

O Uso do Método AHP na Tomada de Decisão para Seleção de Sistemas de Lajes de Edifícios Comerciais

*Luciano Ferreira dos Santos¹
Rafael Barreto Castelo da Cruz²*

Resumo

Este artigo tem por objetivo apresentar o método Analytic Hierarchy Process (AHP) como ferramenta de apoio a tomada de decisão multicritério e, em um estudo de caso, evidenciar todos os passos do método em sua aplicação para determinar e priorizar os critérios relevantes na escolha de um sistema estrutural destinado a lajes bem como selecionar a melhor das alternativas propostas. O AHP é um dos principais modelos matemáticos aplicado no apoio à teoria de decisão e através dele, constrói-se uma hierarquia lógica de critérios e suas matrizes comparativas, onde os resultados de prioridade são apresentados e as possíveis inconsistências são verificadas. Assim, mais do que determinar a decisão correta, o método permite justificar a escolha de forma consistente e coerente.

Palavras-chave: AHP; Analytic Hierarchy Process; decisão multicritério; lajes; sistemas estruturais.

1 Introdução

O mundo previsível e determinista do passado foi substituído pelo mundo incerto, aleatório e desordenado de hoje. Os avanços tecnológicos em vários campos da atividade humana criaram um planeta em que as coisas acontecem numa velocidade eletrônica [1]. Num mundo assim caracterizado, como jamais visto anteriormente, fazer as escolhas certas com base em critérios adequados e alinhados, torna-se um fator crítico de sucesso ou até mesmo de sobrevivência organizacional.

Provavelmente, um dos maiores desafios intelectuais da ciência e engenharia está em como tomar decisões certas, dada uma situação específica [2].

Na área da Construção Civil não acontece de forma diferente, pode-se notar, por exemplo, uma ampla variedade de sistemas estruturais destinados a lajes. Num cenário como este, o decisor, responsável pela escolha de uma dentre as possíveis alternativas, comumente, se depara com uma questão crucial: *Qual sistema de laje é o mais eficiente para o meu empreendimento?* Essa escolha é de fundamental importância para a eficiência da obra e para o sucesso do empreendimento, pois a escolha correta do sistema

estrutural e do sistema construtivo pode reduzir de maneira significativa o custo do empreendimento e, até mesmo, determinar se o investimento é viável ou não.

Embora, a resposta para esta pergunta pareça simples, mesmo sendo carente de uma atenção especial, na maioria das vezes, ela é baseada apenas na experiência prática do profissional ou em simples listas comparativas de vantagens e desvantagens de cada sistema estrutural, que por si só não são suficientes para uma correta avaliação e tomada de decisão.

Ainda que a engenharia e a computação venham desenvolvendo softwares bastante avançados que contemplem diversos tipos de sistemas estruturais e sejam capazes de calcular, dimensionar e detalhar edifícios com grande rapidez e eficiência, quem define o sistema estrutural a ser adotado é o projetista. Em outras palavras, o projetista define um sistema estrutural, lança a geometria da estrutura e o programa fornece o melhor resultado para esse sistema escolhido. Contudo, a dúvida ainda paira sobre a escolha; talvez a escolha de outro sistema estrutural pudesse apresentar resultados mais eficientes, porém, os softwares não têm tal abordagem.

Assim, para que a tomada de decisão não se torne intuitiva e não deixe de considerar critérios

1 Acadêmicos do Curso de Especialização em Engenharia de Estruturas do Centro Universitário de Lins – Unilins, Lins-SP, Brasil.

2 Mestre em Engenharia Civil e Docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Nove de Julho – Uninove, São Paulo-SP, Brasil.

relevantes, propõe-se o uso de uma ferramenta de apoio à decisão multicritério, por meio do método Analytic Hierarchy Process (AHP). Portanto, este artigo pretende apresentar o método AHP aplicando-o em um estudo de caso, evidenciando todos os passos do modelo.

2 Analytic Hierarchy Process – o método

O AHP é um dos principais modelos matemáticos aplicado no apoio à teoria de decisão disponível no mercado, onde diversas variáveis ou critérios são considerados para a seleção de diversas alternativas propostas. Fundamentado numa metodologia científica, o método permite analisar, determinar e decidir os diversos critérios que influem na tomada de decisão e, conseqüentemente, gerar informações que auxiliem o decisor a eleger a melhor das alternativas propostas, com base nos critérios analisados. Mais do que determinar a decisão correta, o método permite justificar a escolha de forma consistente e coerente.

O Método foi desenvolvido na década de 1970 por Thomas L. Saaty e desde então tem sido extensivamente estudado e refinado e, suas aplicações, ampliadas pelo mundo todo em uma grande variedade de situações de decisões. O principal diferencial do AHP com relação a outras técnicas comparativas está em sua capacidade de conversão de dados empíricos em modelos matemáticos [3].

A análise de decisão multicritério pode ser entendida como um processo metódico, a qual consiste nas seguintes etapas:

- a) definir as alternativas;
- b) definir os critérios relevantes para o problema de decisão;
- c) avaliar a importância relativa de cada critério;
- d) avaliar as alternativas em relação aos critérios;
- e) determinar a avaliação global de cada alternativa.

Assim, a utilização do AHP se inicia pela decomposição do problema em uma hierarquia de critérios mais facilmente analisáveis e comparáveis de modo independente (Figura 2). A partir do momento em que essa hierarquia lógica está construída, os tomadores de decisão avaliam sistematicamente as alternativas por meio de comparação, de duas a duas, dentro de cada um dos critérios. Essa comparação pode utilizar dados concretos das alternativas ou julgamentos humanos como forma de informação subjacente [4].

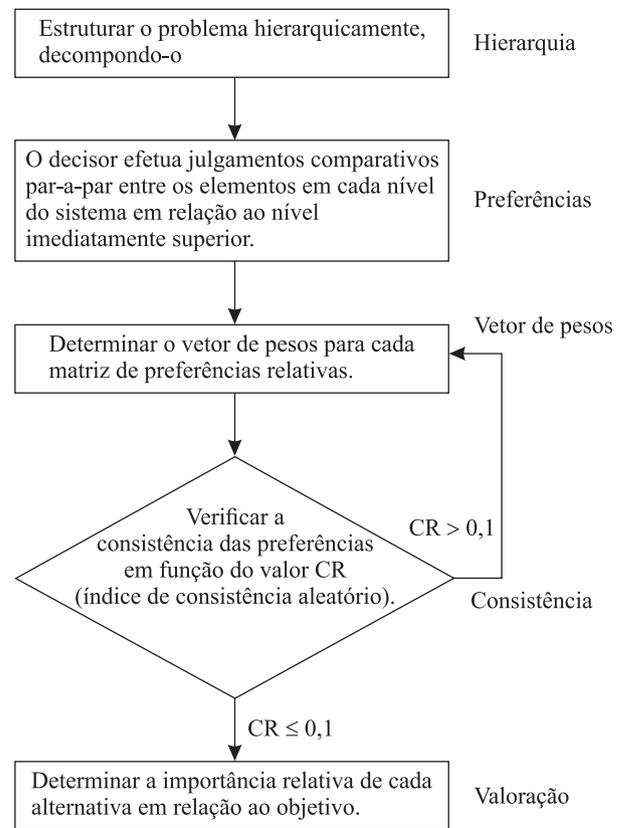


Figura 1 – Fluxograma de aplicação do AHP.

