

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## MÉTODO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO APLICADO À SELEÇÃO DE MATERIAIS ESTRUTURAIS CONSIDERANDO O IMPACTO AMBIENTAL

Leonardo Variani <sup>1</sup>  
\* Moacir Kripka <sup>1</sup>

### MULTICRITERIA DECISION METHOD APPLIED TO THE SELECTION OF STRUCTURAL MATERIALS CONSIDERING THE ENVIRONMENTAL IMPACT

Recibido el 13 de octubre de 2019; Aceptado el 4 de mayo de 2020

#### Abstract

*When designing a building, the selection of the most appropriate structural material may be based on several factors such as cost, performance, availability, and, more recently, the possible environmental impacts produced. One way to select the best alternative based on several criteria may be the use of decision-making techniques. Multicriteria decision analysis standardizes the decision-making process through mathematical modeling, helping the decision maker to solve problems in which there are several objectives to be achieved simultaneously. Among the existing methods, one of the most widely used is the Analytic Hierarchy Process (AHP), which is based on the division of the decision problem into hierarchical levels and the paired comparison. The present work had as objective to present a methodology employed to compare three types of structural materials, concrete, steel and wood, according to both objective and subjective criteria. Among the results obtained, it was found that, despite the lower environmental impact attributed to the wood, as well as the better strength of steel, concrete was the material that presented the best total score, mainly due to its lower cost and to cultural aspects.*

**Keywords:** structural materials, structures, Analytic Hierarchy Process, decision-making, construction.

<sup>1</sup> Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo (UPF), Brasil.

\* *Autor correspondente:* Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo. BR 285 – São José. 99052-900. Passo Fundo, RS. Brasil. Email: [mkripka@upf.br](mailto:mkripka@upf.br)

### Resumo

No projeto de uma edificação, a seleção do material estrutural mais adequado pode estar baseada em diversos fatores como custo, desempenho, disponibilidade e, mais recentemente, nos possíveis impactos ambientais produzidos. Uma forma de seleção da melhor alternativa com base em diversos critérios pode ser a utilização de técnicas de tomada de decisão. A análise de decisão multicritério padroniza o processo de tomada de decisão através de modelagem matemática, auxiliando o decisor a resolver problemas nos quais existem diversos objetivos a serem alcançados simultaneamente. Dentre os métodos existentes, um dos mais amplamente empregados é o Processo de Análise Hierárquica (Analytic Hierarchy Process, ou AHP) o qual é baseado na divisão do problema de decisão em níveis hierárquicos e na comparação pareada. O presente trabalho teve como objetivo apresentar uma metodologia para comparar três tipos de materiais estruturais, sendo eles concreto, aço e madeira, segundo critérios objetivos e subjetivos. Dentre os resultados obtidos constatou-se que, apesar do menor impacto ambiental atribuído à madeira, bem como da melhor resistência do aço, o concreto foi o material que apresentou a melhor pontuação total, principalmente devido ao menor custo e a questões culturais.

**Palavras chave:** materiais estruturais, estrutura, Método de Análise Hierárquica, tomada de decisão, construção.

### Introdução

A fim de se ter destaque no mercado relacionado à indústria da Construção Civil, é necessário executar uma determinada obra em tempo reduzido, custo baixo e alta qualidade, atendendo aos anseios de construtores, empreendedores, proprietários e consumidor final, dentre outros. Para que isto aconteça, muito trabalho e dedicação são necessários, envolvendo muitos estudos, projetos, pesquisas e orçamentos. Dentre estes estudos, destaca-se a escolha do material estrutural, a qual pode estar baseada em diversos fatores como custo, desempenho, disponibilidade e, mais recentemente, nos possíveis impactos ambientais produzidos. Uma vez que cada material possui suas características específicas que resultam em vantagens e desvantagens relativas, uma forma de seleção da melhor alternativa com base em diversos critérios pode ser a utilização de técnicas de tomada de decisão.

Os problemas complexos da tomada de decisão são comuns numa infinidade de áreas, e desde os tempos antigos o homem tenta resolvê-los, apoiando-se em raciocínios dedutivos a fim de guiar e validar as suas escolhas. Em várias situações as decisões devem ser tomadas com base em informações limitadas, ou mesmo com base em critérios qualitativos, sendo necessário converter preferências em valores numéricos para construir um modelo de tomada de decisão. Independentemente da estratégia, esta deve permitir analisar várias alternativas e compará-las adequadamente.

