidade de Coimbra, Portugal, 2007.

GUPTA, R.; KAPSALI, M.; HOWARD, A. Evaluating the influence of building fabric, services

and occupant related factors on the actual performance of low energy social housing dwellings in UK. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 548–562, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.057>

HUEBNER, G. M.; HAMILTON, I.; CHALABI, Z.; SHIPWORTH, D.; ORESZCZYN, T. Explaining domestic energy consumption - The comparative contribution of building factors, socio-demographics, behaviours and attitudes. **Applied Energy**, v. 159, p. 589–600, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.028>

JATO-ESPINO, D.; CASTILLO-LOPEZ, E.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J.; CANTERAS-JORDANA, J. C. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. **Automation in Construction**, v. 45, p. 151–162, 1 set. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.013>

KLIPPEL FILHO, S.; TUTIKIAN, B. F.; OLIVEIRA, M. F.; PACHECO, F.; LABRES, H. S. Influência da espessura de revestimentos de argamassa no desempenho acústico de alvenarias de blocos cerâmicos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, prelo.

LEE, S.; HWANG, D.; PARK, J.; JEON, J. Y. Cause and perception of amplitude modulation of heavy-weight impact sounds in concrete wall structures. **Building and Environment**, v. 94, p. 785–792, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.020>

NGO, T.; FRAGOMENI, P.; MENDIS, P.; TA, B. 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. <https://doi.org/10.14359/51685607>

PATZLAFF, J. O.; KERN, A. P.; GONZÁLEZ, M. A. S. Projeto de edificações com apelo sustentável: elementos para a construção de um sistema de apoio à decisão. **Produção Online**, v. 10, n. 3, p. 479–503, 2010. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v10i3.157>

PEGORARO, C.; SAURIN, T. A.; PAULA, I. C. DE. O papel da gestão de requisitos em projetos de ambientes construídos: um estudo de caso. **Produção Online**, v. 11, n. 4, p. 965–994, 2011. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v11i4.648>

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; BUENO, C. Cast-in-place concrete walls: thermal comfort evaluation of one-storey housing in São Paulo State. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 1, p. 31–48, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952011000100003>

SARHAT, S. R.; SHERWOOD, E. G. The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry. **Construction and Building Materials**, v. 58, p. 111–121, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.025>



Artigo recebido em: 04/02/2019 e aceito para publicação em: 01/07/2021
DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v21i2.3561>