

Aplicação do Método AHP na Tomada de Decisão na Seleção de Sistemas de Fundação Profunda de Edifícios

Rafael Barreto Castelo da Cruz¹
Juliana de Caynoth Ballardie²
Fernanda Akemi Akatuka Salvador³

Resumo

Um desafio da engenharia de fundações é estabelecer métodos que apoiem na escolha do tipo de fundação para se obter um projeto otimizado. Portanto, de forma exploratória com apoio de revisão bibliográfica e estudo de caso este trabalho tem o objetivo de demonstrar a aplicação do modelo multicritério para selecionar alternativas de fundações profundas do tipo estaca em projetos de edifícios em centros urbanos. Nesse complexo cenários autores como Cruz *et. al* (2016), Santos e Cruz (2013) e Cruz (2012), já demonstraram a aplicabilidade de métodos multicritérios que auxiliam na tomada de decisão, dentre eles o método AHP (Analytic Hierarchy Process) desenvolvido em 1970 por Thomas Saaty, caracterizado pela capacidade de analisar o problema de forma hierárquica, com sucesso em problemas de construção civil. Analisando os critérios selecionado a estaca pré-moldada de concreto é a alternativa mais preferível e a estaca Franki por sua vez é a menos preferível. Assim como mencionado anteriormente, a estaca pré-moldada de concreto é muito utilizada como sistema de fundações profundas de edifícios, sendo assim, este estudo de caso apresenta um resultado esperado e coerente, constatando a efetividade dessa ferramenta de apoio à tomada de decisão.

Palavras-chave: Fundações Profundas; Tomada de Decisão; Multicritério.

1 Introdução

A demanda pela produção de espaço nos centros urbanos aumenta é uma realidade no mundo, no Brasil e nos grandes centros urbanos, sendo assim, a verticalização do espaço urbano torna-se uma solução para que a cidades continuem crescendo. O melhor aproveitamento dos terrenos, que são um bem finito, cada vez mais exigem soluções de engenharia mais eficazes e, para os sistemas de fundações não é diferente.

Com edifícios cada vez mais altos, com estruturas que cada vez tendem a potencializar espaços reduzindo o número de pilares, as fundações receberão cada vez mais cargas, e, portanto, necessitando atingir camadas mais profundas, aumento o atrito lateral e potencializando sua capacidade de carga (CARVALHO, 2013). Sinteticamente o sistema de fundações de um edifício tem por finalidade receber as cargas da estrutura e transmiti-las para a camada resistente de solo (AMBROZEWICZ, 2015), e normalmente,

as fundações são classificadas em superficiais ou profundas.

Segundo a NBR 6122:2010, fundação superficial, também conhecida como rasa ou direta, é aquela em que a carga é propagada pelo terreno predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base do elemento estrutural de fundação, fazem parte deste grupo as sapatas, os blocos, os radier, as sapatas associadas, as vigas de fundações e as sapatas corridas.

Entende-se por fundação profunda aquela que transmite a carga ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste), ou pela combinação das duas. Nessa última definição, se enquadram as estacas, os tubulões e os caixões.

Diversas são as modalidades construtivas, e na atualidade, embora pareça trivial decidir qual modalidade será aplicada, não é. Pois Cruz *et al.* (2016), apontam que quem irá tomar a decisão final são as pessoas e que as experiências pessoais e o conhecimento sobre o assunto são fatores decisivos para o sucesso na escolha final da melhor alternativa.

¹ Docente do Curso do Departamento de Engenharia Civil da FEI – rafaelcastelo@fei.edu.br.

² Engenheira Civil – Acadêmica do Curso de Engenharia Civil da FEI – juliana.ballardie@yahoo.com.br.

³ Engenheira Civil – Acadêmica do Curso de Engenharia Civil da FEI – fernandaakemi.9@gmail.com.

Nesse tocante um desafio da engenharia de fundações é estabelecer métodos que apoiem na escolha do tipo de fundação para se obter um projeto otimizado.

Segundo Velloso e Lopes (2011), existem alguns fatores que são fundamentais para a seleção do tipo de fundação, são eles: i) a topografia da área; ii) os dados geológico-geotécnicos; iii) os dados da estrutura a construir; e iv) dados sobre construções vizinhas, e por que não a capacidade de carga do sistema de fundações, as cargas aplicadas e sua variabilidade entre outros critério que ajudem na seleção.

O processo da tomada de decisão, geralmente envolve a escolha da melhor decisão considerando múltiplos critérios, fatores ou objetivos (SHIMIZU, 2010). A fim de escolher a melhor alternativa é necessário definir quais critérios serão estudados. É imprescindível compreender que não existe uma solução que seja soberana a outra para todos os critérios concomitantemente.

Nesse complexo cenários autores como Cruz *et. al* (2016), Santos e Cruz (2013) e Cruz (2012), já demonstraram a aplicabilidade de métodos multicritérios que auxiliam na tomada de decisão, dentre eles o método AHP (Analytic Hierarchy Process) desenvolvido em 1970 por Thomas Saaty, caracterizado pela capacidade de analisar o problema de forma hierárquica, com sucesso em problemas de construção civil.

Portanto, de forma exploratória com apoio de revisão bibliográfica e estudo de caso, este trabalho tem o objetivo de demonstrar a aplicação do modelo multicritério para selecionar alternativas de fundações profundas do tipo estaca em projetos de edifícios em centros urbanos.

Neste trabalho serão abordadas as estacas de concreto, metálicas (aço), broca mecânica, Strauss, Franki, hélice contínua e raiz. As estacas pré-moldadas de madeira e as estacas moldadas “in loco” do tipo barrete não serão abordadas devido ao fato de que, as estacas de madeira são normalmente utilizadas como fundações de obras provisórias, e as do tipo barrete são utilizadas geralmente em obras pesadas.

2 Breve síntese bibliográfica de fundações profundas

Fundações profundas, segunda a NBR 6122:2010, são estruturas que transmitem as cargas para o solo de duas maneiras, pela base (resistência de ponta), pela superfície lateral (resistência de lateral) ou pela combinação das duas, sendo que, sua ponta ou base deve estar assentada a uma profundidade superior ao dobro da sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0 m.

As fundações profundas são necessárias quando

a camada superficial de solo não é resistente o suficiente para suportar cargas elevadas. Incluem-se nesse tipo de fundação: as estacas, os caixões e os tubulões.

Os tubulões, segundo a NBR 6122:2010, são elementos de fundações que apresentam forma cilíndrica, são escavados no terreno e durante a execução, pelo menos da etapa final, há a descida de operário para executar o alargamento de base ou a limpeza do fundo da escavação. Os tubulões não diferem das estacas devido às suas dimensões, mas sim pelo fato que é necessária a descida do operário para executar o processo.

Os caixões, de acordo com a NBR 6122:2010, são elementos de fundações que apresentam forma prismática, concretado na superfície e instalado através de escavação interna. As estacas, de acordo com a NBR 6122:2010, são elementos de fundação executados inteiramente com auxílio de ferramentas ou equipamentos, não havendo descida de operários. Podem ser executadas por cravação a percussão, prensagem, vibração, por escavação ou de forma mista. Os materiais utilizados podem ser: aço, madeira, concreto pré-moldado, concreto moldado in loco ou pela combinação dos dois.