Atualmente, três materiais estruturais amplamente empregados são o concreto, o aço e a madeira, cada um deles com propriedades e características distintas e apresentando, portanto, vantagens e desvantagens para cada tipo de aplicação. Além das vantagens mensuráveis, devem ser também considerados fatores subjetivos, como a questão cultural, a qual justifica parcialmente a ampla utilização do concreto no Brasil, por exemplo. Outro fator não menos

importante consiste no fato de que, devido à escassez de recursos naturais, aspectos como resistência e custo, apesar de importantes, não podem ser considerados de forma isolada. A indústria da construção demanda uma grande quantidade de recursos naturais, sendo responsável por diversos efeitos nocivos ao meio ambiente. Esses impactos têm impulsionado estudos que visam o desenvolvimento de projetos de construção mais sustentáveis (Aigbavboa *et al.*, 2017; Oguntona e Aigbavboa, 2017). Neste sentido, é inevitável a consideração dos impactos ambientais dos materiais no processo decisório.

A avaliação dos impactos pode ser medida segundo diferentes critérios, estando entre os mais usuais a emissão de dióxido de carbono e a energia. Para a avaliação desses impactos, a Análise do Ciclo de Vida (LCA) transformou-se, nos últimos anos, numa metodologia de estudo internacionalmente reconhecida. A análise do ciclo de vida possibilita a consideração das entradas e saídas relativas à aquisição dos materiais, construção, manutenção e demolição de um sistema, e é particularmente útil quando alternativas de projeto que podem desempenhar a mesma função necessitam ser comparadas (Hikmat & Saba, 2009).

Em consequência da grande diversidade de materiais, bem como dos possíveis critérios de seleção, o objetivo principal desse trabalho consiste na proposição de uma metodologia para comparação de alguns materiais estruturais com base em método de tomada de decisão, considerando o impacto ambiental entre os critérios. Devido a sua ampla utilização, no presente estudo foi empregado o Processo Hierárquico Analítico (*Analytic Hierarchy Process*, ou AHP). Esse método fornece um procedimento racional para modelar um problema de decisão, representando e quantificando as variáveis envolvidas em uma hierarquia de critérios ponderados por preferências. O resultado é um modelo que permite analisar várias alternativas e as comparar com facilidade, minimizando as falhas decorrentes do processo decisório. Segundo Zamarrón-Mieza *et al.* (2017), o método AHP tem sido o mais usado na tomada de decisão aplicada à sustentabilidade na engenharia civil.

Apesar de direcionada à seleção de materiais estruturais, a metodologia pode ser facilmente adaptada a escolha de outros materiais, bem como ao emprego de critérios distintos.

### **Processo Hierárquico Analítico**

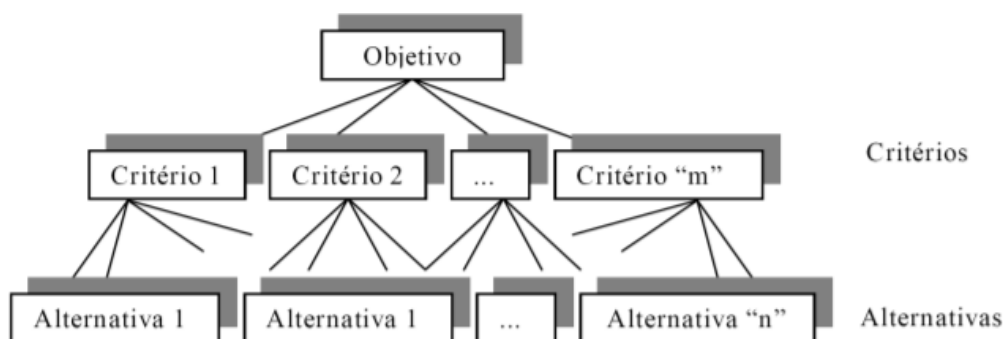
Os métodos de tomada de decisão por múltiplos critérios diferem entre si através da maneira pela qual os critérios são julgados, bem como na forma de obtenção de pesos para os critérios e alternativas.

O Processo Hierárquico Analítico (AHP) surgiu quando Saaty trabalhava para a Agência de Controle de Armas e Desarmamento do Departamento de Estado Americano. (Forman e Selly, 2002). Segundo autores, foi devido a sua observação sobre a dificuldade de comunicação entre

os membros do governo americano que surgiu a motivação para desenvolver um método de apoio à tomada de decisão. O método foi idealizado também para modelar problemas não estruturados do cotidiano das pessoas, por essas tomarem decisões sem necessariamente ter a noção da importância dos parâmetros utilizados (Saaty, 1980; Saaty, 1991).