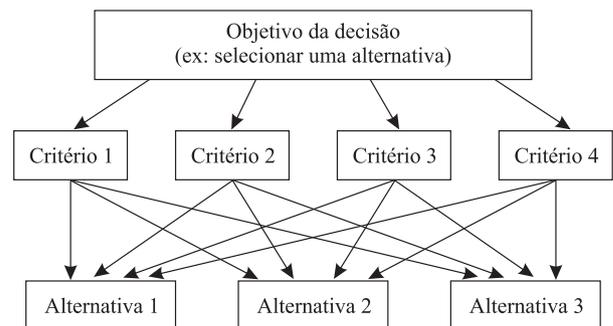


Figura 2 – Exemplo de hierarquia de critérios/objetivos [5].

O AHP transforma as comparações, muitas vezes empíricas, em valores numéricos que são processados e comparados. O peso de cada um dos fatores permite a avaliação de cada um dos elementos dentro da hierarquia definida. A partir do momento em que todas as comparações foram efetuadas e os pesos relativos entre os critérios a serem avaliados foram estabelecidos, a probabilidade numérica de cada uma das alternativas é calculada. Essa probabilidade determina a probabilidade que a alternativa tem de atender a meta estabelecida. Quanto maior a probabilidade, mais aquela alternativa contribui para a meta final [3].

De acordo com Saaty, o método AHP aproveita a capacidade humana de fazer julgamentos, ou seja, mesmo quando duas variáveis são incomparáveis, com o conhecimento e a experiência das pessoas, pode-se reconhecer qual dos critérios é mais importante [5].

A comparação entre dois elementos utilizando o AHP pode ser realizada de diferentes formas [6]. No entanto, a escala de relativa importância entre duas alternativas, proposta por Saaty [7] é a mais amplamente utilizada. Atribuindo valores que variam entre 1 a 9, a escala determina a importância relativa de uma alternativa com relação à outra, onde 1 corresponde a *igualmente preferido*, e 9 a *extremamente preferido*, conforme apresentado na Tabela 1.

Usualmente procura-se utilizar os números ímpares da tabela para assegurar razoável distinção entre os pontos da medição. O uso dos números pares só deve ser adotado quando existir a necessidade de negociação entre os avaliadores e quando o consenso natural não for obtido, gerando a necessidade de determinação de um ponto médio como solução negociada [8].

Portanto, com as alternativas e critérios já definidos, constrói-se uma matriz de comparação para cada critério a ser avaliado, tendo como base a regra sugerida por Saaty. A matriz é preenchida comparando-se os critérios que aparecem na coluna da esquerda em relação aos critérios que aparecem na linha superior (Tabela 2).

Para simplificar, vamos chamar os critérios de C1 e C2; se esses critérios, ao serem comparados, apresentarem C1 e C2 como sendo *igualmente preferido*, atribui-se o valor 1; se C1 for um pouco mais importante do que C2, ou seja, *moderadamente preferido*, atribui-se o valor 3; se C1 for *fortemente preferido* à C2, atribui-se o valor 5; e assim por diante, comparando-se todos os critérios par-a-par.

Tabela 1 – Escala fundamental de Saaty.

Escala	Avaliação	Recíproco	Comentário
Igualmente preferido	1	1	Os dois critérios contribuem igualmente para os objetivos
Moderadamente preferido	3	1/3	A experiência e o julgamento favorecem um critério levemente sobre o outro,
Fortemente preferido	5	1/5	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente sobre o outro
Muito fortemente preferido	7	1/7	Um critério é fortemente favorecido em relação a outro e pode ser demonstrado
Extremamente preferido	9	1/9	Um critério é favorecido em relação a outro com o mais alto grau de certeza
Valores intermediários	2, 4, 6 e 8	1/2; 1/4; 1/6 e 1/8	Quando o consenso não for obtido e houver necessidade de uma negociação

O reverso da comparação dos critérios é o valor inverso da escala apresentada, neste sentido um critério que seja *extremamente preferido* em relação a outro, ao se fazer a comparação inversa na matriz, o critério preterido terá tendencialmente uma classificação de 1/9, ou seja, o recíproco.

Se “A” é x vezes preferível a “B”, logo “B” é 1/x vezes preferível a “A” [4].

Um elemento é *igualmente importante* quando comparado com ele próprio, isto é, onde a linha 1 encontra a coluna 1, na posição (1,1), coloca-se o valor 1. Logo, a diagonal principal de uma matriz deve consistir em 1.

Tabela 2 – Matriz comparativa (supondo que o critério C1 domina o critério C2).

Crítérios	C1	C2	C3
C1	1	avaliação	
C2	1/avaliação	1	
C3			1
Total (Σ)			

Para interpretar e dar os pesos relativos a cada critério é necessário normalizar a matriz comparativa. A normalização é feita pela divisão entre cada valor da tabela com o total de cada coluna.

Através das comparações e seus respectivos pesos, o especialista irá determinar o quão importante é um critério específico em relação ao outro para a realização do objetivo. Por exemplo, se o critério A influencia mais do que o critério B em relação ao objetivo, quão mais significativa é essa influência? Este tipo de pergunta é a essência dessas comparações. Por isso, nesta etapa de comparações, o conhecimento do especialista desempenha um importante papel [9].

A determinação da contribuição de cada critério na meta organizacional é calculada a partir do vetor de prioridade ou vetor de Eigen. O vetor de Eigen apresenta os pesos relativos entre os critérios e é obtido de modo aproximado através da média aritmética dos valores de cada um dos critérios, ou seja, calcula-se o valor médio em cada linha da matriz normalizada para obter o peso relativo, onde o somatório dos valores do vetor sempre totaliza 1. Os valores encontrados para o vetor de Eigen tem significado físico direto no AHP. Ele determina a participação ou o peso daquele critério no resultado total da meta [3].

Sequencialmente é preciso verificar a inconsistência dos dados. A verificação visa verificar se os decisores foram consistentes nas suas opiniões para a tomada de decisão [10]. Se, por exemplo, o critério C1 é *mais preferível* que C2 e C2 é *mais preferível* que C3, seria inconsistente afirmar que C3 é *mais preferível* que C1.

Assim, o cálculo do índice de consistência [7] é dado pela seguinte equação:

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} \tag{1}$$

onde *CI* é o índice de consistência, *n* é o número de critérios avaliados e λ_{Max} o número principal de Eigen (λ_{Max}).