2.1 Fundações Profundas do Tipo Estacas

Segundo Velloso e Lopes (2011), as fundações profundas além da classificação quanto ao material, podem ser classificadas quanto ao deslocamento aplicado ao solo lindeiro a escavação, em três grupos: i) de deslocamento, onde incluem-se as estacas cravadas em geral, nesse processo o solo que está no espaço em que a estaca irá ocupar é deslocado horizontalmente; ii) de substituição, onde incluem-se as estacas escavadas em geral, nesse processo o solo que está no espaço em que a estaca irá ocupar é removido, causando redução nas tensões horizontais geostáticas; e iii) sem deslocamento, onde incluem-se as estacas escavadas em que não há praticamente remoção de solo. As estacas também podem ser classificadas em moldadas “in loco” e pré-moldadas. A seguir no Quadro 1, as estacas foram situadas nesses dois grupos.

3 Breve síntese bibliográfica da ciência das decisões

Primeiramente, para entender a tomada de decisão é preciso ter em mente o conceito de decisão. De acordo com Jones (1973) a decisão é um conjunto de ações escolhidas por aquele que decide, que optou por determinado caminho para se alcançar objetivos que tinha em mente no momento com maior eficiência, ou

seja, a melhor maneira de se resolver um problema. A decisão é uma solução obtida após a análise de várias alternativas, onde se escolhe aquela que mais convém à situação no momento.

A análise multicritério surgiu como ferramenta para servir de apoio à tomada de decisão. O método destina-se a auxiliar os decisores nas situações em que há a necessidade de identificar as prioridades em problemas que apresentam multicritérios.

Além disso, o método AHP assume uma técnica útil para se verificar a consistência das avaliações daquele que toma a decisão, reduzindo desta forma a trajetória subjetiva no processo de tomada de decisão, Cruz *et. al* (2016), apresentam uma fluxo de aplicação do métodos em etapas conforme Figura 1.

Quadro 1 – Critério Executivo para estacas.

Tipo de Estacas	Nome	Técnica Executiva
Pré Moldadas	Concreto	Cravação
	Aço	Cravação
	Madeira	Cravação
Moldadas “in loco”	Broca	Escavas sem revestimento
	Strauss	Escavada com revestimento
	Franki	Escavada/Cravada com revestimento
	Hélice Contínua	Escavada sem revestimento
	Barrete	Escavada com estabilizantes
	Raiz	Escavada com revestimento

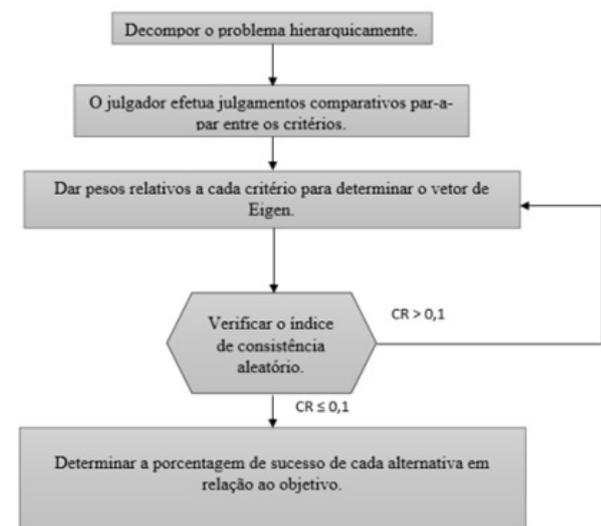


Figura 1 – Fluxo de aplicação do AHP.

Fonte: Cruz *et al.* (2016).

Em um problema multicritério é essencial estabelecer qual o objetivo da análise. Além disso, deve-se definir as alternativas, os critérios, o método a ser utilizado e quem atua como decisor. O método AHP (Analytic Hierarchy Process), criado e desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, tem como principal propósito lidar com decisões complexas, desenvolvendo análises na tomada de decisão de um determinado caso por meio da construção de níveis hierárquicos.

Após a separação hierárquica avaliam-se as alternativas comparando-as par-a-par, com base nos critérios. A comparação entre os critérios previamente estabelecidos pode ser realizada a partir de dados numéricos ou por termos verbais/linguísticos, conforme Quadro 2, que serão transformados em valores numéricos a partir da Escala Fundamental de Saaty, a fim de se obter uma comparação entre os dados para julgamentos comparativos.

Quadro 2 – Escala semântica de Julgamentos de Saaty.

Escala	Avaliação	Descrição
1	Igualmente preferido	Os dois critérios contribuem igualmente para os objetivos
3	Moderadamente preferido	O julgamento favorece um critério levemente sobre o outro
5	Fortemente preferido	O julgamento favorece um critério fortemente sobre o outro
7	Muito fortemente preferido	O julgamento favorece um critério fortemente de forma evidente
9	Extremamente preferido	Um critério é favorecido em relação à outro com mais alto grau de certeza

Fonte: Os autores (2019) adaptado de Cruz (2013)

Os números pares são utilizados quando há uma discordância sobre o peso do critério e quando o consenso não for obtido e houver necessidade de uma negociação.

Após a definição das prioridades de cada critério será montada uma matriz comparativa com os dados obtidos, (n x n), onde os critérios que aparecem na coluna da esquerda são comparados com os critérios que aparecem na linha superior, conforme exemplo da Figura 2.

A matriz comparativa dos critérios é normalizada, e a contribuição de cada critério na decisão é determinada através do vetor de Eigen⁴, que representa sua relevância no processo decisório. Este mesmo procedimento é verificado para comparação das alternativas entre si, conforme seu comportamento em cada critério.

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

Figura 2 – Exemplo de matriz comparativas dos critérios.

Fonte: Cruz et al. (2016)

Essa comparação resultará uma matriz resultante dos auto vetores de comparação pareada das alternativas entre si para cada critério, que aponta o desempenho relativo das alternativas em cada critério com $m \times n$, onde “n” é o número de critério e “m” o número de alternativas. A multiplicação desta matriz pelo auto vetor da matriz comparativa dos critérios apontará de forma relativa e hierárquica as alternativas que de forma multicriterial tem melhor desempenho.

Dado que a proposta deste trabalho é aplicar o Método Analytic Hierarchy Process (AHP) como ferramenta de auxílio à tomada de decisão multicritério na seleção de sistemas de fundações profundas de edifícios, se torna conveniente o desenvolvimento de

um estudo de caso a partir de dados de um projeto padrão de um edifício

4 Estudo de Caso

Foram apresentados oito critérios, observados na literatura, que influenciam na seleção de fundações, tais como: i) Custos; ii) Qualidade da Mão de Obra; iii) Local da Obra; iv) Fornecedores Disponíveis; v) Disponibilidade de Equipamentos; vi) Vizinhança (Vibração e Ruído); vii) Segurança; viii) Tempo de execução; e ix) Outros não listados. Os questionados deveriam pontuar qual o critério que considera mais relevante na tomada de decisão.

O que se notou foi que os critérios mais relevantes para determinação do tipo de estaca, sendo eles, custo de execução (32%), vizinhança (ruído/vibração) (18%), qualidade da mão de obra (17%) e tempo de execução (12%), conforme gráfico da Figura 3,

Para a composição dos critérios que foram utilizados na aplicação do método, este trabalho aplicou um questionário à profissionais da área de engenharia, foram 57 profissionais consulados com experiência na área de fundações. Sendo por fim escolhidas as estacas: Pré-moldada de concreto, Franki, hélice contínua e Strauss como alternativas da tomada de decisão.