O método AHP consiste na decomposição do problema em menores problemas hierarquicamente independentes, seguidos da comparação por pares dos critérios do mesmo nível e, como consequência, os pesos relativos são atribuídos a cada critério em cada nível. No método, a modelação ocorre por meio dos julgamentos subjetivos, quantificando numericamente os julgamentos e levando em consideração a importância relativa dos fatores que estão sendo analisados (Yang & Lee, 1997).

O AHP seleciona alternativas com base em uma série de critérios ou variáveis, geralmente hierarquizadas, que normalmente entram em conflito. Nesta estrutura hierárquica, o objetivo está no nível superior e os critérios e alternativas nos níveis inferiores, como mostrado na Figura 1. Segundo Yepes (2018), é importante também que o número de critérios e subcritérios em cada nível não seja maior que 7, para evitar comparações pareadas excessivas.



**Figura 1.** Modelo de estrutura hierárquica AHP (Martins, Souza e Barros, 2009).

Segundo Vargas (1990), a utilização do método AHP é também indicada pelo fato de mensurar critérios tangíveis com intangíveis, por meio de uma escala de razão, podendo dividir o problema em diversas partes, relacionando os juízos de comparação com o objetivo final da aplicação.

O resultado obtido pela aplicação do método AHP ocorre por meio da comparação paritária dos critérios e alternativas sendo esses quantificados numericamente. (Saaty, 1991). Segundo Costa (2002) para o desenvolvimento do método, deve-se seguir três passos para se chegar ao resultado final, sendo eles:

- Construção de hierarquias: A utilização de uma hierarquia é a busca da resolução do problema por meio das interações entre os diversos níveis hierárquicos, não somente entre os elementos do mesmo nível (Saaty, 1991). Para a aplicação, é necessário que os critérios e as alternativas possam ser estruturados de forma hierárquica, onde o primeiro nível da hierarquia representa o objetivo geral do problema, o segundo nível os critérios e o terceiro as alternativas. A ordem hierárquica possibilita ao decisor ter uma visualização do sistema e de seus componentes como um todo, bem como interações e os impactos que eles exercem sobre o sistema. Permite também compreender de forma geral a relação de complexidade, auxiliando na avaliação da dimensão de conteúdo dos critérios através da comparação dos elementos (Bornia e Wernke, 2001).
- Definição de propriedades: Por meio de uma escala numérica, faz-se uma análise comparativa paritária entre os critérios, onde é necessário cumprir as seguintes etapas:
  - Julgamentos paritários: os critérios de cada grupo do mesmo nível hierárquico são compostos por uma comparação direta, por pares, das alternativas em relação aos critérios do nível inferior, compondo as matrizes de julgamento. Para fazer isso, matrizes de comparação emparelhadas são criadas usando a Escala Fundamental de Comparação por Pares, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1.** Escala fundamental de comparação por pares (Adaptado de Saaty, 1980)

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
Recíproco dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i	Uma designação razoável
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz

Ainda que seja efetuada a utilização de aplicativos ou softwares para que sejam elencadas as alternativas, o julgamento paritário consiste numa etapa determinante no processo, por visar a redução no grau de subjetividade envolvido no julgamento. No caso de critérios quantitativos (por exemplo, custos relativos), os valores correspondentes eliminam a necessidade de emprego da comparação pareada conforme Tabela 1. Além de comparadas as alternativas segundo um dado critério, os pesos também são empregados para a definição da importância relativa de cada critério (Equação 1).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & 1 & \vdots \\ 1/a_{1n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

$a_{ij} > 0$  (positiva)

$a_{ij} = 1$

$a_{ij} = a_{ji}$  (recíproca)

$a_{jk} = a_{ij} \cdot a_{jk}$  (consistência)

Valores superiores à unidade para  $a_{ij}$  indicam a prevalência (maior importância) da alternativa  $i$  sobre a alternativa  $j$ , conforme Tabela 1. Valores iguais à unidade indicam mesmo grau de importância, o que justifica a diagonal principal composta unicamente por valores unitários.

O número de julgamentos necessários para a elaboração de uma matriz de julgamento genérica  $A$ , é  $n(n-1)/2$ , onde  $n$  é o número de elementos pertencentes a esta matriz. Os elementos de  $A$  são definidos pelas condições indicadas a seguir:

- Normalização das matrizes de julgamento: nessa etapa são obtidos quadros normalizados através da soma dos elementos de cada coluna das matrizes de julgamento e posterior divisão de cada elemento destas matrizes pelo somatório dos valores da respectiva coluna;
- Cálculo das prioridades médias locais (PML's): as PML's são as médias das linhas dos quadros normalizados;
- Cálculo das prioridades globais: nesta etapa deseja-se identificar um vetor de prioridades global (PG), que armazene a prioridade associada a cada alternativa em relação ao foco principal.

