

# Método de Tomada de Decisões de Reforços em Vigas

*Rafael Barreto Castelo da Cruz<sup>1</sup>*  
*Arnoldo Mesquita Filho<sup>2</sup>*  
*Dayane Ambrogi Gualberto Eguthi<sup>3</sup>*  
*Jackeliny Flores de Oliveira Santos<sup>3</sup>*  
*Janaina Flores de Oliveira Santos<sup>3</sup>*  
*Valmik Celeste Alvarado<sup>3</sup>*

## Resumo

Este artigo é originário de projeto de pesquisa realizado na Universidade Nove de Julho e tem como objetivo propor um processo metodológico de apoio a decisão para reforços estruturais em vigas, o pressuposto dar-se-á no possível incremento de carga resistente ao elemento original. Para criação desse processo metodológico, a metodologia aplicada no trabalho inicia pelo dimensionamento do elemento original, dimensionamento dos possíveis reforços, estabelecimento dos critérios decisórios aplicados ao estudo de caso, levantamento do comportamento das alternativas em razão de cada um dos critérios e aplicação, por fim, de tomada de decisão com abordagem multicritério, usando o modelo AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para a escolha do melhor reforço dentre as alternativas e os critérios apresentados.

**Palavras-chave:** AHP; *Analytic Hierarchy Process*; Reforço; Viga; Tomada de decisão.

## 1 Introdução

Uma das empregabilidades do reforço estrutural está correlacionada com uma reclassificação de cargas sobre elementos estruturais, caso muito comum em edificações que após sua execução e decorrência do uso receberam (ou receberão) uma nova destinação, ou mesmo, foram subdivididas ou alteradas estruturalmente, recebendo novos esforços pontuais ou distribuídos. Por essa razão culminado com a necessidade de reforço, a fim de, garantir e manter a estrutura e sua estabilidade dentro das normas e garantindo seu desempenho, principalmente, quanto a segurança, qualidade, conforto e durabilidade, requisitos essenciais para o usuário final.

A prática de alteração de estruturas por usuários futuros não é algo incomum, porém, muitas vezes estas práticas são executadas sem maiores controles ou discorrem baseadas em métodos não confiáveis, e em alguns casos acabam por adotar soluções imediatas, com o propósito de concluir o reforço o quanto antes.

Por essa razão considerando apenas o problema imediato sem, de fato, analisar outros possíveis métodos de reforço, tampouco, se esses seriam propícios ao caso.

Essa escolha fundamental para a eficiência da obra, e conseqüente sucesso do empreendimento, pois a escolha correta do sistema de reforço estrutural pode, até mesmo, determinar se o reforço é viável ou não.

Embora, a resposta para essa pergunta pareça simples, mesmo sendo carente de uma atenção especial, na maioria das vezes, é baseada apenas na experiência prática do profissional ou em simples listas comparativas de vantagens e desvantagens, que por si só não são suficientes para uma correta avaliação e tomada de decisão, estas simplificações podem ser visualizadas, de forma genérica na Figura 1.

Assim, para que a tomada de decisão não se torne intuitiva e não deixe de considerar critérios relevantes, propõe-se o uso de uma ferramenta de apoio à decisão multicritério, por meio do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) aplicado ao caso de seleção e/ou decisão na escolha de um sistema de reforço em vigas

---

1 M.HSc. em Engenharia Civil e Docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Nove de Julho – Uninove – São Paulo-SP, Brasil. rafaelcastelo@uninove.br  
2 Engenheiro Civil, e Docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Nove de Julho – Uninove. São Paulo-SP, Brasil. arnoldo.mesquita@uninove.br  
3 Graduandos em Engenharia Civil na Universidade Nove de Julho – Uninove, São Paulo – SP, Brasil.

de concreto, dentro de possíveis alternativas, tais como aumento da seção transversal de concreto armado, reforço com adição de chapas de aço coladas, reforço por protensão, estas alternativas analisadas a luz do critérios tempo de execução do reforço, necessidade ou interface com o isolamento da área, desempenho quanto a manutenibilidade, e por fim o custo material.

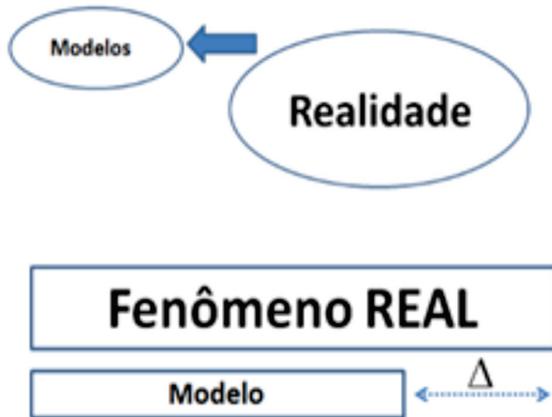


Figura 1 – Modelo X Realidade – Incerteza [3].

## 2 Reforço por Aumento da Seção Transversal da Viga

Reabilitar uma estrutura de concreto armado é restabelecer sua funcionalidade ao nível original ou superior. A necessidade de reforço estrutural está geralmente associada a uma mudança de utilização da

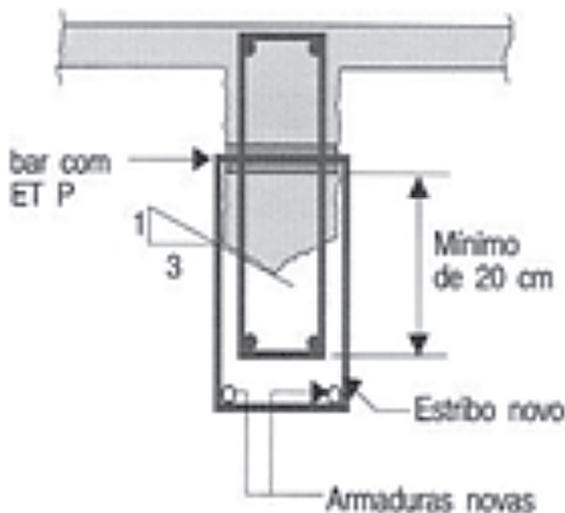


Figura 2 – Reforço por Adição de Armadura [9]; reforço por adição de armadura convencional (bordo tracionado).

estrutura ou como uma alternativa para o incrementar a sua capacidade de suporte à determinados conjuntos de solicitações, mostrado nas Figuras 2 e 3.