Um projeto padrão de um edifício foi utilizado pelos autores, e calculado o total de cargas solicitantes na fundação, conforme Quadro 3, por meio do método rigoroso de pré-dimensionamento de pilares (NBR 6114:2014).

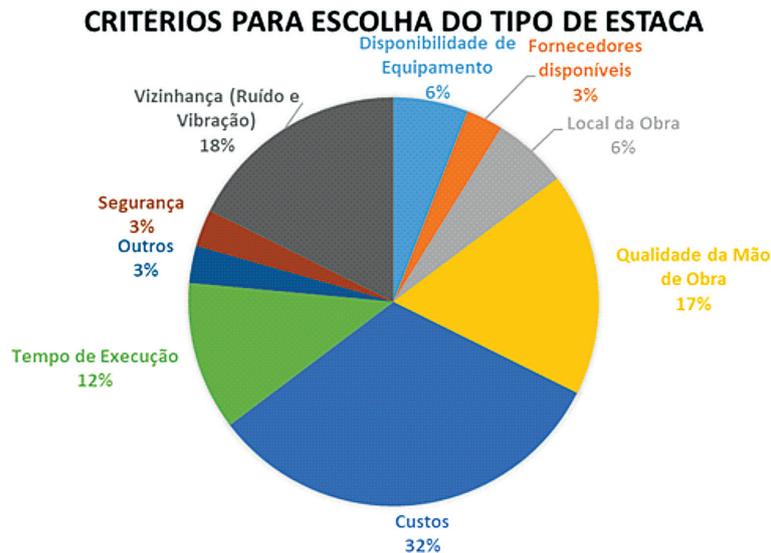


Figura 3 – Relevância dos critérios para escolha de fundações.

Fonte: Os autores (2019)

⁴ Representa o auto vetor da matriz de comparação dos critérios normalizado.

Com os valores das cargas do Quadro 3, foram determinados intervalos de carga, conforme Quadro 4, a fim de possibilitar a comparação do custo de execução das estacas a partir da relação entre o intervalo de carga e o diâmetro de cada estaca.

Quadro 3 – Cargas Solicitantes em Cada Pilar.

Pilar	Carga Total na Fundação		
	Permanente (kN)	Variável (kN)	Total (kN)
P1 = P6	691,47	91,91	783,38
P2 = P5	941,45	153,44	1094,89
P3 = P4	859,1	174,72	1033,82
P7 = P12	825,58	116,87	942,45
P8 = P11	984,81	238,26	1223,07
P9 = P10	1267,69	342,52	1610,21
P13 = P18	574,68	82,64	657,32
P14 = P17	829,16	126,28	955,44
P15 = P16	958,98	108,98	1067,96

Fonte: os autores (2019).

Quadro 4– Intervalos de Carga analisados.

Pilar	Carga na fundação (kN)	Intervalo de carga (kN)
P1=P6	783,38	600 - 800
P2=P5	1094,89	1000 - 1200
P3=P4	1033,82	1000 - 1200
P7=P12	942,45	800 - 1000
P8=P11	1223,07	1200 - 1400
P9=P10	1610,21	1400 - 1600
P13=P18	657,32	600 - 800
P14=P17	955,44	800 - 1000
P15=P16	1067,96	1000 - 1200

Fonte: Os autores (2019)

Em seguida, a partir de uma sondagem realizada, conforme Figura 4, utilizada no dimensionamento das possíveis soluções de fundações que compõem o cenário deste estudo de caso, sendo possível por meio dessa sondagem, pelo método de eliminação, descartar as alternativas de estacas que não se aplicam ao cenário da obra.

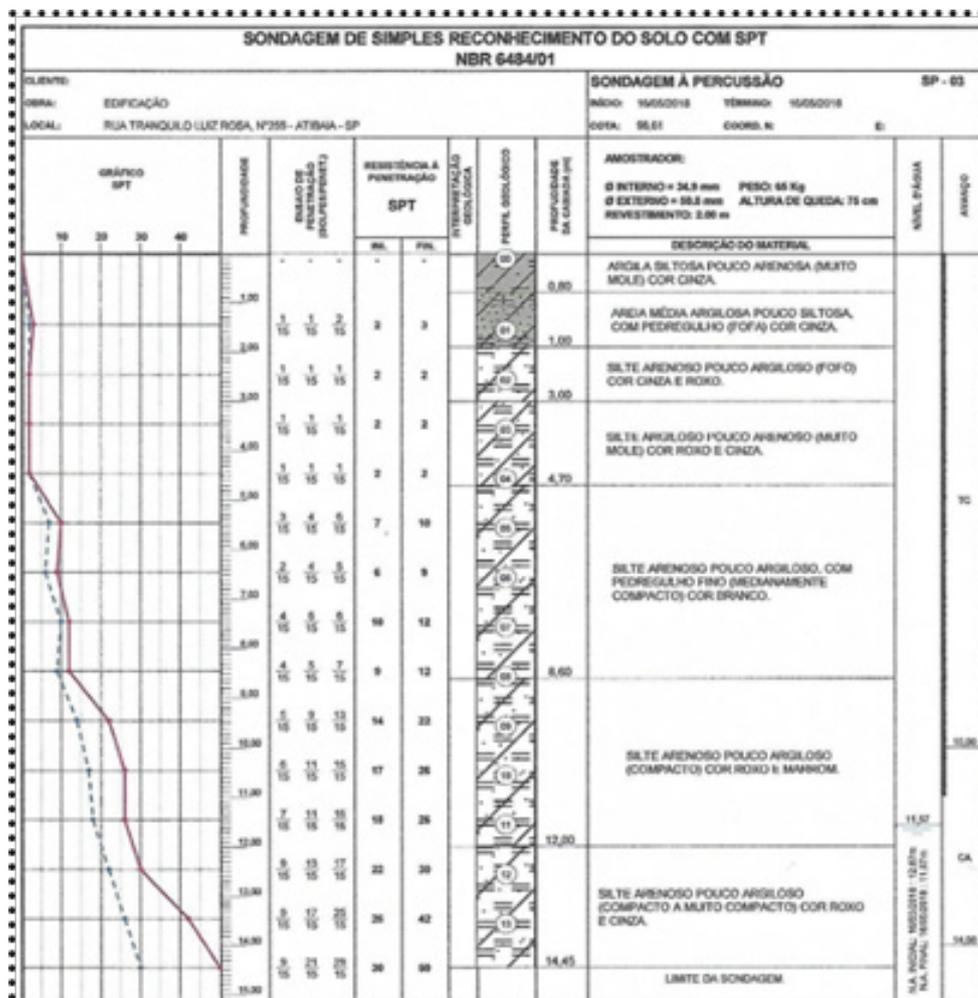


Figura 4 – Sondagem (SPT) de referencia.

Fonte: os autores (2019).

A fim de quantificar o critério custo de execução, inicialmente, foram calculadas as capacidades de carga das estacas hélice contínua, Strauss, Franki e pré-moldada de concreto a partir do método de Aoki e Velloso com base na sondagem, o Quadro 5 apresenta os diâmetros de cada estaca para cada intervalo de carga, esses valores foram utilizados para comparar o custo de execução de cada estaca para cada intervalo.