Por fim, deve-se calcular a Razão de Consistência dos julgamentos (RC), onde  $RC = IC / IR$ . IR é o índice de Consistência Randômico obtido para uma matriz recíproca de ordem  $n$  gerada aleatoriamente. Já o IC é o índice de Consistência que é obtido pela expressão  $IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1)$ , onde  $\lambda_{\text{máx}}$  é o maior autovalor da matriz de julgamentos. A relação de consistência indica se as importâncias relativas foram determinadas de forma criteriosa. Em outras palavras, se foi definida a importância relativa entre os critérios 1 e 2 e entre os critérios 1 e 3, então a relação de importância relativa entre os critérios 2 e 3 deve refletir adequadamente essas relações.

### Procedimento Metodológico

Com o objetivo de efetuar a comparação de materiais estruturais, foram consideradas as seguintes características para compor os critérios de seleção, considerando um metro cúbico do material: resistência característica à compressão, peso específico, custo, homogeneidade e impacto ambiental. Além disso, buscou-se considerar também o aspecto cultural, correspondente à preferência subjetiva por determinado material. Com base nesses critérios, foi criada uma estrutura hierárquica para o problema, como mostra na Figura 2.

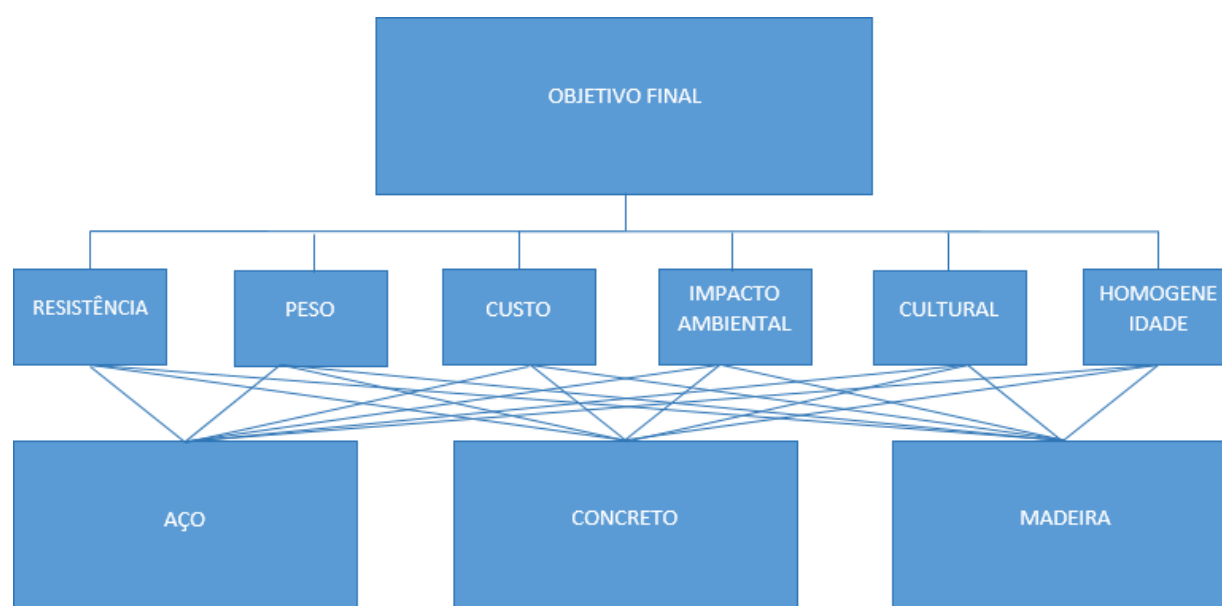


Figura 2. Estrutura Hierárquica.