O autovetor ou vetor principal de Eigen (λ_{Max}) é obtido calculando-se o somatório do produto de cada elemento da matriz de comparação pelo vetor de prioridade (Eigen) de cada critério, dividindo-se o resultado dessa expressão pelo vetor de prioridade do qual calcula-se a média aritmética.

Visando verificar se o valor encontrado do índice de consistência (*CI*) é adequado, Saaty [7] propôs uma relação de consistência (*CR*), que é determinada pela razão entre o valor do índice de consistência (*CI*) e o índice de consistência aleatória (*RI*), conforme a expressão:

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,1 \sim 10\% \tag{2}$$

onde, *RI* é um valor constante e depende da dimensão da matriz que se está comparando, ou seja, do número de critérios avaliados, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Índices de consistência aleatória.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Do ponto de vista do AHP, é desejável que a *RC* de qualquer matriz de comparação seja menor ou igual a 0,10 (10%), o que seria considerada consistente. Quanto maior o resultado de *CR*, mais inconsistente é a matriz. Para valores maiores que 0,10 recomenda-se uma revisão da matriz de comparação.

3 Estudo de caso

A partir da proposta inicial deste artigo que visa apresentar o método Analytic Hierarchy Process (AHP) como ferramenta de apoio a tomada de decisão multicritério e, também, mostrar um estudo de caso evidenciando todos os passos do método em sua aplicação, optou-se por desenvolver um modelo que determine e priorize os critérios relevantes numa tomada de decisão quanto à seleção da melhor alternativa proposta em sistemas estruturais destinados a lajes.

3.1 Premissas

3.1.1 Premissas Globais

Como premissas globais deste estudo de caso, foram consideradas alternativas de sistemas de lajes destinadas a edifícios comerciais multiandares, uso e tipologia projeto-padrão CSL (Comercial, Salas e Lojas) conforme definição da NBR 12721 [11]; edificação localizada em região de grande densidade populacional onde há disponibilidade de mão de obra específica para execução de quaisquer das alternativas propostas; vãos entre apoios até 4m; carga acidental (uso) de 4,0 kN/m², em conformidade à NBR 6120 [12] e carga permanente (revestimento + forro) de 1,0 kN/m², portanto, uma “sobrecarga” de 5,0 kN/m² (500kgf/m²) além do peso próprio (variável conforme cada alternativa); instalações aparentes escondidas por uso de forro.

Das diversas alternativas possíveis, foram escolhidas quatro alternativas com características próprias, quando analisadas sob certos critérios. As alternativas propostas são:

- laje maciça de concreto armado;
- laje pré-fabricada (treliça + eps);
- laje pré-fabricada (painel);
- laje steel-deck.

3.1.2 Premissas Específicas

- Laje maciça de concreto armado

Seguindo a recomendação prática para determinação da espessura mínima de lajes maciças [13],

adotou-se espessura (h) igual a 10 cm, conforme a razão:

$$h_{\text{mínimo}} = \frac{l_{\text{menor}}}{40} \therefore h_{\text{mínimo}} = \frac{400}{40} = 10\text{cm} \quad (3)$$

onde, lmenor refere-se ao menor lado da laje, no caso, 4 m (400 cm) – vão entre apoios.

Para definir os insumos, adotaram-se as Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos – TCPO [14], conforme mostra a (Tabela 4):

Tabela 4 – Insumos (laje maciça).

consumo de concreto	0,24 m ³ /m ²
taxa de armadura	22,69 kg/m ²
taxa de forma	2,17 m ² /m ²
tempo de execução	2,84 h/m ²
uso de escoramento	total

• **Laje treliçada com lajotas de EPS**

Segundo a instrução técnica catálogo M3SP [15], foi adotado laje treliçada unidirecional com lajotas de EPS (NBR 14859-1) onde, para atender o vão de 400 cm entre apoios e sobrecarga de 500 kgf/m², adotou-se espessura de 16 cm.

Extraindo os insumos referenciados na tabela prática do fabricante e conforme a TCPO, tem se:

Tabela 5 – Insumos (laje treliçada + EPS).

consumo de concreto	0,056 m ³ /m ²
taxa de armadura	1,24 kg/m ²
taxa de fôrma	0,00 m ² /m ²
tempo de execução	1,83 h/m ²
m.o. civil	1,30 h/m ²
armador	0,10 h/m ²
carpinteiro	0,43 h/m ²
uso de escoramento	parcial

• **Laje painel treliçado maciço**

Conforme instrução técnica catálogo M3SP, foi adotado painel treliçado unidirecional sem enchimento onde, para atender o vão de 400 cm entre apoios e sobrecarga de 500 kgf/m², adotou-se espessura de 10 cm.

Com base nos insumos adquiridos por meio da TCPO e os insumos referenciados na tabela prática do fabricante, tem se:

Tabela 6 – Insumos (painel treliçado).

consumo de concreto	0,070 m ³ /m ²	
taxa de armadura	1,24 kg/m ²	
taxa de forma	0,00 m ² /m ²	
tempo de execução		
m.o. civil	1,55 h/m ²	2,29 h/m ²
armador	0,10 h/m ²	
carpinteiro	0,64 h/m ²	
uso de escoramento		parcial

Espessura (cm)	Sobrecarga (kg/m ²)								Peso Próprio (kg/m ²)	Consumo Concreto (m ³ /m ²)
	Vãos máximos X Sobrecargas									
	100	150	200	250	300	400	500	600		
12 (08+04)/42	5,40	5,10	4,75	4,55	4,35	4,00	3,75	3,60	140	0,051
16 (12+04)/49	6,75	6,35	6,00	5,70	5,45	5,05	4,75	4,50	160	0,056
20 (16+04)/59	7,95	7,50	7,10	6,75	6,45	6,00	5,70	5,40	160	0,060
24 (20+04)/59	9,30	8,80	8,35	7,95	7,60	7,20	6,75	6,00	180	0,066
30 (25+05)/59	11,00	10,50	10,05	9,60	9,25	8,70	8,25	7,85	220	0,084
35 (30+05)/59	12,60	12,00	11,50	11,05	10,70	10,10	9,50	9,10	240	0,091
40 (35+05)/59	-	-	12,90	12,40	12,00	11,40	10,80	10,30	260	0,099

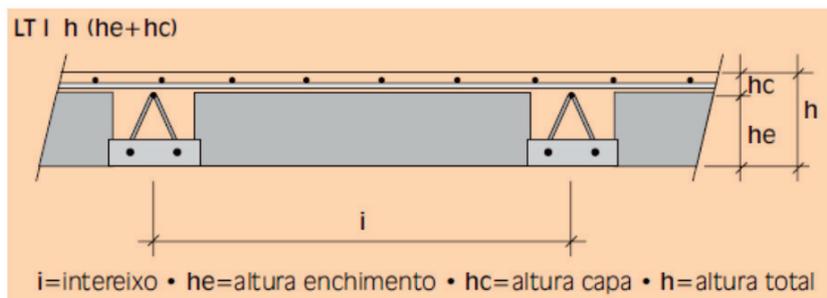


Figura 3 – Dados técnicos do fabricante – laje treliçada com lajotas de EPS

• Laje mista – Steel Deck

A partir das informações técnicas do catálogo Metform [16], foi adotada laje mista com fôrma incorporada, modelo Steel Deck MF75 onde, para atender o vão de 400 cm entre apoios e sobrecarga de 500 kgf/m², adotou-se altura da laje de 18 cm e espessura da fôrma de 1,25 mm.