Após determinar cada diâmetro de cada estaca em seu respectivo intervalo de carga, com a partir de tabelas de composições de custos para o estado de São Paulo foi gerado o Quadro 6, que sintetiza o custo para

execução de 1m para cada diâmetro e tipo de estaca analisado para cada intervalo de carga.

As respostas obtidas, ilustrados na Figura 5, apontam que a qualidade da mão de obra na execução da estaca hélice contínua foi classificada por 61% das respostas como média, a mão de obra de execução da Strauss foi classificada com 50% como alta, a mão de obra de execução da estaca Franki foi classificada com 55% como média e a mão de obra de execução da estaca pré-moldada de concreto foi classificada com 50,0% como alta.

O critério ruído e vibração foi julgado de forma qualitativa de acordo com o Manual de Estruturas

Quadro 5– Diâmetro das estacas para cada intervalos de Carga analisado.

Intervalo de carga (kN)	Diâmetro estaca Hélice Contínua (cm)	Diâmetro estaca Strauss (cm)	Diâmetro estaca Franki (cm)	Diâmetro estaca pré-moldada de concreto (cm)
600 - 800	60	60	50	40
800 - 1000	70	70	60	50
1000 - 1200	80	80	70	60
1200 - 1400	90	90	80	60
1400 - 1600	90	90	80	70

Fonte: os autores (2019).

Quadro 6– Custos de execução por metro de cada estaca.

Intervalo de carga (kN)	Custo estaca Hélice Contínua (R\$)	Custo estaca Strauss (R\$)	Custo estaca Franki (R\$)	Custo estaca pré-moldada de concreto (R\$)
600 - 800	254,84	268,84	333,6	218,7
800 - 1000	310,39	310,37	442,49	291,52
1000 - 1200	372,28	351,9	495,77	315,49
1200 - 1400	475,9	393,45	563,03	315,49
1400 - 1600	475,9	393,45	563,03	320,19

Fonte: os autores (2019).

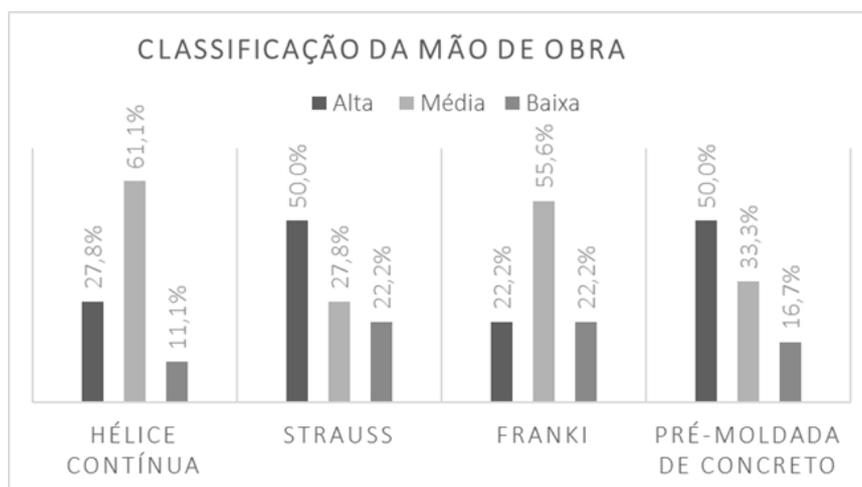


Figura 5 – Qualidade da mão de obra por tipo de estaca.

Fonte: os autores (2019).

de Fundações da ABCP (2008). Nesse critério foram avaliados apenas a ausência ou presença de vibrações e ruídos durante a execução e são apresentados no Quadro 7.

O critério tempo de execução foi julgado de forma quantitativa de acordo com o Manual de Estruturas de Fundações da ABCP (2008), e considera a profundidade total em metros executada por dia, conforme Quadro 8.

Para quantificar o critério qualidade da mão de obra, foi aplicado um questionário aos 57 profissionais consultados, com objetivo de avaliar em alta, média e baixa a qualidade da mão de obra que executa cada tipo de estaca.

Com base na estruturação hierárquica, avalia-se os critérios dois a dois, visando determinar a

importância relativa entre eles e seu peso relativo na meta global, o Quadro 9 compara par a par cada critério a partir de sua relevância destacada nos questionários aplicados, e com os dados da matriz comparativa do grupo de critérios obtém-se a matriz comparativa normalizada do grupo de critérios no Quadro 10.

Em seguida a partir da média das linhas da Matriz Normalizada do Grupo de Critérios, ou seja, o Quadro 10, é possível obter o resultado da comparação entre critérios, ou seja, a porcentagem de importância de cada um deles representada pelo Vetor Eigen da matriz, conforme Quadro 11.

A partir do gráfico da Figura 6, observa-se que o critério de maior relevância é o custo de execução com 33%, isso significa que este critério é o que

Quadro 7 – Vibrações e Ruídos na Execução das estacas.

Tipo de estaca	Descrição	
Hélice Contínua	Não produz distúrbios, vibrações e descompressão do terreno	ausência de vibrações/ruído
Strauss	Ausência de trepidações e vibrações em prédios vizinhos	ausência de vibrações/ruído
Franki	Provoca vibração e ruídos intensos durante a execução	presença de vibração/ruído
Pré-moldada de concreto	Apresenta problemas de barulho e vibrações durante a cravação	presença de vibração/ruído

Fonte – os autores (2019).

Quadro 8 – Tempo de execução para cada estaca

Tipo de estaca	Descrição	m/dia
Hélice Contínua	150 a 400 metros por dia, dependendo da profundidade da estaca, do diâmetro da hélice, do tipo e resistência do terreno e do torque do equipamento.	275
Strauss	30 metros diários.	30
Franki	40 metros diários.	40
Pré-moldada de concreto	50 metros diários, ocorrendo variações em função das características do solo, profundidade da fundação, condições do terreno e distância entre estacas.	50

Fonte: os autores (2019).

Quadro 9 – Comparação pareada do critérios.

	Custo de execução	Qualidade da mão de obra	Tempo de execução	Ruído/Vibração
Custo de execução	1	1,21	1,47	1,89
Qualidade da mão de obra	1/1,21	1	1,63	1,21
Tempo de execução	1/1,47	1/1,63	1	1,32
Ruído/Vibração	1/1,89	1/1,21	1/1,32	1
Total	3,036	3,650	4,858	5,420

Fonte: os autores (2019)

Quadro 10 – Comparação pareada do critérios normalizada.

	Custo de execução	Qualidade da mão de obra	Tempo de execução	Ruído/Vibração
Custo de execução	$1/3,036 = 0,329$	0,332	0,303	0,349
Qualidade da mão de obra	$(1/1,21)/3,036 = 0,272$	0,274	0,336	0,223
Tempo de execução	$(1/1,47)/3,036 = 0,224$	0,168	0,206	0,244
Ruído/Vibração	$(1/1,89)/3,036 = 0,174$	0,226	0,156	0,185

Fonte: os autores (2019).

mais contribuirá para meta global, e o critério Ruído/Vibração com 19% é o que menos contribui.

