

SELEÇÃO DE ESCAVADEIRAS PARA MINERAÇÃO ATRÁVES DA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS CRITIC E MOORA

Bruno Pereira Diniz (UFCG-CDSA) *brunopereiradiniz046@gmail.com*

Daniel Augusto De Moura Pereira (UFCG-CDSA) *danielmoura@ufcg.edu.br*

João Cavalcanti Neto (UFCG-CDSA) *joao.cavalcanti@estudante.ufcg.edu.br*

Guilherme Nascimento Araújo (UFCG-CDSA) *guilherme1803gui@gmail.com*

Jordan Matheus Barbosa Araújo (UFCG-CDSA) *jordan_barbosa517@hotmail.com*

Rhuan do Espírito Santo e Silva (UFCG-CDSA) *rhuan.espirito@estudante.ufcg.edu.br*

Resumo

O presente artigo tem como objetivo apresentar a seleção de escavadeiras para mineração, que são máquinas de construções robustas e versáteis utilizadas principalmente para realizar uma variedade de tarefas, desde escavar e mover grandes quantidades de terra até a demolição de estruturas. Com seus sistemas hidráulicos avançados, essas máquinas oferecem eficiência e precisão em operações de escavação. Portanto, a partir dos métodos *Criteria Importance Through Intercriteria Correlation* (CRITIC) e *Multi-Objective Optimization Ratio Analysis* (MOORA) foi feita a aplicação com a utilização de critérios quantitativos e com as melhores alternativas do mercado de acordo com a popularidade de cada marca no ramo de máquinas de escavações. Os métodos utilizados apresentaram de maneira organizada o ranqueamento das escavadeiras mais favoráveis, as mais bem avaliadas foram, a John Deere - 350G LC como primeiro lugar, a Luigong - CLG922E na segunda colocação e na terceira posição ficou a New Holland - E405C EVO.

Palavras-Chaves: *Escavadeiras. CRITIC. MOORA. Escavação. Método Multicritério.*

1. Introdução

As escavadeiras são máquinas poderosas e versáteis amplamente utilizadas na construção civil e em projetos de escavação em todo o mundo, são compostas por uma base robusta com esteiras ou rodas para mobilidade, uma cabine para o operador e um braço articulado equipado com uma caçamba na ponta. A principal característica dessas máquinas é o uso de sistemas

hidráulicos para controlar e mover o braço, a caçamba e outros acessórios, permitindo que o operador tenha um controle preciso sobre as operações.

Essas máquinas são capazes de escavar grandes quantidades de solo e carregar materiais com facilidade, tornando-as ideais para a construção de estradas, fundações de edifícios, escavação de valas e canais, entre outras tarefas. Além disso, as escavadeiras hidráulicas podem ser equipadas com acessórios adicionais, como martelos hidráulicos, compactadores, garras e serras, aumentando sua versatilidade e capacidade de desempenhar diferentes tarefas.

No geral, as escavadeiras desempenham um papel crucial na indústria da construção, tornando os projetos de escavação mais rápidos, eficientes e precisos. Sua capacidade de realizar uma ampla variedade de tarefas e seu alto desempenho as tornam uma escolha popular entre os empreiteiros e profissionais da construção.

O Apoio Multicritério à Decisão (AMD) é uma técnica utilizada para ajudar a tomar decisões complexas, onde há vários critérios e objetivos a serem considerados. Ele permite avaliar e comparar diferentes opções de acordo com critérios quantitativos e qualitativos, e fornece uma visão geral dos resultados para ajudar a identificar a melhor escolha.

Para Gomes e Gomes (2019), os métodos AMD, podem ser compreendidos como técnicas que viabilizam ao decisor (seja indivíduo, grupos ou organizações) a estruturação e análise de problemas complexos de avaliação de forma transparente, com a introdução de critérios quantitativos e qualitativos, em casos específicos, havendo trade-off entre eles.

Esses métodos permitem aos agentes decisores estruturarem um processo decisório, considerando vários aspectos de avaliação, tais como técnicos, socioeconômicos e ambientais por exemplo, em níveis operacionais e estratégicos para tomada de decisão (Greco; Figueira; Ehrgott, 2016).

O presente trabalho teve o objetivo de auxiliar as mineradoras e condutores de escavadeiras, a partir dos métodos já citados anteriormente, levando em consideração cinco critérios de decisão que irão definir a melhor escolha, por meio da comparação entre os quatro tipos de máquinas em análise.