A tabela 2 mostra a descrição dos três tipos de materiais que foram analisados para a elaboração do trabalho. Para facilitar a modelagem do método AHP, foi utilizada uma calculadora online (Calculadora 123AHP), na qual foram aplicados os valores para cada critério e características dos materiais quantificados numericamente conforme detalhado na sequência. Com a utilização da Escala de comparação de Saaty, foi construída a matriz de comparação dos critérios de avaliação conforme Figura 3. A matriz é construída a partir da informação dada pelo usuário, da importância relativa de cada critério, a partir da comparação pareada e considerando a escala da Tabela 1. Exemplificando, observa-se na primeira linha da matriz que, para a seleção do material estrutural, a resistência foi considerada mais importante (pequena superioridade) que o peso, o impacto ambiental e a cultura, e de grande importância em relação à homogeneidade. Em contrapartida, foi considerada ligeiramente menos importante que o custo. Dessa maneira são construídas as demais linhas da matriz, verificando-se a consistência dessas relações.

**Tabela 2.** Descrição dos materiais estruturais.

Materiais	Descrição
Aço	Perfil "I" de Aço Laminado, "W" 410 X 67
Concreto	Concreto usinado, Classe de Resistência C30
Madeira	Madeira Roliça tratada de Eucalipto, cim Classe de Resistência C30

ESTRUTURA	Resistência	Peso	Custo	Homogeneidade	Impacto Ambiental	Cultura
Resistência	1/1	3/1	1/2	5/1	3/1	3/1
Peso	1/3	1/1	1/3	1/3	3/1	1/5
Custo	2/1	3/1	1/1	5/1	3/1	1/1
Homogeneidade	1/5	3/1	1/5	1/1	1/5	1/5
Impacto Ambiental	1/3	1/3	1/3	5/1	1/1	1/1
Cultura	1/3	5/1	1/1	5/1	1/1	1/1

**Figura 3.** Matriz de comparação paritária dos Critérios.

Após a comparação paritária dos critérios, foi então combinada a matriz de comparação dos critérios com as matrizes de comparação das alternativas, sendo esta elaborada como descrito na sequência.

### Resistência

Para os materiais considerados, a Tabela 3 indica as resistências características adotadas, em MPa. O valor informado para o aço corresponde à tensão de escoamento para o aço ASTM 572 grau 50 (aço estrutural de baixa liga e alta resistência). Já os valores do concreto e da madeira correspondem às classes de resistência adotadas, consideradas representativas para esses materiais.

**Tabela 3.** Resistencia dos característica materiais.

Material	Resistência (MPa)
Aço	345.00
Concreto	30.00
Madeira	30.00



Com base na tabela das resistências, foram calculadas as Prioridades Médias Locais (PML's), as quais indicam a importância relativa de cada material com relação ao critério:

$$\text{PML (Aço)} = 345.0 / (345.0+30.0+30.0) = 85\%$$

$$\text{PML (Concreto)} = 30.0 / (345.0+30.0+30.0) = 7.5\%$$

$$\text{PML (Madeira)} = 30.0 / (345.0+30.0+30.0) = 7.5\%$$

Uma vez que a resistência do material é uma grandeza quantitativa, não é necessária uma avaliação pareada da importância relativa de cada alternativa. Essa importância é prontamente obtida a partir da normalização dos valores, no caso, da resistência de cada material em relação ao somatório das resistências de todas as alternativas. Procedimento análogo foi adotado para os demais critérios quantitativos considerados, quais sejam: o peso, o custo, o grau de homogeneidade e o impacto ambiental.

### Peso

O Peso Específico de cada material foi retirado de Normas Técnicas Brasileiras, sendo o aço da NBR 6120/19, o Concreto da NBR 6118/14 e a Madeira da NBR 7190/97, conforme Tabela 4.

**Tabela 4.** Peso específico dos materiais.

Material	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )
Aço	78.50
Concreto	24.00
Madeira	10.00

Prioridades Médias Locais (PML's):

$$\text{PML (Aço)} = 78.5 / (78.5+24.0+10.0) = 70\%$$

$$\text{PML (Concreto)} = 24.0 / (78.5+24.0+10.0) = 21\%$$

$$\text{PML (Madeira)} = 10.0 / (78.5+24.0+10.0) = 9\%$$

Cabe observar que, ao contrário da resistência, quanto menor o peso específico melhor, uma vez que uma estrutura mais leve acarreta, entre outros, na redução das cargas que chegam à fundação, guardando uma relação direta com os custos envolvidos. Em função disso, os menores valores de PML indicam a melhor alternativa com relação ao critério (no caso, uma clara vantagem para a madeira, seguida pelo concreto). Destaca-se que, no presente estudo, é considerado o peso específico unitário, sem a consideração das dimensões necessárias a um dado elemento estrutural.

### Custo

Como o custo é específico para cada região, para a comparação os custos foram obtidos pela Tabela de Insumos e Composições SINAPI do Estado do Rio Grande do Sul de abril de 2019, correspondente ao metro cúbico de cada material (Tabela 5).