Apesar dessa técnica ser bastante utilizada, ainda há lacunas de conhecimento no que se refere ao comportamento de peças reforçadas por essa técnica, por exemplo, a forma de determinar a quantidade de aço da armadura de costura. Contudo, é uma técnica simples e trivial.

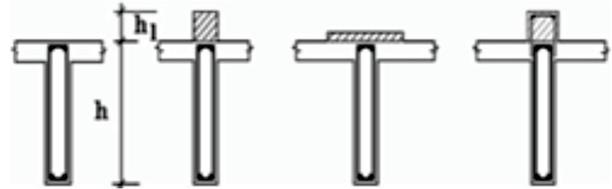
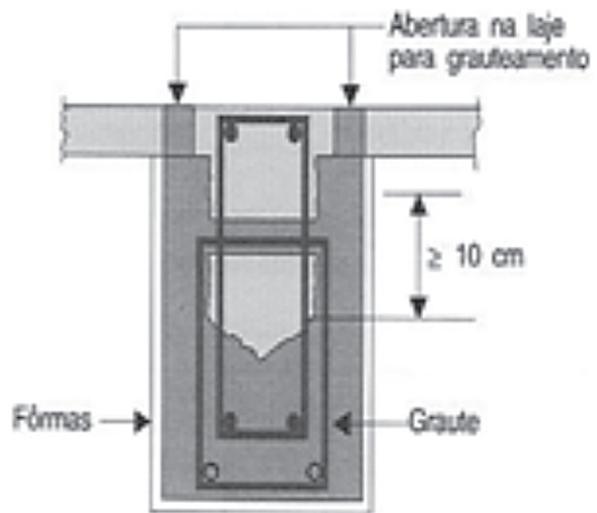


Figura 3 – Reforço por Alteração da Altura da Viga [9]; reforço por aumento da altura  $h$  com concreto (bordo comprimido).

## 3 Reforço por Adição de Chapas de Aço Coladas

A adição de chapas de aço coladas como reforço à flexão e/ou cisalhamento de estruturas de concreto armado, consiste na colagem de chapas metálicas na superfície de concreto através de um adesivo estruturante. Sua aceitação em grande parte se deve ao fato de ser um sistema que não gera grandes alterações geométricas na estrutura e possibilita a rápida reentrada em serviço da estrutura.



O reforço por adição de chapas metálicas coladas é caracterizado pela união da superfície de concreto à chapas de aço através de uma resina com alta capacidade de adesão e resistência mecânica. É uma opção para reforço de elementos de concreto, de rápida e simples execução, recomendada principalmente quando é necessário reforçar a estrutura em um tempo curto ou não é possível fazer grandes alterações na geometria da peça. No final do processo, tem-se um elemento estrutural composto por concreto-resina-aço, o que possibilita à estrutura uma resistência maior ao esforço cortante e ao momento de flexão. É fundamental que a resina utilizada para fazer a colagem concreto-aço seja de qualidade comprovada e a superfície do concreto e do aço sejam preparadas. Na Figura 4 tem-se uma viga reforçada com o emprego de chapas de aço.



Figura 4 – Reforço com chapas de aço [12].

A aplicação do reforço com chapa de aço colada a vigas pode ser empregada tanto em obras mais usuais,

como edifícios e obras de pequeno porte, mas também pode ser usada em pontes e viadutos.

## 4 Reforço por Meio de Protensão

A protensão por definição pode ser compreendida como o “Artifício” de introduzir, em uma estrutura, um estado prévio de tensões, de modo a melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob ação de diversas solicitações.

Armaduras ativas por definição são aquelas que estão submetidas à tensão independente do concreto da estrutura estar sobre tensão. Esse método tem por finalidade executar imediatamente esforço de contra flecha e a diminuição, ou mesmo limitação de fissuras na peça, após o término de sua protensão.

Nessa metodologia a protensão pode ser contribuinte de resistência em estruturas que se utilizam de armaduras convencionais de concreto armado, possui como característica uma participação das solicitações apenas quando a estrutura for requisitada acima do dimensionamento necessário ao uso trivial. O emprego desse tipo de protensão é comum em estruturas que possuam eventos de sobre carga excepcional, ocorrendo em ocasiões distintas não triviais, onde para a maior parte da vida útil da estrutura armaduras convencionais garantem o funcionamento da peça como um todo.

### 4.1 Reforço por Protensão Externa sem Aderência

O reforço estrutural adotado ao longo deste trabalho com abordagem em protensão externa sem aderência tem como premissa o emprego do método, o qual utiliza cabos externos dispostos linearmente para se utilizar as tensões adquiridas em favor da protensão.

Tabela 1 – Escala Fundamental de SAATY [10]

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 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.

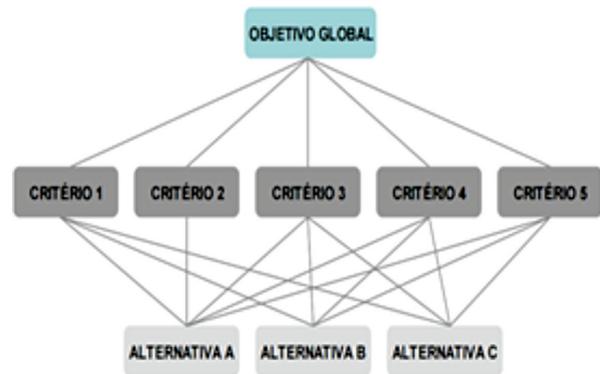
Em um estudo geométrico de cabos utilizados em protensão é possível a variação geométrica no posicionamento dos cabos, oscilando entre reto e poligonal, ressaltando um adendo quanto à importância de não se mudar drasticamente a angulação dos cabos a fim de não criar tensões exageradas junto aos desviadores.

Essa angulação deve ter uma transição o quanto mais suave possível, e a quantidade de pontos de uso com desviadores correlaciona-se com esta suavidade e, ainda, a necessidade de ter um ou mais pontos de contato com a estrutura da peça. É possível apresentar alguns tipos de protensão externa com variação das disposições geométricas dos cabos, conforme exemplificado nas Figuras 5, 6 e 7.