5 Estudo de Caso

Para melhor entendimento da aplicação do método, a meta global, os objetivos, os critérios e as alternativas estão ilustrados na Figura 7.

Com base nos dados obtidos foi elaborada a matriz comparativa das alternativas com relação ao critério tempo de execução, resultando o gráfico

ilustrado na Figura 8 com os resultados de prioridade para as alternativas com relação ao critério Tempo de Execução

Analisando-se o gráfico, nota-se que a estaca Hélice Contínua é a alternativa mais favorável com relação ao critério tempo de execução com 72,52%, e estaca Strauss a menos favorável com 5,52% de preferência.

Também foi elaborada a matriz comparativa das alternativas com relação ao critério ruído/vibrações resultando no gráfico da Figura 9 que ilustra os resultados de prioridade para o grupo de alternativas com relação ao critério Ruído/Vibração.

Quadro 11– Vetor Eigen dos critérios selecionados.

	Cálculo	Vetor Eigen	
Custo de execução	$(0,329 + 0,332 + 0,303 + 0,349)/4$	0,328	32,81%
Qualidade da mão de obra	$(0,272 + 0,274 + 0,336 + 0,223)/4$	0,276	27,63%
Tempo de execução	$(0,224 + 0,168 + 0,206 + 0,244)/4$	0,210	21,04%
Ruído/vibração	$(0,174 + 0,226 + 0,156 + 0,185)/4$	0,185	18,53%

Fonte: os autores (2019).

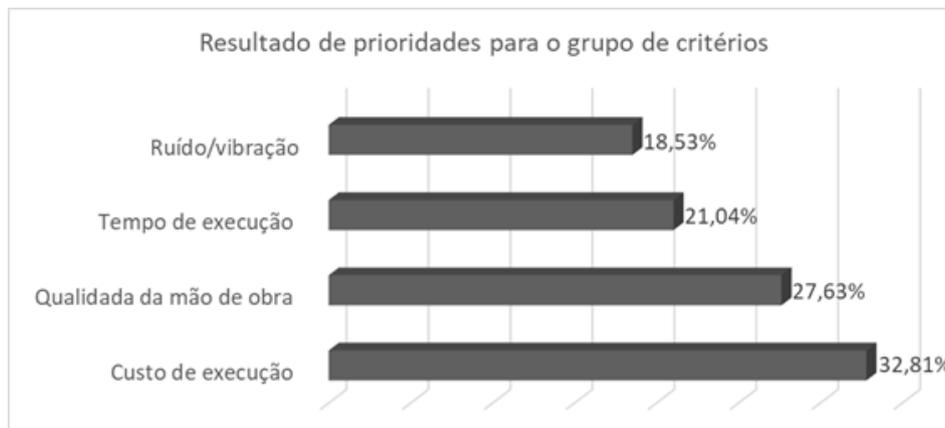


Figura 6 – Gráfico do resultado da prioridade dos critérios.

Fonte: os autores (2019).

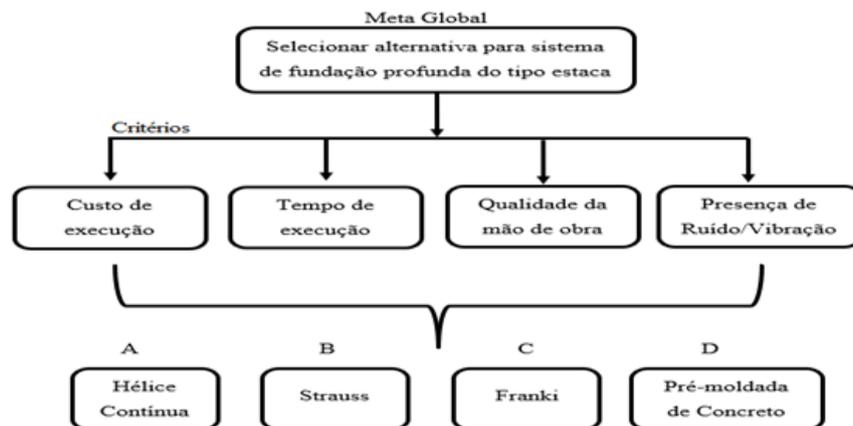


Figura 7 – Estruturação do AHP para o Estudo de Caso.

Fonte: os autores (2019).

Hélice contínua e Strauss são as alternativas mais favoráveis com relação ao critério ruído/vibração (45%), ou seja, elas não apresentam ruído/vibração durante sua execução. Por outro lado as estacas Franki e pré-moldada de concreto são as alternativas menos favorável com 5% de preferência.

O gráfico ilustrado na Figura 10 apresenta o resultado de prioridades para o grupo de alternativas com relação ao Critério Mão de Obra. Analisando-se o gráfico, observa-se que as estacas Pré-moldada de concreto e Strauss são as alternativas mais favoráveis com relação ao critério Mão de Obra (45%), ou seja, elas apresentam mão de obra mais especializada do que as estacas Franki e hélice Contínua que apresentam apenas 5% de preferência.

O gráfico da Figura 11 ilustra os resultados de prioridade para as alternativas com relação ao critério Custo de Execução para o intervalo 600 a 800 kN. Analisando-se o gráfico, nota-se que a estaca Pré-moldada de concreto é a alternativa mais favoráveis com relação ao critério Custo de Execução para o intervalo 600 a 800 kN com 57,99% de importância, e a estaca Franki é a menos favorável com 4,26% de

importância frente ao critério Custo de Execução.

Analisando-se o gráfico da figura 11, nota-se que a estaca pré-moldada de concreto é a alternativa mais favoráveis com relação ao critério Custo de Execução para o intervalo 600 a 800 kN com 57,99% de importância e a estaca Franki é a menos favorável com 4,26% de importância frente ao critério Custo de Execução. O gráfico da Figura 12 ilustra os resultados de prioridade para as alternativas com relação ao critério Custo de Execução para o intervalo 1000 a 1200 kN.

Analisando-se o gráfico da figura 12, observa-se que a estaca pré-moldada de concreto é a alternativa mais favoráveis com relação ao critério Custo de Execução para o intervalo 1000 a 1200 kN com 54,30% de importância e a estaca Franki é a menos favorável com 3,94% de importância frente ao critério Custo de Execução.

O gráfico da Figura 13 ilustra os resultados de prioridade para as alternativas com relação ao critério Custo de Execução para o intervalo 1200 a 1400 kN. Analisando-se o gráfico da Figura 13 observa-se que novamente a estaca pré-moldada de concreto é

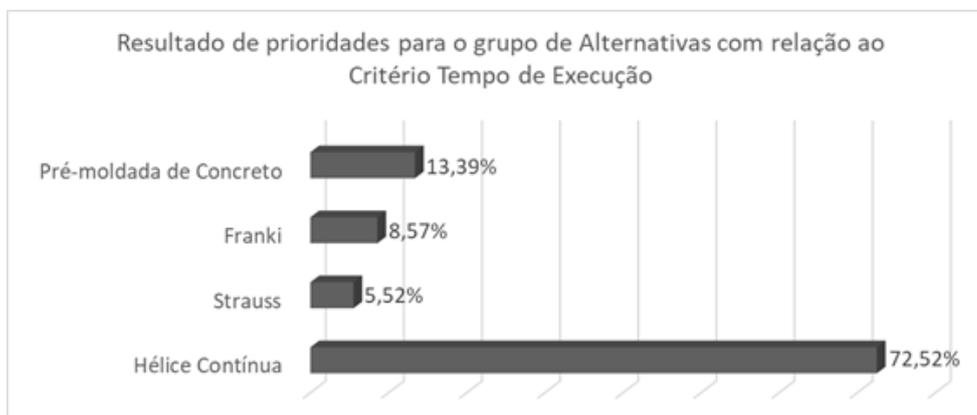


Figura 8 – Gráfico do resultado para o critério tempo de execução.