**Tabela 5.** Custo dos materiais.

Material	Custo (m <sup>3</sup> )
Aço	R\$ 43,736.96
Concreto	R\$ 305.60
Madeira	R\$ 1,536.59

$$\text{PML (Aço)} = 43,736.96 / (43,736.96 + 305.6 + 1,536.59) = 96\%$$

$$\text{PML (Concreto)} = 305.6 / (43,736.96 + 305.6 + 1,536.59) = 1\%$$

$$\text{PML (Madeira)} = 1,536.59 / (43,736.96 + 305.6 + 1,536.59) = 3\%$$

### Homogeneidade

Para a homogeneidade foi considerado o coeficiente de ponderação relacionado à variabilidade das resistências, retirado das normas técnicas específicas, conforme Tabela 6.

**Tabela 6.** Homogeneidade dos materiais.

Material	Homogeneidade
Aço	1.15
Concreto	1.40
Madeira	1.80

$$\text{PML (Aço)} = 1.15 / (1.15 + 1.4 + 1.8) = 26\%$$

$$\text{PML (Concreto)} = 1.4 / (1.15 + 1.4 + 1.8) = 32\%$$

$$\text{PML (Madeira)} = 1.8 / (1.15 + 1.4 + 1.8) = 42\%$$

### Impacto Ambiental

Diversos critérios podem ser empregados para a avaliação do impacto produzido pelos materiais (Santoro e Kripka, 2017). Dentre estes, o presente estudo optou pela consideração da energia, com valores obtidos de Ferguson et al (2006) considerando a fase do berço ao portão, ou seja, desde a extração dos materiais, passando pelo processamento, transporte e produção (Tabela 7). Cabe observar que as proporções relativas de impacto medidas em energia são bastante semelhantes ao obtido em termos de emissão de dióxido de carbono, segundo a mesma referência.

**Tabela 7.** Impacto ambiental dos materiais.

Material	Impacto ambiental (MJ/m <sup>3</sup> )
Aço	266,000
Concreto	4,800
Madeira	750

$$\text{PML (Aço)} = 266,000 / (266,000 + 4,800 + 750) = 98\%$$

$$\text{PML (Concreto)} = 4,800 / (266,000 + 4,800 + 750) = 1.8\%$$

$$\text{PML (Madeira)} = 750 / (266,000 + 4,800 + 750) = 0.3\%$$

### Cultura

A seleção de um material estrutural passa não apenas por barreiras econômicas, técnicas e práticas, mas também envolve fortemente aspectos culturais (Gieseckam et al, 2016). Assim, visando englobar a subjetividade relacionada a essa questão, a partir do entendimento dos autores, e contando com o auxílio de vários estudantes de Engenharia Civil, foi definida uma estrutura hierárquica que permite quantificar a importância relativa de cada material com relação a esse critério. Com essa finalidade foi apresentado a cada membro do grupo um breve questionário solicitando a atribuição de um grau de importância relativa entre aço e concreto, entre aço e madeira e entre concreto e madeira. A partir desses pesos, e considerando as respostas que apareciam em maior frequência, foi gerada a matriz apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8.** Matriz de comparação paritária da Cultura.

Cultura	Aço	Concreto	Madeira
Aço	1/1	1/5	3/1
Concreto	5/1	1/1	7/1
Madeira	1/3	1/7	1/1

A partir da matriz da Tabela 8 foram obtidas as Prioridades Médias Locais (PML's):

$$\text{PML (Aço)} = 19\%$$

$$\text{PML (Concreto)} = 72\%$$

$$\text{PML (Madeira)} = 8\%$$

Dos resultados obtidos, observa-se a larga desvantagem atribuída à madeira como material estrutural, o qual reflete o senso comum de que a construção em madeira é associada a um processo primitivo e de baixa qualidade (Molina e Calil, 2010). Da mesma forma, fica evidente pela avaliação dos entrevistados o grande predomínio do concreto, atualmente o material de construção mais utilizado no mundo (Hajek, 2017).

### Apresentação e análise dos resultados

Os gráficos a seguir apresentam os resultados obtidos a partir da aplicação do método AHP com o uso de uma ferramenta online (Calculadora 123AHP). Para o uso da ferramenta, os dados de entrada são apenas os critérios, as alternativas e as correspondentes comparações pareadas, as quais definem as importâncias relativas. Apesar do método envolver cálculos simples, e da vasta disponibilidade de planilhas e aplicativos disponíveis, a ferramenta citada foi escolhida por ser de fácil acesso, além do aspecto visual de apresentação dos resultados.