2. Referencial Teórico

2.1. Equipamento Escavadeira

Mais recentemente, no início da década de 1990, surgiram as escavadeiras acionadas por pistões hidráulicos, cujas principais características eram a velocidade e a precisão de comando, resultando em alta produtividade (Ricardo; Catalini, 1990, p. 278).

Segundo Germany (2002, p. 16), a utilização de escavadeiras hidráulicas em minas vem crescendo em relação a outros tipos de equipamentos de escavação devido à sua capacidade de suportar solos com baixa resistência à compressão.

Segundo Pereira e Costa (1983, p. 77) e Jaworski (2011, p. 47), uma escavadeira hidráulica é uma unidade carregadeira-escavadeira, geralmente apoiada em coxins, com a característica de poder girar em um eixo vertical. Ficam quase estacionários e só se movem quando seu alcance não consegue mais alcançar o material a ser escavado.

O carregamento é feito através do acionamento da concha que fica acoplada em uma lança. Trata-se de um equipamento extremamente versátil, pois escava qualquer tipo de material, inclusive rochas e solo mole. Pode ser usado para dar acabamento em taludes de cortes e dando auxílio no descarregamento e encaixe de elementos de bueiros (Ramires, 2017).

2.2. Método CRITIC

O método *CRITeria Importance Through Intercriteria Correlation* (CRITIC), foi proposto por Diakoulaki, Mavrotas e Papayannakis em 1995, é utilizado principalmente para determinar o peso dos atributos. No método atual, os atributos não estão em contradição uns com os outros, e os pesos dos atributos são determinados utilizando a matriz de decisão (Lima, 2021).

Para Lima (2021), o método CRITIC inclui as seguintes características:

- Não há necessidade de independência de atributos;
- Os atributos qualitativos são transformados em atributos quantitativos.

A matriz de decisão é baseada na inserção do método e as alternativas e os atributos são baseados nas informações recebidas do decisor, conforme mostrado na Matriz 1.

$$X = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mj} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} ; i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (1)$$

Onde r_{ij} indica o elemento da matriz de decisão para i_{th} alternativa em j_{th} atributo.

Passo 1: A Matriz de Decisão Normalizada

A fim de normalizar os atributos positivos e negativos da matriz de decisão, são utilizadas as Equações 2 e 3, respectivamente.

Atributos positivos:

$$X_{ij} = \frac{r_{ij} - r_i^-}{r_i^+ - r_i^-} ; i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

Atributos negativos:

$$X_{ij} = \frac{r_{ij} - r_i^+}{r_i^- - r_i^+} ; i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Onde x_{ij} representa um valor normalizado da matriz de decisão, para i_{th} alternativa em j_{th} atributo e $r_i^{\text{maior}} = \max(r_1, r_2, \dots, r_m)$ e $r_i^{\text{menor}} = \min(r_1, r_2, \dots, r_m)$.

Passo 2: O Coeficiente de Correlação

O coeficiente de correlação entre atributos é determinado pela Equação 4.

$$p_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j) \times (x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \times \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (4)$$

Onde $\bar{x}_j$ e $\bar{x}_k$ representam a média dos atributos j_{th} e k_{th} . $\bar{x}_j$ é calculado a partir

de Equação (5). Da mesma forma, é obtido para $\bar{x}_k$: Além disso, ρ_{jk} é o coeficiente de correlação entre os atributos j_{th} e k_{th} .

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}; \quad i = 1, \dots, m \quad (5)$$

Passo 3: O Índice (C)

Em primeiro lugar, o desvio padrão de cada atributo é estimado pela Equação (6).

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}; \quad i = 1, \dots, m \quad (6)$$

Depois, o índice (C) é calculado usando na Equação 7.

$$C_j = \sigma_j \times \sum_{k=1}^n (1 - p_{jk}); \quad j = 1, \dots, n \quad (7)$$

Passo 4: O Peso dos Atributos

Os pesos dos atributos são determinados pela Equação (8).

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}; \quad j = 1, \dots, n \quad (8)$$

Etapa final: O Ranking Final de Atributos

Os pesos dos atributos são dispostos em ordem decrescente para a classificação final dos atributos.