## 5 Método AHP

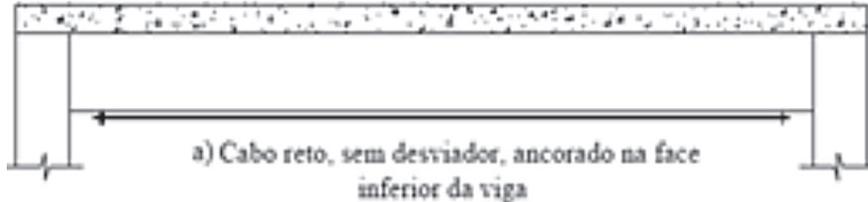
Apesar de existirem várias metodologias de tomada de decisão, pode-se verificar que muitas das decisões do mundo empresarial nem sempre são decididas racionalmente, muitas delas respaldam-se em decisões intuitivas e criativas que dependem muito do talento pessoal e individual. Decisões estratégicas estão baseadas em aspectos racionais e intuitivos, ninguém

toma uma decisão baseado puramente na racionalidade ou na intuição.

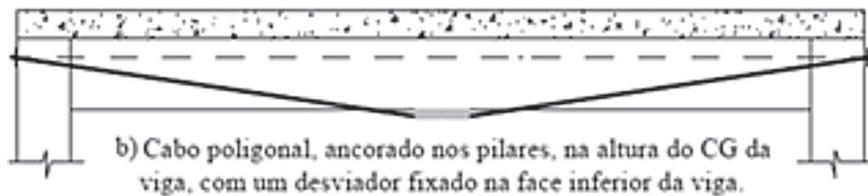


**Figura 8** – Estrutura Hierárquica Genérica de Problemas de Decisão [10].

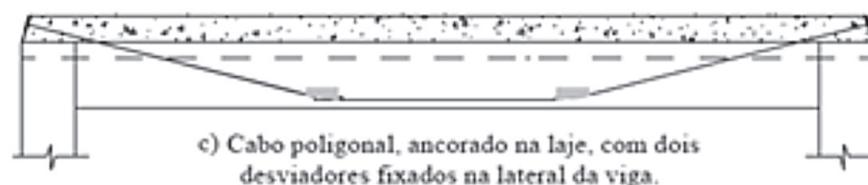
O responsável pela decisão enfrenta diversas dificuldades devido aos vários componentes que fazem parte do sistema (recursos, pessoas, resultados ou objetivos almejados, etc.). Quanto melhor for o entendimento desses fatores, melhor serão os resultados na tomada de decisão. Nesse cenário é possível exemplificar uma estrutura hierárquica genérica de problemas mostrada na Figura 8.



**Figura 5** – Modelo de disposição geométrica dos cabos [1].



**Figura 6** – Modelo de disposição geométrica dos cabos [1].



**Figura 7** – Modelo de disposição geométrica dos cabos [1].

Mesmo em redundância é possível observar que há vários métodos para auxiliar na tomada de decisão, mas um modelo matemático proposto é o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) desenvolvido por THOMAS SAATY na década de 1970. O qual sua simplicidade a absorção de variáveis qualitativas e quantitativas no julgamento favorece seu uso. O método baseia-se na divisão dos problemas em níveis hierárquicos tornando a compreensão e avaliação das alternativas propostas, sempre a luz dos critérios, com a tomada de decisão mais clara.

O método AHP leva em conta dados, experiências, percepções e intuições de uma maneira lógica e completa, permitindo que sejam elaboradas escalas de prioridades ou de pesos.

O método de SAATY consiste em analisar os requisitos/informações e a partir deste ponto, definir prioridades conforme a necessidade da situação analisada. Essa metodologia consiste, dentre suas etapas (que já se revelaram na introdução deste trabalho):

- definir as alternativas;
- definir os critérios relevantes para o problema de decisão.

O Método AHP assume que um conjunto de critérios tenha sido estabelecido, e que está tentando estabelecer um conjunto normalizado de pesos usado na comparação equânime das alternativas. De forma sintetizada as três fases para resolver o problema de decisão são:

- decomposição;
- julgamentos comparativos;
- síntese de prioridades.

O método AHP usa o fator humano para o julgamento do peso dos critérios que serão utilizados no projeto. Dessa forma, mesmo que dois critérios sejam incomparáveis matematicamente, o fator humano entra no processo e os participantes chegam a um consenso sobre qual deles é mais importante.

A Tabela 1 que mostra os pesos e seus significados criada por SAATY.

Os números ímpares são utilizados para definir as prioridades, e os números pares são utilizados quando há uma discordância sobre o peso do critério e que deverá ser discutido posteriormente. As prioridades devem ser avaliadas dois a dois decidindo o peso que um tem pelo outro. Após a definição das prioridades de cada critério será montada uma matriz com os dados obtidos, exemplificada pela Tabela 2.

Como exemplificado na Tabela 2, foi inserido o valor de prioridade 3 em C1 com C3 e 1/3 em C3 com C1, avaliação e recíproco. Isso significa que C1 é levemente favorecido com relação a C3. A diagonal principal da matriz, Tabela 2, deve ser preenchida

sempre com o peso 1, visto que um critério é igualmente importante comparado com ele mesmo.

**Tabela 2** – Matriz Comparativa (C1 domina C2) [10]

Critérios	C1	C2	C3
C1	1	Avaliação	Ex: 3
C2	Recíproco	1	_____
C3	Ex: 1/3	_____	1

Após a criação desta primeira matriz é necessário normalizá-la. Para isso divide-se o valor de cada célula pelo resultado obtido da somatória de todos os valores da mesma coluna (Tabela 3).

**Tabela 3** – Normalização da Matriz Comparativa [10]

Critérios	C1	C2	C3
C1	$1 / (1 + x + y)$		
C2	$X / (1 + x + y)$		
C3	$Y / (1 + x + y)$		
Total	$1 + X + Y$		

A contribuição de cada critério é determinada através do vetor de Eigen, onde será conhecida sua relevância em porcentagem (dados normalizados). O percentual é determinado somando-se os valores de cada linha da tabela normalizada e dividindo-se pela quantidade de critérios utilizados. O resultado obtido será a porcentagem de importância, isto é, peso referente ao critério da linha calculada, sendo que o somatório de todas as porcentagens deve ser igual a 1. As Tabelas 4 e 6 exemplificam esse raciocínio.