Adotando os insumos referenciados na tabela prática do fabricante e conforme a TCPO, tem se:

Tabela 7 – Insumos (steel deck).

consumo de concreto	0,1425 m ³ /m ²	
taxa de armadura	1,80 kg/m ²	
taxa de forma	0,00 m ² /m ²	
tempo de execução		
m.o. civil	0,93 h/m ²	1,18 h/m ²
montagem	0,25 h/m ²	
uso de escoramento		nenhum

Espessura (cm)	Sobrecarga (kg/m ²)								Peso Próprio (kg/m ²)	Consumo Concreto (m ³ /m ²)
	Vãos máximos X Sobrecargas									
	100	150	200	250	300	400	500	600		
M 8 (03+05)	4,80	4,55	4,30	4,10	3,90	3,60	3,40	3,20	200	0,050
M 9 (03+06)	5,25	4,95	4,70	4,50	4,35	4,05	3,80	3,60	225	0,060
M10 (03+07)	5,70	5,40	5,20	5,00	4,75	4,40	4,20	3,95	250	0,070
M11 (03+08)	6,10	5,80	5,55	5,35	5,10	4,80	4,55	4,30	275	0,080
M12 (03+09)	6,50	6,20	5,90	5,70	5,50	5,20	4,90	4,65	300	0,090
M15 (03+12)	7,60	7,30	7,00	6,80	6,60	6,25	5,95	5,65	375	0,120

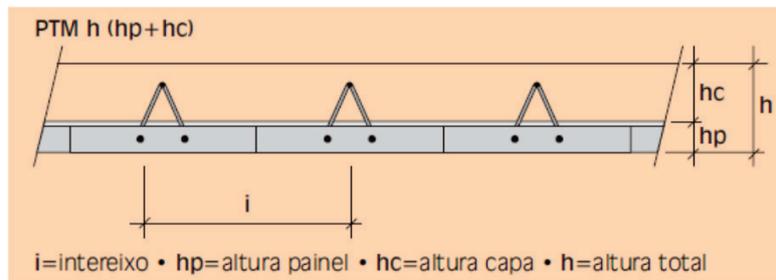


Figura 4 – Dados técnicos do fabricante – painel treliçado maciço.

Altura total da laje (mm)	Consumo de Concreto (m ³ /m ²)	Tipo de armadura para retração, em tela soldada		
		Denominação	Composição	Peso (kg/m ²)
130	0,0925	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
140	0,1025	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
150	0,1125	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
160	0,1225	Q - 92	ø4,2 x ø4,2 - 150x150	1,48
170	0,1325	Q - 113	ø3,8 x ø3,8 - 100x100	1,80
180	0,1425	Q - 113	ø3,8 x ø3,8 - 100x100	1,80
190	0,1525	Q - 138	ø4,2 x ø4,2 - 100x100	2,20
200	0,1625	Q - 138	ø4,2 x ø4,2 - 100x100	2,20

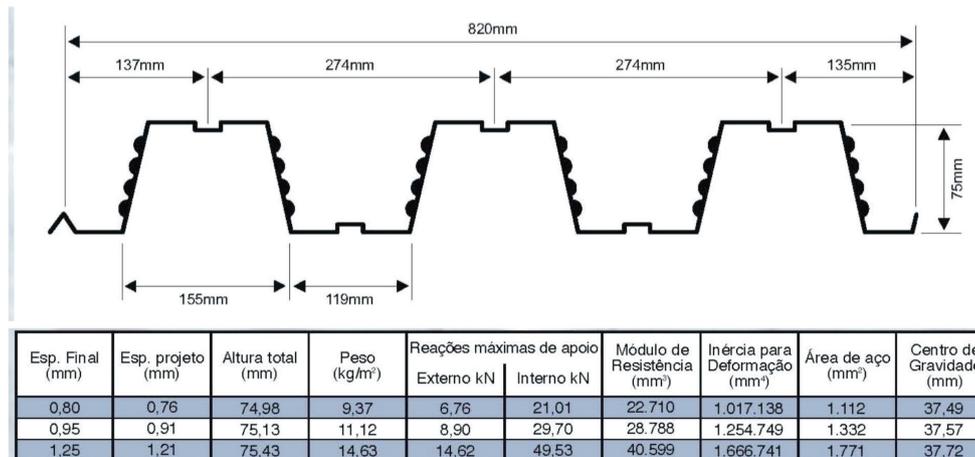


Figura 5 – Dados técnicos do fabricante – laje mista steel deck.

3.2 Critérios

Recorrendo-se a um processo de brainstorming foi possível identificar e determinar quais critérios são relevantes na escolha de um sistema de laje. Com base nesse processo fundamentou-se a decisão de trabalhar com os critérios de maior incidência na pesquisa e que apresentaram correlação ao custo (insumos), pois intuitivamente, os decisores, na escolha de sistemas estruturais, estabelecem a relação de preço como fundamental, associada ao tempo.

Assim, definindo preço, conforme NBR 5670/77 [17], preço é o somatório das remunerações recebidas em troca da obtenção de um produto final, obra acabado ou consecução de um serviço. Em outras palavras, preço é o somatório dos custos diretos, custos indiretos, percentual de lucro desejado, impostos, variações e correções inflacionárias.

Portanto, optou-se pela análise de custeio, isto é, custos diretos, devido a sua não variação no espaço, no tempo e executante, pois os insumos em um mesmo método são invariáveis.

Definindo custo, segundo NBR 5670/77, custo é o somatório dos dispêndios (insumos) efetuados para elaboração do produto final, obra acabado ou consecução de um serviço.

Ainda, sob a ótica custo, analisando que são insumos comuns às alternativas, o consumo de concreto, armadura e fôrma, selecionou-se inicialmente como critérios:

- consumo de Concreto (m^3/m^2) → refere-se a a relação volumétrica do consumo de concreto em função da área construída para a edificação que atende às premissas deste estudo;
- taxa de Armadura (kg/m^2) → refere-se a uma simplificação do projeto de armadura em um consumo unitário de aço em função de outra unidade de medida (área ou volume) por área construída para a edificação que atende às premissas deste estudo;
- taxa de Fôrma (m^2/m^2) → refere-se a uma simplificação do projeto de fôrma em um consumo unitário de fôrma em função de outra unidade de medida (área) por área construída para a edificação que atende às premissas deste estudo.

Sob a ótica do tempo considera-se o critério Tempo de Execução, a qual se refere ao tempo de mobilização (formas e cimbramento), tempo de execução (armadura, concretagem, enchimento) e tempo de desmobilização (cura, desfôrma e desimbramento), medido em h/m².