O Gráfico 1 apresenta os pesos obtidos a partir da matriz da Figura 3, para o problema descrito, indicando a importância relativa de cada critério empregado. Observa-se que o custo e a resistência correspondem a mais da metade do peso total atribuído aos critérios (52.62%). Com base nesses pesos, bem como das prioridades médias locais (Tabelas 3 a 8), foram obtidos os resultados finais, indicando o concreto como a melhor dentre as alternativas avaliadas, seguido do aço (Gráfico 2).

Gráfico 1. Importância dos Critérios.

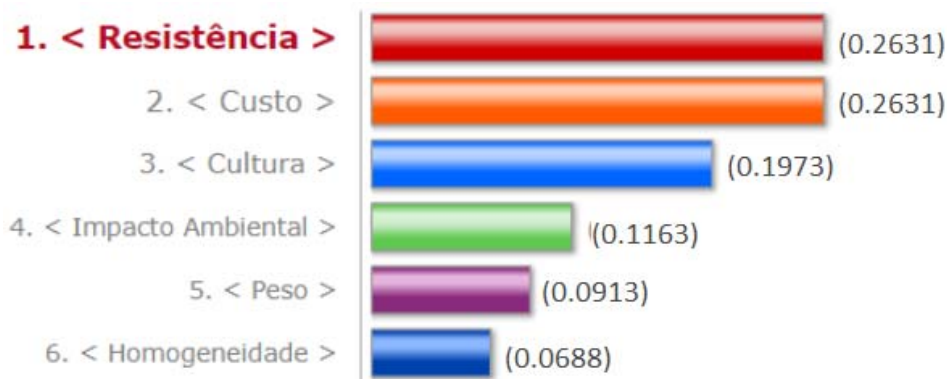


Gráfico 2. Resultado Final.



O Gráfico 3 indica a importância do peso relativo de cada critério na composição do peso final usado para a definição do melhor material. Observa-se por exemplo, que o custo e a cultura foram determinantes para a escolha do concreto. A maior parcela do aço corresponde à resistência, enquanto a madeira leva maior vantagem nos critérios relativos ao impacto ambiental e ao peso específico.

**Gráfico 3.** Decomposição das importâncias dos critérios



Ainda que a vantagem do concreto sobre o aço seja bastante significativa (cerca de 45.7% sobre a segunda alternativa), foram efetuados estudos adicionais com o objetivo de verificar a sensibilidade dos resultados quanto ao critério subjetivo considerado (cultura). Assim, a exemplo do efetuado em Kripka et al (2019), foi atribuída mesma importância relativa à cultura para os três materiais, mantendo apenas os critérios quantitativos no processo decisório e reduzindo portanto seu grau de subjetividade. Na aplicação do AHP, isso é feito pela geração de uma matriz de comparação com todos os coeficientes iguais à unidade. Nesse caso, o aço e a madeira passam a ter um peso bem maior que na situação anterior. No entanto, mesmo com a desvantagem do concreto nesse quesito, o mesmo ainda apresenta vantagem sobre os demais materiais (cerca de 11.1% sobre o aço e 16.9% sobre a madeira), não havendo alteração na classificação dos materiais.

**Gráfico 4.** Decomposição das importâncias dos critérios desprezando Cultura



### Considerações finais

A Análise de Decisão Multicritério possibilita uma avaliação mais ampla do material estrutural a adotar, uma vez que diversos critérios, muitas vezes conflitantes, podem ser considerados simultaneamente. Dentre os métodos existentes, o Método de Análise Hierárquica

(AHP – Analytic Hierarchy Process) foi adotado no presente trabalho, especialmente devido à facilidade de utilização. As alternativas como o aço, concreto e a madeira foram escolhidas por serem os três materiais amplamente utilizados em estruturas. Já os critérios de resistência, custo, peso, impacto ambiental, homogeneidade e cultura foram empregados por serem as características que influenciam diretamente no desempenho dos materiais.

Pela aplicação do método AHP obteve-se o concreto como melhor alternativa. Já quando o critério subjetivo foi desprezado, os três materiais praticamente se equivaleram, mas ainda com vantagem para o concreto. Cabe destacar que os resultados obtidos a partir da estratégia empregada nunca são definitivos, uma vez que ainda embutem um certo grau de subjetividade tanto na definição dos critérios como de sua importância relativa. No entanto, podem consistir num valioso subsídio ao tomador de decisão.