**Tabela 4** – Matriz Normalizada [10]

Critérios	C1	C2	C3
C1	C11	C12	C13
C2	C21	C22	C23
C3	C31	C32	C33

**Tabela 5** – Cálculo do Vetor Eigen

Critérios	Cálculo	Vetor Eigen	Em %
C1	$(C11 + C12 + C13)/3$	X	X*100
C2	$(C21 + C22 + C23)/3$	Y	Y*100
C3	$(C31 + C32 + C33)/3$	Z	Z*100
Total	N/A	1	100%

Em seguida é calculado o número principal de Eigen ( $\lambda \max$ ) que será necessário para verificar se os dados da primeira tabela (matriz de prioridades) são consistentes. É imprescindível a verificação da consistência dos dados, pois se houver algum erro a tomada de decisão pode ser prejudicada e, conseqüentemente, haverá prejuízos futuros.

O cálculo deve ser efetuado utilizando-se a primeira matriz de prioridades, onde são utilizados os valores de cada linha multiplicados pela coluna com os resultados do vetor de Eigen. Após a soma de todos os valores divide-se pelo valor da coluna de Eigen. O  $\lambda \max$  é calculado somando-se todos os resultados e dividindo-se pela quantidade de critérios envolvidos. As Tabelas 6 e 7 exemplificam esse raciocínio.

**Tabela 6** – Matriz Normalizada e Coluna com Vetor Eigen [10]

Critérios	C1	C2	C3	Vetor Eigen
C1	C11	C12	C13	X
C2	C21	C22	C23	Y
C3	C31	C32	C33	Z

$$V1 = \{ ((C11 * X) + (C12 * Y) + (C13 * Z)) / X \}$$

$$V2 = \{ ((C21 * X) + (C22 * Y) + (C23 * Z)) / Y \}$$

$$V3 = \{ ((C31 * X) + (C32 * Y) + (C33 * Z)) / Z \}$$

$$\lambda \max = (V1 + V2 + V3) / 3$$

Para verificar a consistência dos dados é necessário efetuar o cálculo do índice de consistência (CI) dado pela Equação 1, sendo que 'n' é igual à quantidade de critérios envolvidos:

$$CI = \frac{\lambda \max - n}{(n-1)} \quad (1)$$

A razão de consistência (CR) é calculada dividindo-se o CI pelo índice de consistência aleatória (RI). O RI está diretamente ligado à quantidade de critérios envolvidos, como mostra a Tabela 7, proposta por SAATY.

**Tabela 7** – Índice de Consistência Aleatória [10]

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

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

O resultado de CR deve ser menor ou igual a 0,1 (10%), caso contrário a matriz de prioridades está inconsistente e deve ser verificada.

## 6 Aplicação do Método AHP

Com o objetivo de aplicar o método AHP para auxiliar na tomada de decisão na escolha do reforço na viga de concreto armado, simula-se o comportamento uma viga tipo em um galpão industrial que receberá novas cargas adicionais.

### 6.1 Critérios e suas Relevâncias

Partindo-se do objetivo de analisar quais critérios utilizados na tomada de decisão são relevantes em se tratando de reforços estruturais, foi determinado:

- tempo de execução;
- isolamento da área;
- manutenibilidade;
- custo material.

Também nessa mesma abordagem, dado que o estudo de caso é um galpão de produção industrial, o tempo de execução é o critério mais importante e será usado como fator principal na tomada de decisão final. O tempo de execução do projeto de reforço foi medido em dias e teve sua contagem iniciada desde o isolamento da área até a total da conclusão da obra. O custo do material também está sendo levado em consideração como fator decisivo na tomada de decisão. Caso haja um empate e/ou uma discrepância muito grande entre tempo de execução e o custo dos materiais, o custo fica sendo o fator de desempate.

Para a escolha do critério Isolamento da Área foi visto que a segurança na execução do reforço e a excelência do trabalho executado também são fatores imprescindíveis para um bom respaldo profissional, sendo que será considerado isolamento parcial ou total.

Na comparação entre os preços, associados ao custo dos materiais de cada alternativa proposta foi utilizada a tabela SINAPI (Sistema Nacional de Custos e Índices da Construção Civil) com a data base de abril/2015, DNIT (SICRO 2) com data base de março/2015 e cotação de preço junta a praça de execução das obras, os valores estão em moeda corrente do Brasil, o Real. Não serão levados em consideração o valor da mão de obra nem o custo agregado dos equipamentos utilizados na obra, pois a economia de um reforço dependerá muito da correta especificação dos materiais utilizados e da razão custo/benefício a médio e longo prazo.

A manutenibilidade do reforço prevê a reparação ou reposição de algum material deteriorado. A manutenibilidade surge como último critério em grau de importância dentre todos os anteriores. A definição usada para este critério foi a análise de forma qualitativa a necessidade de manutenção do reforço utilizado ou a ausência de manutenção do mesmo. Esse critério também está diretamente ligado à manutenção preventiva periódica evitando problemas como o desgaste e possível má utilização do reforço.

## 6.2 Aplicação do Método

Após a definição das alternativas, objetivos, critérios e a meta global é montada a estrutura com os problemas para melhor orientação para a utilização do método AHP. A Figura 9 ilustra este raciocínio.

Com base aos parâmetros desenvolvidos no item 6.1, é possível resumir o comportamento de cada uma das alternativas e cada um dos critérios conforme Tabela 8.

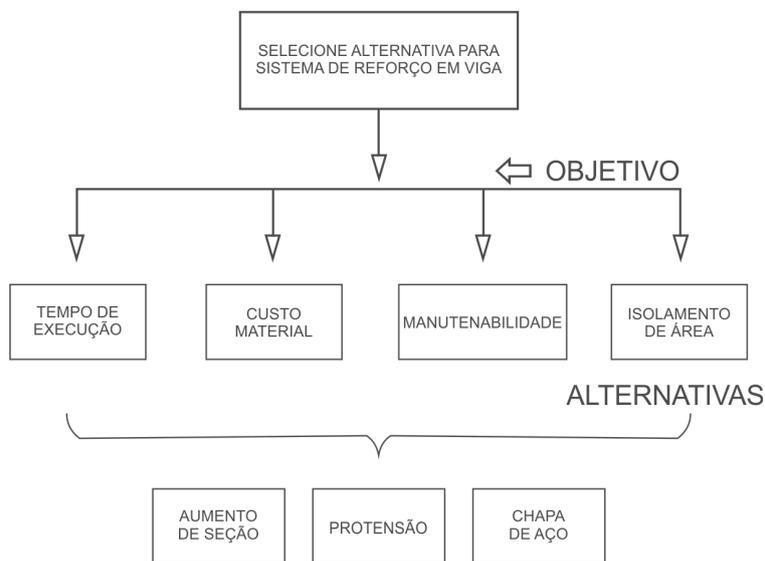


Figura 9 – Modelo hierárquico de estruturação do problema.