E, finalmente, sob a ótica da Necessidade de Escoramento, considerou-se apenas a necessidade

Figura 6 – Tabela prática – steel deck.

Altura total da laje (mm)	Espessura da Seal Deck (mm)	Válvulas Máximas sem Escoramento		Peso Próprio (kN/m ²)	M. Inércia Laje Mistra (10 ⁶ m ⁴ /m)	Válvulas Máximas										sem Escoramento									
		Simples (mm)	Duplos (mm)			Tripos (mm)	Balanço (mm)	2.000	2.100	2.200	2.300	2.400	2.500	2.600	Carga sobposta	2.700	2.800	2.900	3.000	3.150	3.300	3.500	3.750	4.000	
130	0,95	2.350	3.200	3.300	1.150	2,27	10,66	11,87	10,56	9,42	8,43	7,56	6,79	6,11	5,51	4,96	4,47	4,03	3,45	2,94	2,37	1,77	1,29		
	1,25	3.650	4.300	4.400	1.650	2,32	12,74	18,83	16,94	15,31	13,88	12,62	11,50	10,51	9,63	8,84	8,13	7,48	6,63	5,88	5,03	4,15	3,42		
140	0,95	2.200	3.100	3.200	1.150	2,50	13,17	13,16	11,71	10,45	9,35	8,39	7,54	6,78	6,11	5,51	4,97	4,48	3,83	3,27	2,63	1,98	1,44		
	1,25	3.500	4.150	4.250	1.600	2,55	15,68	20,00	18,79	16,98	15,39	14,00	12,76	11,67	10,69	9,81	9,02	8,31	7,36	6,53	5,59	4,61	3,81		
150	0,95	2.000	3.000	3.100	1.100	2,74	16,06	14,46	12,86	11,48	10,28	9,22	8,28	7,45	6,72	6,06	5,46	4,93	4,22	3,60	2,90	2,18	1,59		
	1,25	3.400	4.000	4.100	1.550	2,79	19,05	20,00	17,28	15,45	13,87	12,49	11,27	10,20	9,24	8,39	7,63	6,95	6,33	5,51	4,80	3,98	3,14	2,45	
160	0,95	1.850	2.900	3.000	1.100	2,97	19,35	15,75	14,02	12,51	11,20	10,04	9,03	8,12	7,32	6,60	5,95	5,37	4,60	3,93	3,17	2,38	1,73		
	1,25	3.250	3.900	4.000	1.500	3,02	22,90	20,00	18,83	16,84	15,11	13,61	12,28	11,11	10,07	9,32	8,57	7,90	7,01	6,23	5,35	4,35	3,43	2,68	
170	0,95	1.700	2.800	2.900	1.050	3,21	23,07	17,04	15,17	13,54	12,12	10,87	9,77	8,90	7,93	7,15	6,45	5,82	4,98	4,26	3,43	2,58	1,88		
	1,25	3.150	3.800	3.900	1.450	3,26	27,24	20,00	18,22	16,36	14,72	13,29	12,03	10,91	9,90	9,01	8,20	7,47	6,51	5,67	4,71	3,72	2,91		
180	0,95	1.550	2.750	2.850	1.050	3,44	27,25	18,34	16,32	14,57	13,04	11,70	10,52	9,47	8,53	7,69	6,94	6,26	5,37	4,59	3,70	2,78	2,03		
	1,25	3.050	3.700	3.800	1.450	3,50	32,10	20,00	19,61	17,60	15,84	14,30	12,94	11,74	10,66	9,69	8,83	8,04	7,00	6,10	5,07	4,01	3,14		
190	0,95	1.450	2.650	2.750	1.000	3,68	31,92	19,63	17,47	15,60	13,96	12,53	11,26	10,14	9,14	8,24	7,44	6,71	5,75	4,91	3,96	2,98	2,18		
	1,25	3.000	3.600	3.700	1.400	3,70	33,75	20,00	20,00	18,84	16,96	15,32	13,86	12,57	11,41	10,38	9,45	8,62	7,50	6,54	5,44	4,30	3,36		
200	0,95	1.400	2.600	2.650	1.000	3,91	37,10	20,00	18,62	16,63	14,88	13,35	12,00	10,81	9,74	8,79	7,93	7,16	6,13	5,24	4,23	3,19	2,33		
	1,25	2.900	3.500	3.650	1.400	3,97	43,51	20,00	20,00	20,00	18,08	16,33	14,78	13,40	12,17	11,07	10,08	9,19	8,00	6,97	5,80	4,59	3,59		

completa, parcial ou não de sua implantação, configurando assim, um critério de característica qualitativa.

3.3 Aplicação do Método

Definida a meta global, os objetivos, os critérios e as alternativas estrutura-se o problema de forma a orientar a aplicação do método AHP, conforme a Figura 7.

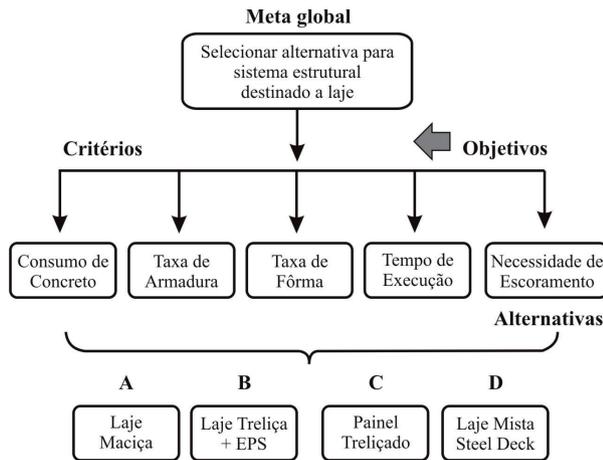


Figura 7 – Modelo hierárquico de estruturação do problema

3.3.1 Análise dos Insumos

A Tabela 8 apresenta a matriz comparativa dos insumos de cada alternativa à luz de cada critério. Essa base quantitativa e qualitativa norteou a estruturação das demais matrizes comparativas.

3.3.2 Análise dos Critérios

A partir da montagem da hierarquia, os critérios precisam ser avaliados dois a dois, visando determinar a importância relativa entre eles e seu peso relativo na meta global. A Tabela 9 apresenta os dados de peso relativo entre os critérios determinado pelos tomadores de decisão.

Como já citado no item 2, a matriz de comparação precisa ser normalizada e isso é feito dividindo-se cada valor da tabela com o total de cada coluna (Tabela 10).

Calculando-se a média aritmética em cada linha da matriz normalizada, ou seja, o vetor de prioridade (Vetor Eigen), pode-se determinar a contribuição de cada critério na meta global (Tabela 11).

Para o cálculo do número principal de Eigen (λ_{Max}), determinou-se inicialmente a média das consistências, conforme expressão abaixo e resultados registrados na Tabela 12:

Tabela 8 – Comparativo dos Insumos.