2.3. Método MOORA

Este método, conforme menciona Villa et al. (2019), utiliza a estrutura multiplicativa completa e a técnica da dominância para gerar um índice de classificação. A sigla MOORA define o entendimento da proporcionalidade de fatores (inglês) Multi Objective Optimization on basis of Ratio Analysis. O método, baseia-se na respectiva estrutura da matriz de decisão X, onde cada elemento da matriz de decisão X, x_{ij} indica a classificação alternativa i em atributo j, seja $i = 1, 2, \dots, m$ e $j = 1, 2, \dots, n$. Portanto, a matriz de decisão é definida como: $X = [X_{ij}]_{(m \times n)}$.

O método segue a seguinte axiomática;

1. O método segue a seguinte matriz (Equação 9);

$$N^{X_{ij}} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m X_{ij}^2}} \quad (9)$$

Onde:

X_{ij} = resposta j para a alternativa do objetivo i.

J = alternativas do modelo.

I = objetivos.

$N^{X_{ij}}$ = resultante normalizada da alternativa j em relação ao objetivo i.

2. Otimizando o modelo, segue-se a Equação 10.

$$N_{Yj} = \sum_{i=1}^{i=g} N^{X_{ij}} - \sum_{i=g+1}^{i=n} N^{X_{ij}} \quad (10)$$

Onde:

i = 1, 2, ..., g para objetivos monotônicos de benefício.

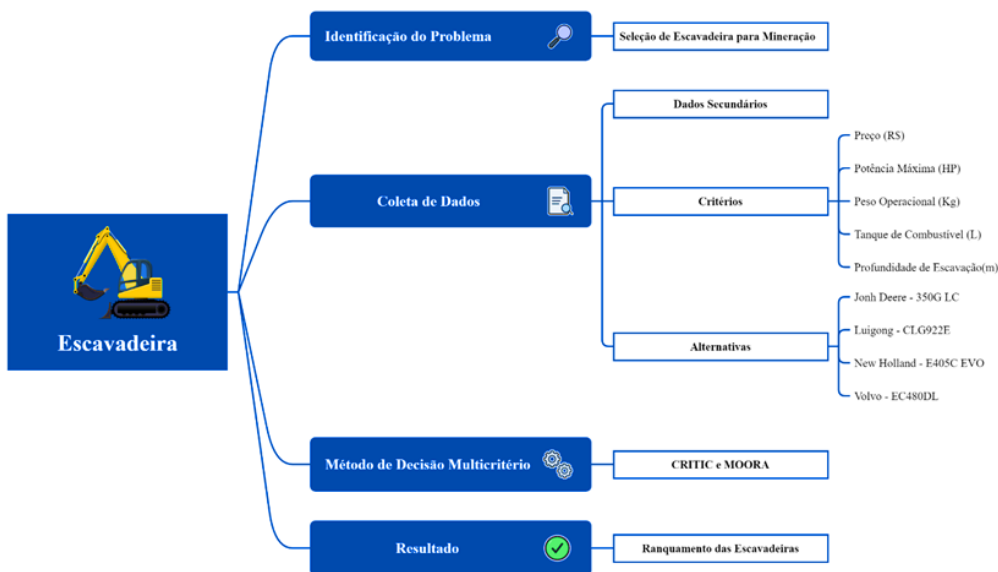
i = g+1, g+2, ..., n para objetivos monotônicos de custo.

$N^{X_{ij}}$ = normalização da alternativa j (performance: 0 a 1).

3. Metodologia

Trata-se de uma pesquisa quantitativa de caráter exploratória e que seguiu o seguinte fluxograma metodológico para sua realização, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma Metodológico



Fonte: Autores (2023)

A partir da identificação do problema, a seleção da escavadeira para mineração, elencou-se os critérios quantitativos, a saber: Preço, Potência Máxima, Peso Operacional, Tanque de Combustível e Profundidade de Escavação.

Em seguida, foi indicada uma pré-seleção de alternativas viáveis, de acordo com os critérios, e cinco modelos de motoniveladoras foram indicados para o modelo de decisão: Jonh Deere - 350G LC, Luigong - CLG922E, New Holland - E405C EVO e Volvo - EC480DL.

Por fim, os métodos de Análise de Decisão definido para apoiar a seleção das escavadeiras foi o CRITIC, para obtenção de pesos dos critérios, e o MOORA para a ordenação das máquinas. A seleção da escavadeira deveu-se à encomenda da melhor alternativa apresentada nos métodos mencionados acima.