Tabela 8 – Matriz Comparativa de Insumos X Alternativas e os Critérios do Projeto

Alternativas	Critérios			
	Tempo Execução (dias)	Custo Material (R\$)	Manutenabilidade	Isolamento Área
Aumento de Seção	40	R\$ 5.570,25	Baixa	Total
Chapa de aço	12	R\$ 8.950,07	Periódica	Total
Protensão	5	R\$ 2.461,90	Baixa	Parcial

Tabela 9 – Matriz Comparativa do grupo de Critérios

	Tempo Execução	Custo Material	Manutenabilidade	Isolamento Área
Tempo Execução	1	7	6	2
Custo Material	1/7	1	1/3	1/5
Manutenabilidade	1/6	3	1	1/3
Isolamento Área	1/2	5	3	1
Total	1,81	16,00	10,33	3,53

**Tabela 10** – Matriz Comparativa Normalizada do Grupo de Critérios

	Tempo Execução	Custo Material	Manutenabilidade	Isolamento Área
Tempo Execução	1/1,81 = 0,5526	0,4375	0,5806	0,5660
Custo Material	0,1429/1,81 = 0,0789	0,0625	0,0323	0,0566
Manutenabilidade	0,1667/1,81 = 0,0921	0,1875	0,0968	0,0943
Isolamento Área	0,5/1,81 = 0,2763	0,3125	0,2903	0,2830

**Tabela 11** – Cálculo do Vetor de Eigen

	Cálculo	Vetor Eigen	
Tempo Execução	$(0,5526 + 0,4375 + 0,5806 + 0,5660)/4$	0,5342	53,42%
Custo Material	$(0,0789 + 0,0625 + 0,0323 + 0,0566)/4$	0,0576	05,76%
Manutenabilidade	$(0,0921 + 0,1875 + 0,0968 + 0,0943)/4$	0,1177	11,77%
Isolamento Área	$(0,2763 + 0,3125 + 0,2903 + 0,2830)/4$	0,2905	29,05%

$$\left[ \frac{(1 * 0,5342) + (7 * 0,0576) + (6 * 0,1177) + (2 * 0,2905)}{0,5342} \right] = 4,1640$$

$$\left[ \frac{(1/7 * 0,5342) + (1 * 0,0576) + (1/3 * 0,1177) + (1/5 * 0,2905)}{0,0576} \right] = 4,0159$$

$$\left[ \frac{(1/3 * 0,5342) + (3 * 0,0576) + (1 * 0,1177) + (1/3 * 0,2905)}{0,1177} \right] = 4,0474$$

$$\left[ \frac{(1/2 * 0,5342) + (5 * 0,0576) + (3 * 0,1177) + (1 * 0,2905)}{0,2905} \right] = 4,1253$$

$$\lambda_{\text{máx}} = \left[ \frac{(4,1640 + 4,0159 + 4,0474 + 4,1253)}{4} \right]$$

$$\lambda_{\text{máx}} = 4,0881$$

**Tabela 12** – Cálculo do Eigen ( $\lambda_{\text{máx}}$ )

	Tempo Execução	Custo Material	Manutenabilidade	Isolamento Área
Tempo Execução	1,0000	7,0000	6,0000	2,0000
Custo Material	0,1429	1,0000	0,3333	0,2000
Manutenabilidade	0,1667	3,0000	1,0000	0,3333
Isolamento Área	0,5000	5,0000	3,0000	1,0000
Média das Consistências	4,1640	4,0159	4,0474	4,1253
Eigen Principal		4,0881		

Tomando-se por base as relevâncias justificadas no item 6.1, é possível construir a matriz de relevância dos critérios, conforme Tabela 9, e conseqüentemente sua normalização na Tabela 10, e cálculo do vetor Eigen ( $\lambda$ ) nas Tabelas 11 e 12.

Seguindo-se para o cálculo para determinação do índice de consistência, conforme Equação 1:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)}$$

$$CI = \frac{4,0881 - 4}{4 - 1}$$

$$CI = 0,029$$

E assim, por fim o cálculo para determinar a consistência da matriz comparativa, conforme Equação 2:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CR = \frac{0,029}{0,9}$$

$$CR = 0,0322 = 3,22\% < 10\%$$

Como 3,22% é menor que 10%, considera-se a matriz como consistente, sendo assim, tem-se em forma de gráfico os resultados de prioridade para o grupo de critérios. Com a análise da Figura 10, pode-se notar que o critério Tempo de Execução (53,42%) é o mais relevante dentre o grupo, ou seja, é o critério que mais contribuirá para a meta global, e o critério Isolamento de Área (5,76%) é o menos relevante.

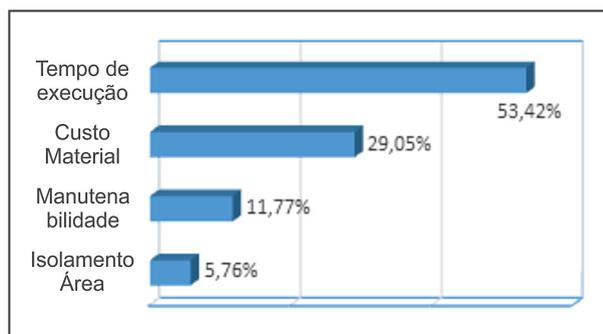


Figura 10 – Resultados de prioridade para o grupo de critérios.

### 6.3 Comparação das Alternativas quanto ao critério Tempo de Execução

Com base aos parâmetros desenvolvidos no item 6.1, é possível verificar a relevância dos critérios, logo faz-se a análise em cada uma das alternativas frente a cada um dos critérios e se comportamento verificado na Tabela 8, culminando na construção da Tabela 13, sua respectiva normalização na Tabela 14, seu vetor Eigen ( $\lambda$ ) nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 13 – Matriz Comparativa das alternativas com relação ao critério Tempo de Execução

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	1	1/3	1/9
Chapa de Aço	3	1	1/5
Protensão	9	5	1
Total	13	6,33	1,31

Tabela 14 – Matriz Comparativa Normalizada das alternativas X critério Tempo de Execução

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	0,0769	0,0526	0,0847
Chapa de Aço	0,2308	0,1579	0,1525
Protensão	0,6923	0,7895	0,7627

Tabela 15 – Cálculo do Vetor de Eigen das alternativas com relação ao critério Tempo de Execução