Alternativas	Critérios				
	Consumo de Concreto (m ³ / m ²)	Taxa de Armadura (kg / m ²)	Taxa de Forma (m ² / m ²)	Tempo de Execução	Necessidade de Escoramento
Laje Maciça	0,2400	22,69	2,17	2,84	total
Treliça + EPS	0,0560	1,24	0,00	1,83	parcial
Painel	0,7000	1,24	0,00	2,29	parcial
Steel Deck	0,1425	1,80	0,00	1,18	nenhum

Tabela 9 – Matriz Comparativa do grupo de Critérios.

	Consumo de Concreto	Taxa de Armadura	Taxa de Forma	Tempo de Execução	Necessidade de Escoramento
Consumo de Concreto	1	1/5	1/3	1/7	3
Taxa de Armadura	5	1	3	1/5	7
Taxa de Forma	3	1/3	1	1/6	5
Tempo de Execução	7	5	6	1	9
Necessidade de Escoramento	1/3	1/7	1/5	1/9	1
Total	16,33	6,68	10,53	1,62	25,00

Tabela 10 – Matriz Comparativa Normalizada do grupo de Critérios.

	Consumo de Concreto	Taxa de Armadura	Taxa de Forma	Tempo de Execução	Necessidade de Escoramento
Consumo de Concreto	$1/16,33 = 0,0612$	0,0300	0,0316	0,0881	0,1200
Taxa de Armadura	$5/16,33 = 0,3061$	0,1498	0,2848	0,1232	0,2800
Taxa de Forma	$3/16,33 = 0,1837$	0,0499	0,0949	0,1058	0,2000
Tempo de Execução	$7/16,33 = 0,4586$	0,7489	0,5696	0,6170	0,3600
Necessidade de Escoramento	$0,33/16,33 = 0,0204$	0,0214	0,0190	0,0686	0,0400

Tabela 11 – Cálculo do Vetor de Eigen.

	Cálculo	Vetor Eigen	
Consumo de Concreto	$[0,0612 + 0,0300 + 0,0316 + 0,0881 + 0,1200]/5$	0,0662	6,62%
Taxa de Armadura	$[0,3061 + 0,1498 + 0,2848 + 0,1232 + 0,2800]/5$	0,2288	22,88%
Taxa de Forma	$[0,1837 + 0,0499 + 0,0949 + 0,1058 + 0,2000]/5$	0,1263	12,63%
Tempo de Execução	$0,4586 + 0,7489 + 0,5696 + 0,6170 + 0,3600]/5$	0,5448	54,48%
Necessidade de Escoramento	$[0,0204 + 0,0214 + 0,0190 + 0,0686 + 0,0400]/5$	0,0339	3,39%

Tabela 12 – Cálculo do Eigen (λ_{Max}).

	Consumo de Concreto	Taxa de Armadura	Taxa de Forma	Tempo de Execução	Necessidade de Escoramento	Vetor Eigen
Consumo de Concreto	1	1/5	1/3	1/7	3	0,0662
Taxa de Armadura	5	1	3	1/5	7	0,2288
Taxa de Forma	3	1/3	1	1/6	5	0,1263
Tempo de Execução	7	5	6	1	9	0,5448
Necessidade de Escoramento	1/3	1/7	1/5	1/9	1	0,0339
Média das Consistências	5,0381	5,6143	5,2369	5,9006	5,1495	
Eigen Principal (λ_{Max})			5,3879			

$$\left[\frac{(1 \cdot 0,0662) + (\frac{1}{5} \cdot 0,2288) + (\frac{1}{3} \cdot 0,1263) + (\frac{1}{7} \cdot 0,5448) + (3 \cdot 0,0339)}{0,0662} \right] = 5,0381$$

$$\left[\frac{(5 \cdot 0,0662) + (1 \cdot 0,2288) + (3 \cdot 0,1263) + (\frac{1}{5} \cdot 0,5448) + (7 \cdot 0,0339)}{0,2288} \right] = 5,6143$$

$$\left[\frac{(3 \cdot 0,0662) + (\frac{1}{3} \cdot 0,2288) + (1 \cdot 0,1263) + (\frac{1}{6} \cdot 0,5448) + (5 \cdot 0,0339)}{0,1263} \right] = 5,2369$$

$$\left[\frac{(7 \cdot 0,0662) + (5 \cdot 0,2288) + (6 \cdot 0,1263) + (1 \cdot 0,5448) + (9 \cdot 0,0339)}{0,5448} \right] = 5,9006$$

$$\left[\frac{(\frac{1}{3} \cdot 0,0662) + (\frac{1}{7} \cdot 0,2288) + (\frac{1}{5} \cdot 0,1263) + (\frac{1}{9} \cdot 0,5448) + (1 \cdot 0,0339)}{0,0339} \right] = 5,1495$$

$$\lambda_{\max} = \left[\frac{5,0381 + 5,6143 + 5,2369 + 5,9006 + 5,1495}{5} \right] = 5,3879$$

Para verificar se os dados são consistentes, calcula-se o índice de consistência (CI), aplicando-se a Equação (1):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \therefore CI = \frac{5,3879 - 5}{5 - 1} \Rightarrow CI = 0,097$$

Verificando se o valor encontrado do índice de consistência (CI) é adequado, aplica-se a Equação (2) para verificar a relação de consistência (CR):

$$CR = \frac{CI}{RI} \therefore CR = \frac{0,097}{1,12} \Rightarrow CR = 0,0866$$

Tabela 12 – Cálculo do Eigen (λ_{\max}).

	Consumo de Concreto	Taxa de Armadura	Taxa de Forma	Tempo de Execução	Necessidade de Escoramento	Vetor Eigen
Consumo de Concreto	1	1/5	1/3	1/7	3	0,0662
Taxa de Armadura	5	1	3	1/5	7	0,2288
Taxa de Forma	3	1/3	1	1/6	5	0,1263
Tempo de Execução	7	5	6	1	9	0,5448
Necessidade de Escoramento	1/3	1/7	1/5	1/9	1	0,0339
Média das Consistências	5,0381	5,6143	5,2369	5,9006	5,1495	
Eigen Principal (λ_{\max})			5,3879			

Como o valor de CR é menor que 10% (0,10) a matriz pode ser considerada consistente.

O gráfico da Figura 8 mostram os resultados de prioridade para o grupo de critério e seu respectivo índice de inconsistência (CI).

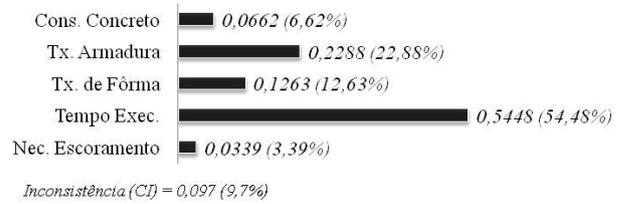


Figura 8 – Resultados de prioridade para o grupo de critérios.