Um diferencial importante no presente estudo consistiu na consideração do impacto ambiental dentre os critérios para a seleção do material. Observou-se que, para dados retirados da mesma fonte (Ferguson, 2006), as conclusões gerais não se alterariam pela substituição da energia pela emissão de dióxido de carbono, visto que para ambos a madeira se apresenta como melhor alternativa quando considerado apenas o impacto. No entanto, para o conjunto dos critérios avaliados, a madeira se torna a alternativa menos indicada. Por fim, destaca-se que a metodologia descrita no presente estudo pode ser facilmente adaptada a outros materiais e critérios. Além disso, os resultados obtidos podem sofrer pequenas variações em função do fator local.

### Referências bibliográficas

- Aigbavboa, C., Ohiomah, I., Zwane, T. (2010) Sustainable Construction Practices: “A Lazy View” of Construction Professionals in the South Africa Construction Industry. *Energy Procedia*, **105**, 3003-3010.
- Australian Government (2004) Environmental Properties of Timber Summary Report. Project no: Pn0005.95.
- ABCT, Associação Brasileira de Cimento PORTLAND. Acesso em 01 abr. 2019. Disponível em: <https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-ocimento/basico/basico-sobre-cimento>
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1980). *NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 7190: – Estruturas de madeira – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Bornia, A. C., Wernke, R. (2001) A contabilidade gerencial e os métodos multicritérios. *Revista Contabilidade & Finanças. FIPECAP – FEA – USP.*, **14**(25), 60- 71.
- Calculadora 123AHP (2018). Acesso em: 06 jun. 2019. Disponível em: <http://www.123ahp.com/lzracun.aspx>
- Costa, H. G. (2002) *Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão*. Niterói: H.G.C., 177 pp
- Ferguson, I., La Fontaine, B., Vinden, P., Bren, L., Hateley, R., Hermesec, B. (2006) *Environmental properties of timber*. Forest & Wood Products Research & Development Corp., Bond University.

- Forman, E. H., Selly, M. A. (2002) Decision by objectives: how to convince others that you are right. Acesso em: 19 mar. 2019. Disponível em: <http://www.professorforman.com/DecisionByObjectives/Chapter>
- Giesekam, J., Barrett, J. R., Taylor, P. (2016) Construction sector views on low carbon building materials, *Building Research & Information*, **44**(4), 423-444.
- Hajek, P. (2017) Concrete structures for sustainability in a changing world, *Procedia Engineering*, (171), 207-214
- Hikmat, J. A., Saba, F. N. (2009) Developing a green building assessment tool for developing countries: case of Jordan. *Building and Environment* 2009, **44**(5), 1053-64.
- Kripka, M., Yepes, V., Milani, C. J. (2019) Selection of Sustainable Short-Span Bridge Design in Brazil. *Sustainability*, **11**, 1-12.
- Martins, C. S., Souza, D. O., Barros, M. S. (2009) O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais: 178 um estudo de caso. *XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. 1778-1788.
- Molina, J. C., Calil, C. J. (2010) Sistema Construtivo em Wood Frame Para Casas De Madeira. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, **31**(2), 143-156.
- Oguntona, O. A., Aigbavboa, C. O. (2017) Biomimicry principles as evaluation criteria of sustainability in the construction industry. *Energy Procedia*, **142**, 2491-2497.
- Saaty, T. L. (2000) *Decision making for leaders*. Pitts burg, USA: WS. Publications.
- Saaty, T. L. (1991) *Método de análise hierárquica*. São Paulo: Makron Books.
- Saaty, T. L. (1980) *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Santoro, J. F., Kripka, M. (2017) Studies on Environmental Impact Assessment of Reinforced Concrete in Different Life Cycle Phases. *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research*, **1**, 32-40.
- SINAPI, Sistema Nacional de Preços e Índices da Construção Civil (2019) *Refêrencia\_Insumo\_Composição*. Acesso em: 03 abr. 2019. Disponível em: [http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria\\_660](http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_660)
- Vargas, L. G. (1990). An Overview of The Analytic Hierarchy Process and its Applications. *European Journal of Operational Research*, **48**(1), 2-8. doi: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-H)
- Yepes, V., [Processo Hierárquico Analítico \(AHP\)](https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/ahp/). 2018. Acesso em: 14 mar. 2019. Disponível em: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/ahp/>
- Zamarrón-Mieza, I., Yepes, V., Moreno-Jiménez, J. M. (2017) A systematic review of application of multi-criteria decision analysis for aging-dam management. *Journal of Cleaner Production*, **47**, 217-230.