Fonte: os autores (2019).

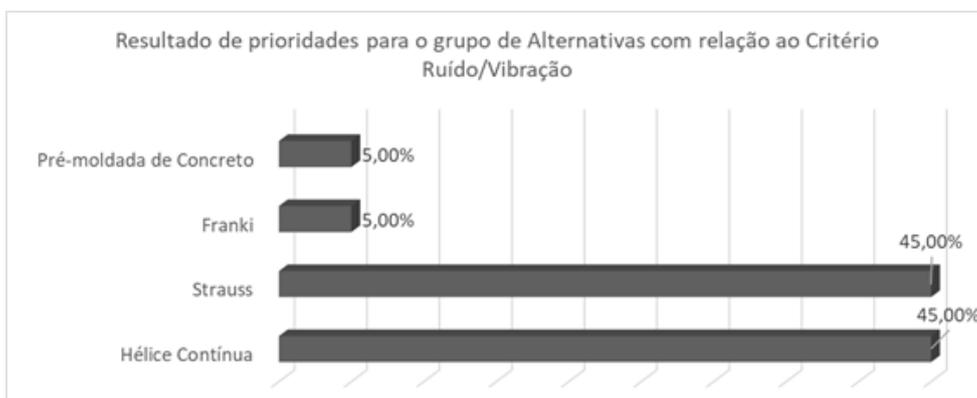


Figura 9 – Gráfico do resultado para o critério ruído/vibração.

Fonte: os autores (2019).

a alternativa mais favoráveis com relação ao critério Custo de Execução para o intervalo 1200 a 1400 kN com 57,08% de importância e a estaca Franki é a menos favorável com 4,47% de importância frente ao critério Custo de Execução.

O gráfico da Figura 14 ilustra os resultados de prioridade para as alternativas com relação ao critério Custo de Execução para o intervalo 1400 a 1600 kN. Analisando o gráfico, da Figura 14 nota-se que novamente a estaca Pré-moldada de concreto é a alternativa mais favoráveis com relação ao critério Custo de Execução para o intervalo 1400 a 1600 kN com 57,08% de importância, e a estaca Franki é a menos favorável com 4,47% de importância frente ao critério Custo de Execução. Nota-se que os valores são similares ao do intervalo 1200 a 1400 kN devido ao fato dos diâmetros para esses intervalos serem praticamente os mesmos.

Para se determinar a prioridade final de cada alternativa em relação à meta, é necessário realizar o

cruzamento entre as análises das alternativas de estacas com todos os critérios a fim de se obter uma análise geral. O cálculo da prioridade final é determinado pela soma dos produtos entre o peso de prioridade da alternativa e o peso do critério (CRUZ; MESQUITA FILHO; EGUTHI, 2016).

O gráfico da Figura 15 aponta que, a partir de uma análise multicriterial, inserindo os pesos de cada critério ao comportamento de cada alternativa, a alternativa que melhor atende à meta global definida no início deste trabalho, para o intervalo de carga de 600 a 800 kN, é a estaca pré-moldada de concreto com preferência de 36,99%.

O gráfico da Figura 16 mostra que a alternativa que melhor atende à meta global definida no início deste trabalho, para o intervalo de carga de 800 a 1000 kN, é a estaca hélice Contínua com preferência de 33,37%.

O gráfico da Figura 17 mostra que a alternativa que melhor atende à meta global definida no início

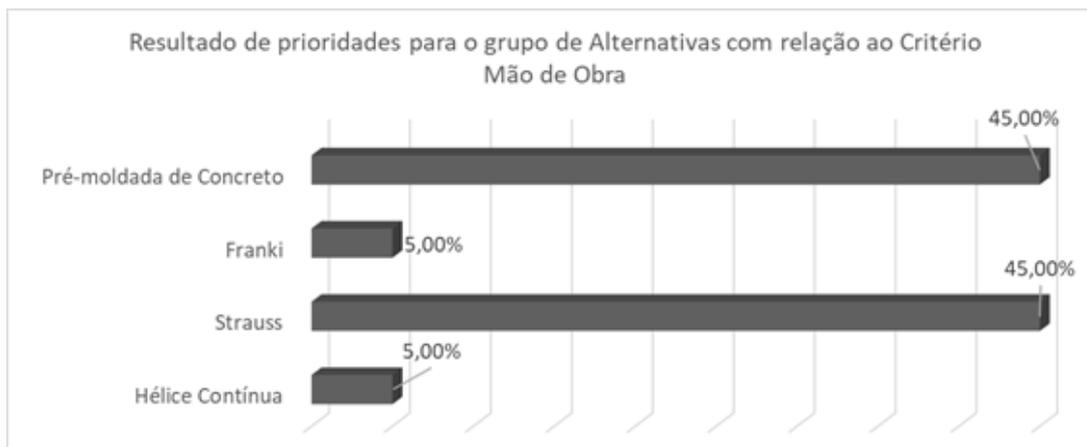


Figura 10 – Gráfico do resultado para o critério mão de obra.

Fonte: os autores (2019).

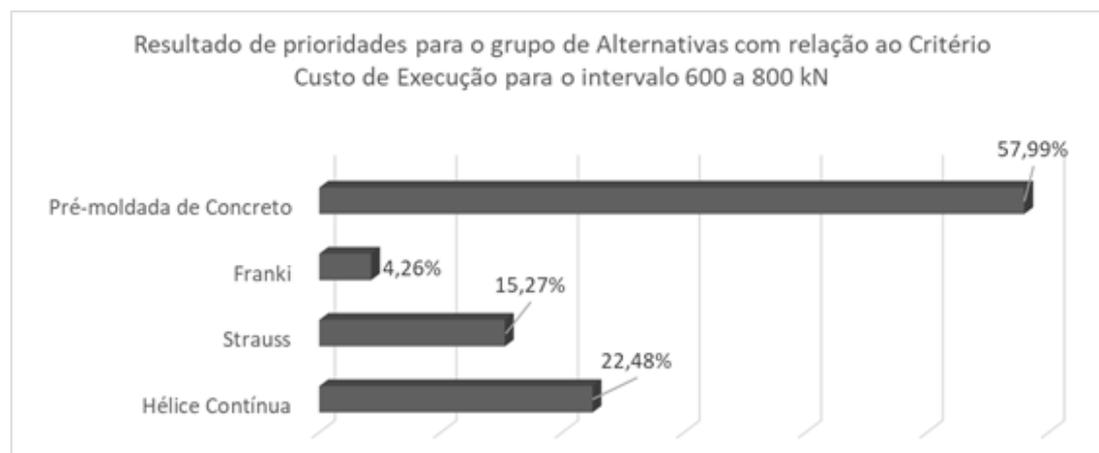


Figura 11 – Gráfico do resultado para o critério custo para estacas entre 600 kN à 800 kN.