	Cálculo	Vetor Eigen	
Aumento de Seção	$(0,0769 + 0,0526 + 0,0847)/3$	0,0714	7,14%
Chapa de Aço	$(0,2308 + 0,1579 + 0,1525)/3$	0,1804	18,04%
Protensão	$(0,6923 + 0,7895 + 0,7627)/3$	0,7482	74,82%

Tabela 16 – Cálculo do Vetor de Eigen ( $\lambda$  máx) das alternativas com relação ao critério Tempo de Execução

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	1,0000	0,3333	0,1111
Chapa de Aço	3,0000	1,0000	0,2000
Protensão	9,0000	5,0000	1,0000

Média das Consistências	3,0056	3,0173	3,649
Eigen Principal		3,0293	

Cálculo para se determinar o índice de consistência:

$$CI = 0,0146$$

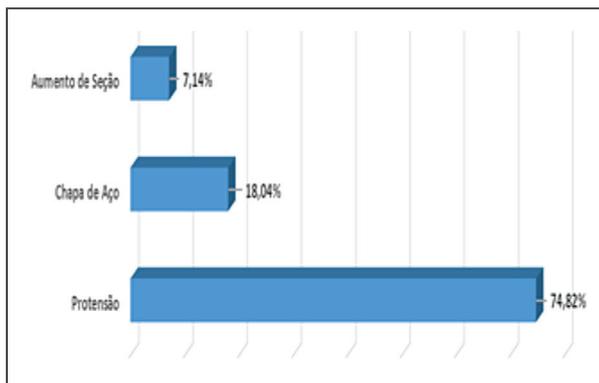
$$CI = \frac{3,0293 - 3}{3 - 1}$$

$$CR = \frac{0,0406 - 3}{0,58}$$

$$CR = 0,025 = 2,5\% < 10\%$$

(Matriz consistente)

Observa-se que na comparação das alternativas dos reforços com relação ao tempo de execução, o Reforço por Protensão é a alternativa mais favorável com 74,82% de preferência, ou seja, é o reforço que será executado em menor tempo. Entretanto, a alternativa mais desfavorável com relação a tempo de execução é o Reforço por Aumento de Seção, sua preferência é de apenas 7,14%, pois é a alternativa que terá maior tempo de execução graficamente representado na Figura 11.



**Figura 11** – Resultados de prioridade para o grupo de Alternativas com relação ao Critério Tempo de Execução.

#### 6.4 Comparação quanto ao Critério Custo Material

Com base aos parâmetros desenvolvidos no item 6.1 é possível e verificada a relevância dos critérios, logo faz-se a análise em cada uma das alternativas frente a cada um dos critérios e sem comportamento verificado na Tabela 8, culminando na construção da

Tabela 17, sua respectiva normalização na Tabela 18, seu vetor Eigen ( $\lambda$ ) nas Tabelas 19 e 20.

**Tabela 17** – Matriz Comparativa das alternativas com relação ao critério Custo Material

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	1	7	1/3
Chapa de Aço	1/7	1	1/9
Protensão	1/7	1	1/9
Total	4,14	17	1,4

**Tabela 18** – Matriz Comparativa Normalizada das alternativas com relação ao critério Custo Material

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	0,2414	0,4118	0,2308
Chapa de Aço	0,0345	0,0588	0,0769
Protensão	0,7241	0,5294	0,6923

**Tabela 19** – Cálculo do Vetor de Eigen das alternativas com relação ao critério Custo Material

	Cálculo	Vetor Eigen	
Aumento de Seção	$(0,2414 + 0,4118 + 0,5294)/3$	0,2946	29,46%
Chapa de Aço	$(0,0345 + 0,0588 + 0,0769)/3$	0,0567	5,67%
Protensão	$(0,7241 + 0,5294 + 0,6923)/3$	0,6486	64,86%

**Tabela 20** – Cálculo do Vetor de Eigen ( $\lambda$  máx) das alternativas com relação ao critério Custo Material

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	1,0000	7,0000	0,3333
Chapa de Aço	0,1429	1,0000	0,1111
Protensão	3,0000	9,0000	1,0000
Média das Consistências	3,0819	3,0119	3,1501
Eigen Principal		3,0813	

Cálculo para determinar o índice de consistência:

$$CI = \frac{3,0813 - 3}{3 - 1}$$

$$CI = 0,0406$$

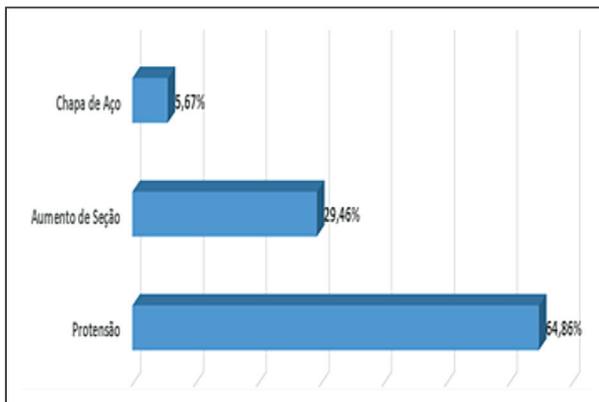
Cálculo para se determinar a consistência da matriz comparativa:

$$CR = \frac{0,0406}{0,58}$$

$$CR = 0,07 = 7\% < 10\%$$

(Matriz consistente)

O próximo gráfico mostra que o Reforço de Protensão (64,86%) quando comparado com o critério Custo do Material é o mais vantajoso, ou seja, seu custo comparado com as outras alternativas é menor. Já o Reforço por Chapa de aço é a menos preferível, com 5,67% de preferência, graficamente representado na Figura 12.



**Figura 12** – Resultados de prioridade para o grupo e alternativas com relação ao Critério Custo de Material.

## 6.5 Comparação quanto ao Critério Manutenibilidade

Com base aos parâmetros desenvolvidos no item 6.1 é possível e verificada a relevância dos critérios, logo faz-se a análise em cada uma das alternativas frente a cada um dos critérios e se comportamento verificado na Tabela 8, culminando na construção da Tabela 21, sua respectiva normalização na Tabela 22, seu vetor Eigen  $\lambda$  nas Tabelas 23 e 24.