Portanto, na priorização do grupo de critérios, o critério Tempo de Execução é o critério mais relevante (54,48%) dentre o grupo, ou seja, ele é o critério que mais contribui para a meta global. O critério que menos contribui (3,39%) é o critério Necessidade de Escoramento. Pode-se dizer que uma avaliação positiva no critério Tempo de Execução contribui aproximadamente 16 vezes mais do que uma avaliação positiva no critério Necessidade de Escoramento.

3. 3. 3 Análise das Alternativas

Com a árvore estruturada e as prioridades dos critérios estabelecidas, é possível determinar como cada alternativa proposta comporta-se em relação aos critérios estabelecidos.

Da mesma maneira que foi realizada a priorização dos critérios, as alternativas propostas são

comparadas duas a duas à luz de cada critério estabelecido, conforme apresentam as cinco tabelas seguintes.

Tabela 13 – Matriz Comparativa das alternativas à luz do critério Consumo de Concreto.

	Consumo de Concreto (m ³ /m ²)			
	Laje Maciça	Laje Treliçada + EPS	Painel Treliçado	Laje Mista Steel Deck
Laje Maciça	1	1/9	1/8	1/3
Laje Treliçada + EPS	9	1	3	7
Painel Treliçado	8	1/3	1	5
Laje Mista Steel Deck	3	1/7	1/5	1

Tabela 14 – Matriz Comparativa das alternativas à luz do critério Taxa de Armadura.

	Taxa de Armadura (kg/m ²)			
	Laje Maciça	Laje Treliçada + EPS	Painel Treliçado	Laje Mista Steel Deck
Laje Maciça	1	1/9	1/9	1/8
Laje Treliçada + EPS	9	1	1	2
Painel Treliçado	9	1	1	2
Laje Mista Steel Deck	8	1/2	1/2	1

Tabela 15 – Matriz Comparativa das alternativas à luz do critério Taxa de Fôrma.

	Taxa de Fôrma (m ² /m ²)			
	Laje Maciça	Laje Treliçada + EPS	Painel Treliçado	Laje Mista Steel Deck
Laje Maciça	1	1/9	1/9	1/9
Laje Treliçada + EPS	9	1	1	1
Painel Treliçado	9	1	1	1
Laje Mista Steel Deck	9	1	1	1

Tabela 16 – Matriz Comparativa das alternativas à luz do critério Tempo de Execução.

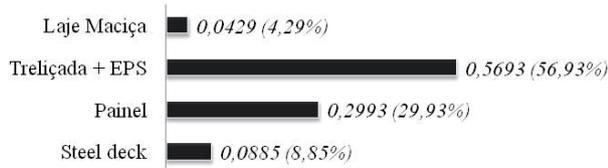
	Tempo de Execução (h/m ²)			
	Laje Maciça	Laje Treliçada + EPS	Painel Treliçado	Laje Mista Steel Deck
Laje Maciça	1	1/7	1/3	1/9
Laje Treliçada + EPS	7	1	3	1/5
Painel Treliçado	3	1/3	1	1/7
Laje Mista Steel Deck	9	5	7	1

Tabela 17 – Matriz Comparativa das alternativas à luz do critério Necessidade de Escoramento.

	Necessidade de Escoramento (qualitativo)			
	Laje Maciça	Laje Treliçada + EPS	Painel Treliçado	Laje Mista Steel Deck
Laje Maciça	1	1/3	1/3	1/9
Laje Treliçada + EPS	3	1	1	1/5
Painel Treliçado	3	1	1	1/5
Laje Mista Steel Deck	9	5	5	1

4 Resultados

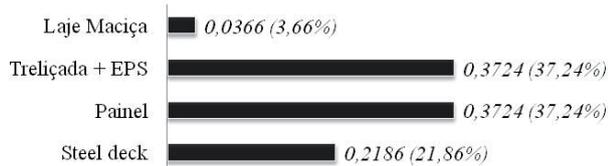
Calculadas as prioridades e os índices de inconsistência é possível determinar o peso relativo de cada uma das alternativas em cada um dos critérios conforme apresentado nos cinco gráficos a seguir (um gráfico para cada critério).



Inconsistência (CI) = 0,057 (5,7%)

Figura 9 – Resultados de prioridade para o grupo de alternativas à luz do critério Consumo de Concreto

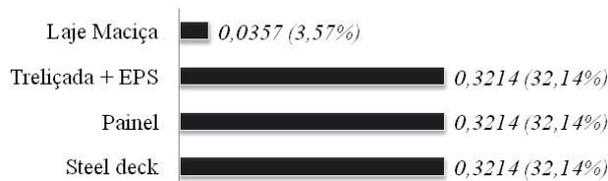
Observa-se que à luz do critério Consumo de Concreto a alternativa mais preferível (56,93%) é a alternativa Laje Treliçada com lajotas de EPS, ou seja, é a alternativa que consome menor volume de concreto. Já a alternativa Laje Maciça é a menos preferível à luz deste critério, sua preferência é de 4,29%, ou seja, é a alternativa que consome maior volume de concreto.



Inconsistência (CI) = 0,014 (1,4%)

Figura 10 – Resultados de prioridade para o grupo de alternativas à luz do critério Taxa de Armadura

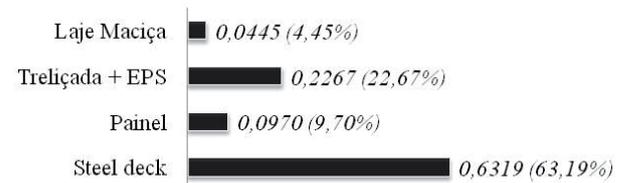
À luz do critério Taxa de Armadura as duas alternativas igualmente mais preferíveis (37,24%) são as alternativas, Laje Treliçada com lajotas de EPS e Painel Treliçado, ou seja, são as alternativas que apresentam menor taxa de armadura. A alternativa Laje Maciça é a menos preferível (3,66%).



Inconsistência (CI) = 0,000 (0%)

Figura 11 – Resultados de prioridade para o grupo de alternativas à luz do critério Taxa de Forma

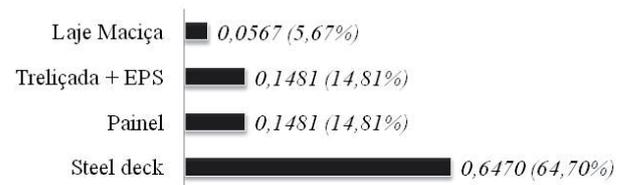
À luz do critério Taxa de Forma a alternativa menos preferível (3,57%) é a alternativa Laje Maciça. As demais alternativas são igualmente preferíveis (32,14%).



Inconsistência (CI) = 0,070 (7,0%)

Figura 12 – Resultados de prioridade para o grupo de alternativas à luz do critério Tempo de Execução

À luz do critério Tempo de Execução, o critério mais importante na contribuição da meta global, a alternativa Laje Mista – Steel Deck é a mais preferível (63,19%). Em outras palavras, é a alternativa que apresenta menor tempo de execução. A alternativa Laje Maciça é a menos preferível (4,45%).