Fonte: os autores (2019).

deste trabalho, para o intervalo de carga de 1000 a 1200 kN, é a estaca pré-moldada de concreto com preferência de 33,97%.

O gráfico da Figura 18 mostra que a alternativa que melhor atende à meta global definida no início deste trabalho, para o intervalo de carga de 1200 a 1400 kN, é a estaca pré-moldada de concreto com preferência de 34,89%.

Analisando todos os critérios, a estaca Pré-moldada de concreto é a alternativa mais preferível e a estaca Franki por sua vez é a menos preferível. Assim como mencionado anteriormente, a estaca Pré-moldada de concreto é muito utilizada como sistema de fundações profundas de edifícios, sendo assim, este estudo de caso apresentou um resultado esperado e coerente, constatando a efetividade desta ferramenta de apoio à tomada de decisão.

Os resultados apontados nas figuras, sinteticamente, representam o vetor prioridade de cada uma das alternativas calculados conforme modelo proposto pelo AHP. Por meio do estudo de caso o problema foi segmentado em critérios relevantes para obter melhor precisão dos resultados, com isso foi possível visualizar as prioridades das alternativas em relação à cada critério, possibilitando a análise do problema em partes, e por fim como um todo.

O gráfico da Figura 19 mostra que a alternativa que melhor atende à meta global definida no início deste trabalho, para o intervalo de carga de 1400 a 1600 kN, é a estaca pré-moldada de concreto com preferência de 34,89%.

Portanto, também no escopo de seleção de fundações a partir do estudo realizado verificou-se que o método AHP (Analytic Hierarchy Process), é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão relevante. Podendo ser utilizada na engenharia civil, uma vez

que a tomada de decisão estará sempre presente no cotidiano dos profissionais de engenharia.

Verifica-se que os valores são similares do intervalo 1200 a 1400 kN e do intervalo 1400 kN a 1600 kN, devido ao fato dos diâmetros para esses intervalos serem praticamente iguais, o que denota uma uniformização das fundações a partir de determinado carregamento. Para centros urbanos, avaliando-se os resultados de forma integrada, o que se nota é quase que impraticável a execução de estacas do tipo Franki, a partir dos critérios selecionados para análise.

Para os menores carregamentos são mais interessantes a estaca pré-moldada de concreto, a hélice contínua e a estaca Strauss, respectivamente. A medida em que se aumenta a carga a estaca Strauss aponta uma tendência de superar hierarquicamente a hélice contínua sendo que a partir de 1200 kN se torna mais interessante. Também conforme se aumenta o carregamento, há uma tendência de que a estaca pré-moldada de concreto perca a hegemonia para o cenário avaliado neste trabalho.

Em geral, as estacas pré-moldadas de concreto têm boa capacidade de carga, boa resistência de esforços de flexão e cisalhamento, porém, devido à questão de transporte da estrutura, as seções são limitadas.

Cabe salientar que a fundação do tipo hélice contínua vem sendo utilizada amplamente no Brasil desde 1987, mesmo com a alta produtividade, ausência de vibrações, alta capacidade de carga, e baixo nível de ruído, é a principal escolha dos projetistas na atualidade, de fato é bem hierarquizada, pois há quase que um equilíbrio de seu comportamento para a variabilidade de carregamento.

Esta análise de resultados, em função dos intervalos de carregamento é apresentado na Figura 20 para cada tipo de estaca e seu respectivo vetor de prioridade.

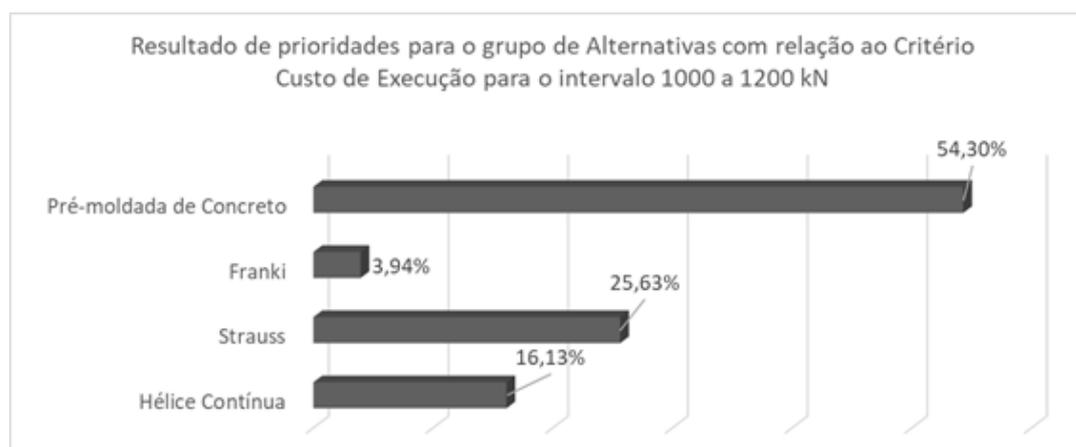


Figura 12 – Gráfico do resultado para o critério custo para estacas entre 1000 kN à 1200 kN.

Fonte: os autores (2019).

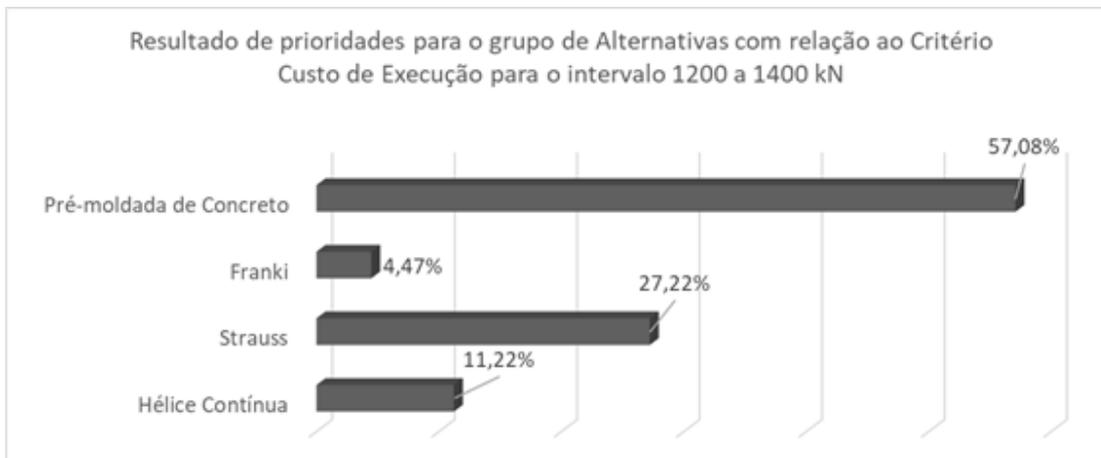


Figura 13 – Gráfico do resultado para o critério custo para estacas entre 1200 kN à 1400 kN.

Fonte: os autores (2019).