**Tabela 21** – Matriz Comparativa das alternativas com relação ao critério Manutenibilidade

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	1	3	1
Chapa de Aço	1/3	1	1/3
Protensão	1	3	1
Total	2,3333	7,0000	2,3333

**Tabela 22** – Matriz Comparativa Normalizada das alternativas com relação ao critério Manutenibilidade

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	0,4286	0,4286	0,4286
Chapa de Aço	0,1429	0,1429	0,1429
Protensão	0,4286	0,4286	0,4286

**Tabela 23** – Cálculo do Vetor de Eigen das alternativas com relação ao critério Manutenibilidade

	Cálculo	Vetor Eigen	
Aumento de Seção	$(0,4286 + 0,4286 + 0,4286)/3$	0,4286	42,86%
Chapa de Aço	$(0,1429 + 0,1429 + 0,1429)/3$	0,1429	14,29%
Protensão	$(0,4286 + 0,4286 + 0,4286)/3$	0,4286	42,86%

**Tabela 24** – Cálculo do Vetor de Eigen ( $\lambda$  máx) das alternativas com relação ao critério Manutenibilidade

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	1,0000	3,0000	1,0000
Chapa de Aço	0,3333	1,0000	0,3333
Protensão	1,0000	3,0000	1,0000
Média das Consistências	3,0000	3,0000	3,0000
Eigen Principal	3,0000		

Cálculo para se determinar o índice de consistência:

$$CI = \frac{3 - 3}{3 - 1}$$

$$CI = 0,0$$

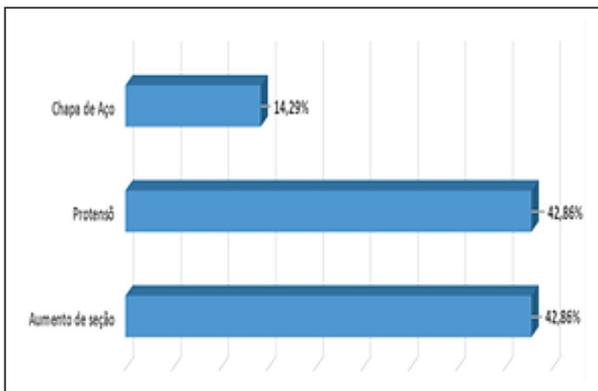
Cálculo para se determinar a consistência da matriz comparativa:

$$CR = \frac{0,0}{0,58}$$

$$CR = 0,0 = 0\% < 10\%$$

Portanto, matriz consistente.

Com relação ao critério Manutenibilidade as alternativas Reforço por Aumento de seção e Reforço por Protensão são igualmente mais preferíveis (42,86%), ou seja, são as alternativas que terão baixa manutenção durante a vida útil da viga. O Reforço por chapa de aço apresentou menor preferência com 14,29%, pois tem manutenção periódica, graficamente representado na Figura 13.



**Figura 13** – Resultados de prioridade para o grupo de Alternativas com relação ao Critério Manutenibilidade.

## 6.6 Comparação quanto ao critério Isolamento de Área

Com base aos parâmetros desenvolvidos no item 6.1 é possível e verificada a relevância dos critérios, faz-se a análise em cada uma das alternativas frente a cada um dos critérios e se comportamento verificado na Tabela 8, culminando na construção da Tabela 25, sua respectiva normalização na Tabela 26, seu vetor Eigen  $\lambda$  nas Tabelas 27 e 28.

**Tabela 25** – Matriz Comparativa das alternativas com relação ao critério Isolamento de Área

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	1	1	1/9
Chapa de Aço	1	1	1/9
Protensão	9	9	1
Total	11	11	1,2222

**Tabela 26** – Matriz Comparativa Normalizada das alternativas X critério Isolamento de Área

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	0,0909	0,0909	0,0909
Chapa de Aço	0,0909	0,0909	0,0909
Protensão	0,8182	0,8182	0,8182

**Tabela 27** – Cálculo do Vetor de Eigen das alternativas com relação ao critério Isolamento de Área

	Cálculo	Vetor Eigen	
Aumento de Seção	$(0,0909 + 0,0909 + 0,0909)/3$	0,0909	9,09%
Chapa de Aço	$(0,0909 + 0,0909 + 0,0909)/3$	0,0909	9,09%
Protensão	$(0,8182 + 0,8182 + 0,8182)/3$	0,8182	81,82%

**Tabela 28** – Cálculo do Vetor de Eigen ( $\lambda$  máx) das alternativas com relação ao critério Isolamento de Área

	Aumento de Seção	Chapa de Aço	Protensão
Aumento de Seção	1,0000	1,0000	0,1111
Chapa de Aço	1,0000	1,0000	0,1111
Protensão	1,0000	1,0000	0,1111
Média das Consistências	3,0000	3,0000	3,0000
Eigen Principal	3,0000		

Cálculo para se determinar o índice de consistência:

$$CI = \frac{3 - 3}{3 - 1}$$

$$CI = 0,0$$

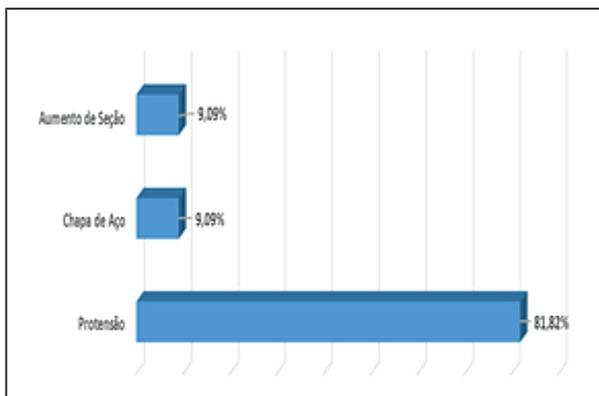
Cálculo para se determinar a consistência da matriz comparativa:

$$CR = \frac{0,0}{0,58}$$

$$CR = 0,0 = 0\% < 10\%$$

Portanto, matriz consistente.

Pode-se observar que para o critério Isolamento de área a alternativa mais favorável é o Reforço por Protensão, com 81,82% de preferência, isso quer dizer que esse tipo de reforço terá menor isolamento de área no galpão, já o Reforço por Chapa de Aço e o Reforço por Aumento de Seção são menos preferíveis igualmente com 9,09% de preferência, graficamente representados na Figura 14.