Inconsistência (CI) = 0,010 (1,0%)

Figura 13 – Resultados de prioridade para o grupo de alternativas à luz do critério Necessidade de Escoramento

À luz do critério Necessidade de escoramento, a alternativa Laje Mista – Steel Deck é a mais preferível (64,70%), pois dispensa o uso de escoramentos. A alternativa Laje Maciça é a menos preferível (5,67%).

O cruzamento entre todas as avaliações das alternativas em todos os critérios determina a prioridade final de cada alternativa com relação à meta. O cálculo da prioridade final pode ser determinado pelo somatório dos produtos entre o peso de prioridade da alternativa e o peso do critério, conforme demonstrado na Tabela 18.

Com base na Figura 14, a alternativa que melhor atende as metas definidas é a alternativa Laje Mista – Steel Deck (46,26%), haja vista que o critério Tempo de Execução é o critério mais relevante (54,48%) dentre o grupo de critérios, ou seja, é o critério que mais contribui para a meta global.

Ainda, para destacar a importância da diferença entre os pesos de cada alternativa, a opção Steel Deck

(46,26%) atende aproximadamente 11 vezes mais à meta do que a alternativa Laje Maciça (4,19%).

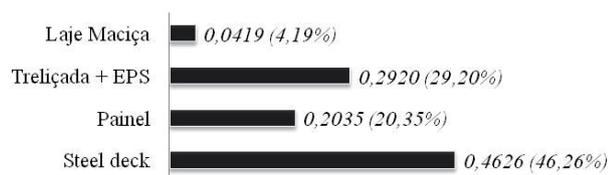


Figura 14 – Resultados finais para as prioridades

5 Discussão e Conclusões

Neste artigo buscou-se apresentar o método Analytic Hierarchy Process (AHP) como ferramenta de apoio à decisão multicritério, aplicando-o em um estudo de caso e evidenciando todos os passos do modelo.

A aplicação do método permite que os decisores tenham uma ferramenta específica e matemática de apoio à decisão, que suporta e qualifica as decisões, além de permitir justificar as escolhas e simular os resultados [3].

Embora, a entrada de dados seja simples e caracterizada pela comparação par a par das alternativas à luz de critérios específicos, um dos principais pontos observados neste estudo de caso, foi a disciplina e atenção necessárias que se devem ter na estruturação das matrizes comparativas a fim de que os critérios não sejam inconsistentes. O índice de consistência é um fator sensível e relevante no processo decisório, pois

implica na homogeneização do conhecimento quanto à decisão a ser tomada. Enquanto não se obtém o índice satisfatório, o processo não deve prosseguir.

No entanto, na verificação do índice de consistência, a tolerância (< 10%) adotada na determinação da taxa de consistência é questionável e há pouca discussão sobre isso nas fontes bibliográficas. Fica a questão; essa tolerância não poderia ser um pouco maior? Por que exatamente 10% é o limite? Assim, é válido apontar, como próximos trabalhos, a necessidade de se avaliar os desvios toleráveis expressos pela taxa de consistência (CR) e o próprio índice de consistência aleatória (RI) proposto por Saaty.

A aplicação de métodos para tomada de decisão existentes na área da “ciência das decisões” ainda tem um campo fértil à explorar no ambiente da construção civil, onde apenas as relações custo/benefício, vantagens/desvantagens podem não reduzir as incertezas no processo decisório no mundo dinâmico de hoje. Assim, sugere-se a aplicação de outros métodos de decisão em diversos problemas no campo da construção civil.

Referências

- [1] BHUSHAN, N.; RAI, K (2004). **Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process**. New York: Springer.
- [2] TRIANTAPHYLLOU, E. (2002). **Multi-Criteria Decision Making Methods: a comparative study**. New York: Springer.

Tabela 18 – Avaliação final das alternativas à luz do grupo de critérios.

Critério	Peso do Critério	Peso da Alternativa			
		Laje Maciça	Laje Treliçada + EPS	Painel Treliçado	Laje Mista Steel Deck
Consumo de Concreto	0,0662	0,0429	0,5693	0,2993	0,0885
Taxa de Armadura	0,2288	0,0366	0,3724	0,3724	0,2186
Taxa de Forma	0,1263	0,0357	0,3241	0,3241	0,3214
Tempo de Execução	0,5448	0,0445	0,2267	0,0970	0,6319
Necessidade de Escoramento	0,0339	0,0567	0,1481	0,1481	0,6470
Total (Σ)	1	0,0419	0,2920	0,2035	0,4626
		Σ Peso Critério x Peso Alternativa			

- [3] VARGAS, R. (2010). **Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process – AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio**. PMI Global Congress, North America, Washington–DC – EUA, 22p. Disponível em: <http://www.ricardo-vargas.com/wp-content/uploads/downloads/articles/ricardo_vargas_ahp_project_selection_pt.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2013
- [4] SAATY, T. L. (2008). **Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process**. Madrid: Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics. Disponível em: <<http://www.rac.es/ficheros/doc/00576.PDF>>. Acesso em 04 jul. 2013.
- [5] SAATY, T. L. (1991). **Método de análise hierárquica**. São Paulo: Makron Books.
- [6] TRIANTAPHYLLOU, E., MANN S. H. (1995). **Using The Analytic Hierarchy Process For Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges**. International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice, Vol. 2, n. 1, p. 35-44. Disponível em: <http://www.csc.lsu.edu/trianta/Journal_PAPERS1/AHPapls1.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2013.
- [7] SAATY, T. L. (2005). **Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks**. Pittsburgh: RWS Publications.
- [8] SAATY, T. L. (1980). **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill International.
- [9] CRUZ, Rafael Barreto Castelo da. **Aplicação de Modelo de Decisão Multicritério para apoio às tomadas de decisão na incorporação de edifícios comerciais de pequeno porte**. 2013. 126 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo.
- [10] TEKNO, K. (2006). **Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial**. Disponível em: <<http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/ahp/>>. Acesso em: 18 mar. 2013.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-12721: **Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2007. 91p.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980. 5p.
- [13] BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Concreto Armado, eu te amo**. Vol. 1, 5.ed. São Paulo: Editora Blucher, 2008.
- [14] TCPO. **Tabelas de composições de preços para orçamentos**. 13. ed. São Paulo: Pini, 2010. 630p.
- [15] M3SP. **Catálogo Técnico**. Disponível em: <<http://www.m3sp.com.br/catalogo-2010-01.pdf>>. Acesso em 29 out. 2013.
- [16] METFORM. **Catálogo Técnico**. Disponível em: < <http://www.metform.com.br/telha-forma-catalogo-tecnico.php>>. Acesso em 26 set. 2013.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5670: **Seleção e contratação de serviços e obras de engenharia e arquitetura de natureza privada**. Rio de Janeiro, 1977. 19p.