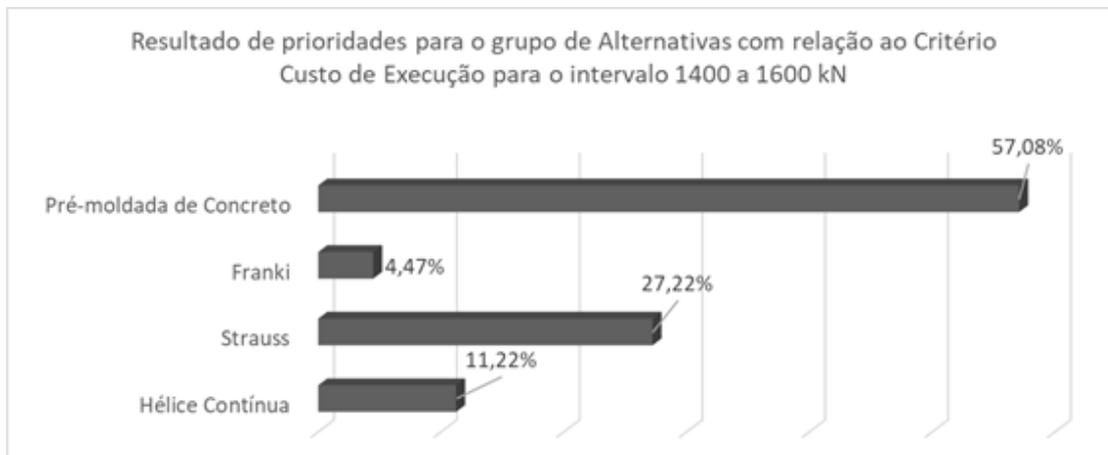


Figura 14 – Gráfico do resultado para o critério custo para estacas entre 1400 kN à 1600 kN.

Fonte: os autores (2019).



Figura 15 – Resultados Finais para as estacas de 600 kN à 800 kN.

Fonte: os autores (2019).



Figura 16 – Resultados Finais para as estacas de 800 kN à 1000 kN.

Fonte: os autores (2019).



Figura 17 – Resultados Finais para as estacas de 1000 kN à 1200 kN.

Fonte: os autores (2019).



Figura 18 – Resultados Finais para as estacas de 1200 kN à 1400 kN.

Fonte: os autores (2019).



Figura 19 – Resultados Finais para as estacas de 1400 kN à 1600 kN.

Fonte: os autores (2019).

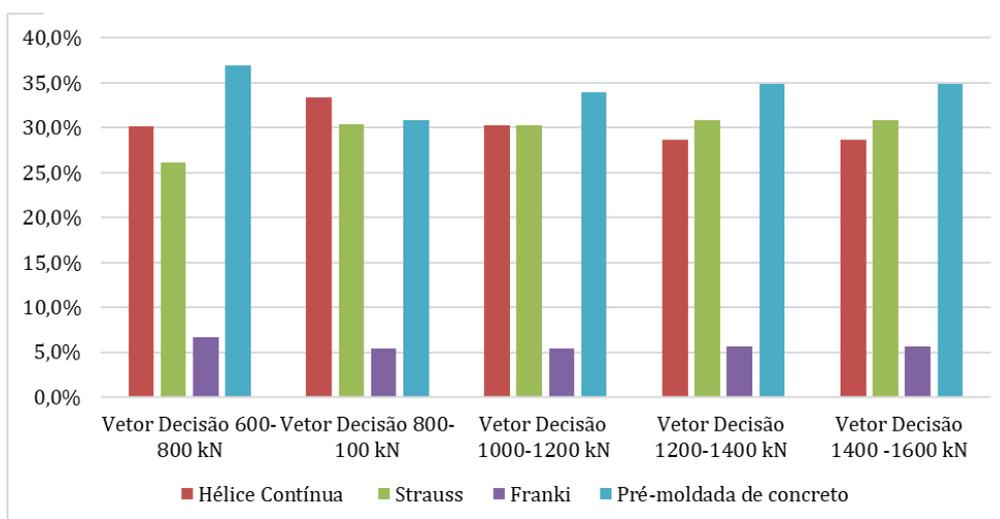


Figura 20 – Resultado consolidado do comportamento das alternativas.

Fonte: os autores (2019).

Conclusões

O trabalho consoante aos autores apresentando demonstra e confirma a aplicabilidade de métodos multicritérios que auxiliam na tomada de decisão, dentre eles o método AHP (Analytic Hierarchy Process) desenvolvido em 1970 por Thomas Saaty, caracterizado pela capacidade de analisar o problema de forma hierárquica, com sucesso em problemas de construção civil, particularmente a seleção de fundações.

A aplicação do modelo multicritério para selecionar alternativas de fundações profundas do tipo estaca em projetos de edifícios em centros urbanos, apresentou um panorama em que ainda estacas pré-moldadas de concreto são aquelas que possuem melhor desempenho, a partir dos critérios selecionados, e dos respectivos pesos dados pelos especialistas consultados.

Salienta-se a importância de se avaliar a aplicabilidade do modelo para outros tipos de fundações, em outros contextos geológicos com outros carregamentos.

Referencias

- AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. Construção de Edifícios: Do Início ao Fim da Obra. São Paulo: Pini Ltda, 2015. 270 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2010. 91 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (São Paulo). Rede Federal – Ministério da Educação (Org.). Fundação: Manual de Estruturas. 2008. Disponível em: <http://redefederal.mec.gov.br/images/pdf/setec_orientacoes_sobre_escolha_de_fundacoes.pdf>. Acesso em: 15 maio 2018.

CARVALHO, Kelly (Ed.). Conheça os fatores que influenciam a escolha do sistema de fundações profundas: Características do solo, da estrutura da edificação e condições de acessibilidade de equipamentos definem opção por estacas helice contínua, pré-fabricadas ou estacas raiz. *Téchne*, São Paulo, p.38-44, nov. 2013. Mensal. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/200/artigo301312-2.aspx>>. Acesso em: 24 maio 2018.

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. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Habitação: Planejamento e Tecnologia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2013.

CRUZ, Rafael Barreto Castelo da Cruz; MESQUITA FILHO, Arnaldo; EGUTHI, Dayane Ambrogi

Gualberto; SANTOS, Jackeliny Flores de Oliveira; SANTOS, Janaina Flores de Oliveira; ALVARDO, Valmik Celeste. Método de Tomada de Decisões de Reforços em Vigas. *Engenharia Estudo e Pesquisa Abpe*, São Paulo, v. 16, n. 1, p.20-33, jun. 2016.

JOPPERT JUNIOR, Ivan. Fundações e Contencções de Edifícios: Qualidade Total na Gestão do Projeto e Execução. São Paulo: Pini Ltda, 2007. 221 p.

JONES, Manley Howe. Tomada de Decisões pelo Executivo. São Paulo: Atlas, 1973. 2 v. Márcio Cotrim.

SANTOS, Luciano Ferreira dos; CRUZ, Rafael Barreto Castelo da. O Uso do Método AHP na Tomada de Decisão para Seleção de Sistemas de Lajes de Edifícios Comerciais. *Engenharia Estudo e Pesquisa Abpe*, São Paulo, v. 13, n. 1, p.39-52, jun. 2013.

SHIMIZU, Tamio. Decisão Nas Organizações. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 448 p.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. Fundações: Critérios de projeto Investigação do subsolo. Fundações Superficiais. Fundações Profundas. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2011. 568 p.