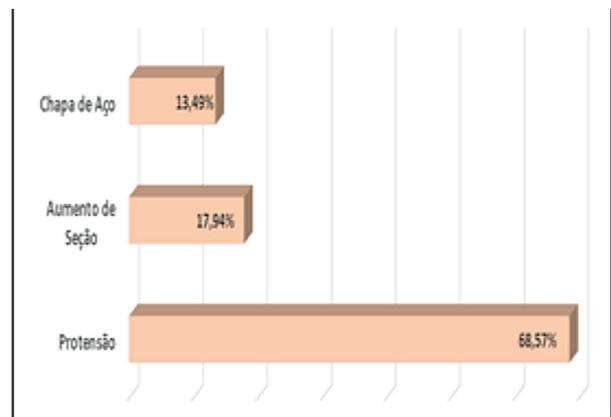


**Figura 14** – Resultados de prioridade para o grupo de Alternativas com relação ao Critério Isolamento Área.

## 6.7 Análises dos Resultados

Para a determinação da prioridade final de cada alternativa com relação a meta, é realizado o cruzamento entre todas as avaliações das alternativas de reforços com todos os critérios. 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 mostra a Tabela 29.

A Figura 15, em resultado da Tabela 29, mostra que a alternativa para melhor atender a meta global que foi definida no início do projeto, é a alternativa de Reforço por Protensão (68,57%), tendo em vista que o critério tempo de execução é o critério mais relevante (74,82%) dentre os grupos de critérios, ou seja, é o critério que mais contribui para a escolha do tipo de reforço a ser usado na viga tipo.



**Figura 15** – Resultados finais para as prioridades.

## 7 Conclusões

Este trabalho tem como intuito mostrar, em um ambiente teórico, possíveis soluções para um projeto de

**Tabela 29** – Avaliação final das alternativas com relação ao grupo de critérios

Critério	Peso do Critério	Pesos das Alternativas		
		Aumento da seção	Chapa de Aço	Protensão
Tempo de execução	0,5342	0,0714	0,1804	0,782
Isolamento Área	0,0576	0,0909	0,0909	0,8182
Manutenabilidade	0,1177	0,4286	0,1429	0,4286
Custo Material	0,2905	0,2946	0,0567	0,6476
Total (Σ)	1	0,1794	0,1349	0,6857
		Σ Peso Critério x Peso Alternativa		

reforço de viga em um galpão. Nele foram apresentadas e explicadas três soluções escolhidas pelos envolvidos alternativas de resolver o problema em questão.

Foi apresentada também a importância de um método de tomada de decisão eficaz para a escolha da melhor alternativa quando múltiplas variáveis estão envolvidas no processo. Ficou claro que a metodologia de apoio em processos decisórios pode comprovar o que demonstra a experiência e julgamento qualitativos dos decisores frente a determinadas soluções, contudo, ao se considerar apenas um único critério, como por exemplo: o tempo de execução, descartando-se solução de protensão, a solução seria com chapa de aço e se fosse analisado isoladamente o critério custo material a solução seria aumento de seção.

O método AHP, mostrado e aplicado, ao longo do trabalho mostrou-se eficiente ao apresentar matematicamente qual seria a melhor alternativa para o projeto de acordo com as premissas pré-estabelecidas em reuniões com todos os envolvidos, sai do ambiente puramente qualitativo e quantifica os padrões de decisão, ratificando a percepção dos decisores em problemas com mais de uma variável relevante

Apesar do método AHP ser uma ferramenta de suporte muito eficaz, deve-se lembrar que quem irá tomar a decisão final são as pessoas que estão sugeridas a erro, sendo que o fator humano nunca deve ser ignorado. As experiências pessoais e o conhecimento sobre o assunto são fatores decisivos para o sucesso na escolha final da melhor alternativa apresentada pela metodologia de escolha.

Conclui-se que, após análise dos cálculos e dados obtidos, a melhor solução dentre todas as apresentadas foi o reforço com protensão pois, em todos os critérios definidos pelos envolvidos, apresentou-se como melhor opção no método AHP, além de ter sido escolhida em consenso geral de todos os participantes no processo decisório.

## 8 Referências

[1] ALVARADO, V. SANTOS, J. SANTOS, J. EGUTHI, D. Método de Tomada de Decisões de Reforço em Elementos Estruturais – Vigas – Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharel em Engenharia Civil – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2105.  
[2] CHAKRABORTY, S., DEY, S. Design of an analytic-hierarchy-process-based expert system for

nontraditional machining process selection. *International Journal Advanced Technology*, v. 31, pp. 409-500, 2006.

[3] COSTA, H. G. Estruturas de Suporte à Decisão: Métodos Discretos Tradicionais: Monocritério e Multicritério. Niterói Universidade Federal Fluminense, 2005.

[4] CRUZ, R. B. C. Modelo de decisão multicritério para apoio às tomadas de decisão na compra de terrenos. 14<sup>o</sup> Conferência Internacional da Lares, RJ 2014.

[5] HELENE, P. R. L. – Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto: PINI – 1988.

[6] JAGANATHAN, S., ERINGERI, J. J., KER, J. Fuzzy analytic hierarchy process based group decision support system to select and evaluate new manufacturing technologies. *International Journal Advanced Technology*, v. 32, pp. 1253-1262, 2007.

[7] MOUSAVI, A. *et al.* A technique for advanced manufacturing systems capability evaluation and comparison (ACEC). *International Journal Advanced Technology*, v. 31, pp. 1044-1048, 2007.

[8] PINHEIRO, L. M. Fundamentos do concreto e projeto de edifícios, USP – EESC – Dep. Eng. de Estruturas – 2004.

[9] REIS, A. P. A. Reforço de Vigas de Concreto Armado por Meio de Aço Adicionais ou Chapas de Aço e Argamassa de Alto Desempenho – Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia São Carlos da Universidade de São Paulo. 1999.

[10] SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica, tradução de Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1991.

[11] SIMON, H. A. *The New Science of Management Decision*. New York: Harper e Row, 1960. *A Razão na Coisas Humanas*. Lisboa: Gradiva, 1989.

[12] SOUZA, V. C. – Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto / Vicente Custódio Moreira de Souza e Thomaz Ripper. – São Paulo, Pini, 1998.

[13] SILVEIRA, S. S. Dimensionamento de vigas de concreto armado reforçadas com chapas coladas com resina epóxi. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1997. 120 p.

[14] PFEIL, W. Concreto protendido Vol. 1 – Introdução, RJ – Editora LTC. 1984.

[15] HANAI, J. Fundamentos do concreto protendido, E-book de apoio ao curso de engenharia civil, USP – EESC – Dep. Eng. de Estruturas, 2005.