4. Resultados e Discussão

4.1. Seleção das Escavadeiras

Para o desenvolvimento do trabalho foram selecionados quatro tipos de escavadeiras, que são detalhados a seguir:

Como mencionado anteriormente no artigo, foram selecionadas a Escavadeira Jonh Deere - 350G LC (Figura 2), a Escavadeira Luigong - CLG922E (Figura 3), a Escavadeira New Holland - E405C EVO (Figura 4) e a Escavadeira Volvo - EC480DL (Figura 5).

As alternativas e os critérios, pré-selecionados de acordo com a importância para o operador da máquina:

- **Alternativas:** (A1) Jonh Deere - 350G LC; (A2) Luigong - CLG922E; (A3) New Holland - E405C EVO; e (A4) Volvo - EC480DL.
- **Crítérios:** (C1) Preço (R\$); (C2) Potência Máxima (Hp); (C3) Peso Operacional (Kg); (C4) Tanque de Combustível (L); e (C5) Profundidade de Escavação (m).

Figura 2 – Escavadeira John Deere - 350G LC



Fonte: JOHN DEERE “S.D.”

Figura 3 – Escavadeira Luigong - CLG922E



Fonte: LUIGONG “S.D.”

Figura 4 – Escavadeira New Holland - E405C EVO



Fonte: NEW HOLLAND “S.D.”

Figura 5 – Escavadeira Volvo - EC480DL


Fonte: VOLVO “S.D.”

4.2. Aplicação do CRITIC

A primeira etapa da aplicação do método CRITIC, utilizado principalmente com a finalidade de atribuir peso aos critérios, para a escolha da Escavadeira é inserir as alternativas e os critérios na matriz de decisão, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de Decisão

MATRIZ DE DECISÃO					
ALTERNATIVAS/CRITÉRIOS	Preço (R\$)	Peso Operacional (Kg)	Potência do Motor (Hp)	Tanque de Combustível (L)	Profundidade de Escavação (m)
Jonh Deere - 350G LC	622.944,30	36.180	271	630	8,18
Luigong - CLG922E	457.519,36	22.000	150	450	6,62
New Holland - E405C EVO	673.195,14	38.574	284	580	6,40
Volvo - EC480DL	955.181,26	48.000	360	685	9,17

Fonte: Autor (2023)

Após preenchimento da matriz de decisão, verificar quais critérios serão para maximizar e minimizar, como apresenta a Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de decisão com Atributos Seleccionados

TIPO	MIN	MIN	MAX	MAX	MAX
ALTERNATIVAS / CRITÉRIOS	Preço (R\$)	Peso Operacional (Kg)	Potência do Motor (Hp)	Tanque de Combustível (L)	Profundidade de Escavação (m)
Jonh Deere - 350G LC	622944,30	36180	271	630	8,18
Luigong - CLG922E	457519,36	22000	150	450	6,62
New Holland - E405C EVO	673195,14	38574	284	580	6,4
Volvo - EC480DL	955181,26	48000	360	685	9,17

Fonte: Autor (2023)

A próxima etapa é realizar a normalização da matriz de decisão, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz de Decisão Normalizada

MATRIZ NORMALIZADA					
ALTERNATIVAS / CRITÉRIOS	Preço (R\$)	Peso Operacional (Kg)	Potência do Motor (Hp)	Tanque de Combustível (L)	Profundidade de Escavação (m)
Jonh Deere - 350G LC	0,668	0,455	0,576	0,766	0,643
Luigong - CLG922E	1,000	1,000	0,000	0,000	0,079
New Holland - E405C EVO	0,567	0,363	0,638	0,553	0,000
Volvo - EC480DL	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000

Fonte: Autor (2023)

Após realizar a normalização, a próxima etapa é o cálculo do Coeficiente de Correlação, entre os atributos ajustados, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz de Correlação entre os Atributos Ajustados

MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS AJUSTADOS					
CRITÉRIOS	Preço (R\$)	Peso Operacional (Kg)	Potência do Motor (Hp)	Tanque de Combustível (L)	Profundidade de Escavação (m)
Preço (R\$)	0,000	0,042	1,951	1,882	1,765
Peso Operacional (Kg)	0,042	0,000	1,999	1,952	1,697
Potência do Motor (Hp)	1,951	1,999	0,000	0,038	0,293
Tanque de Combustível (L)	1,882	1,952	0,038	0,000	0,190
Profundidade de Escavação (m)	1,765	1,697	0,293	0,190	0,000

Fonte: Autor (2023)

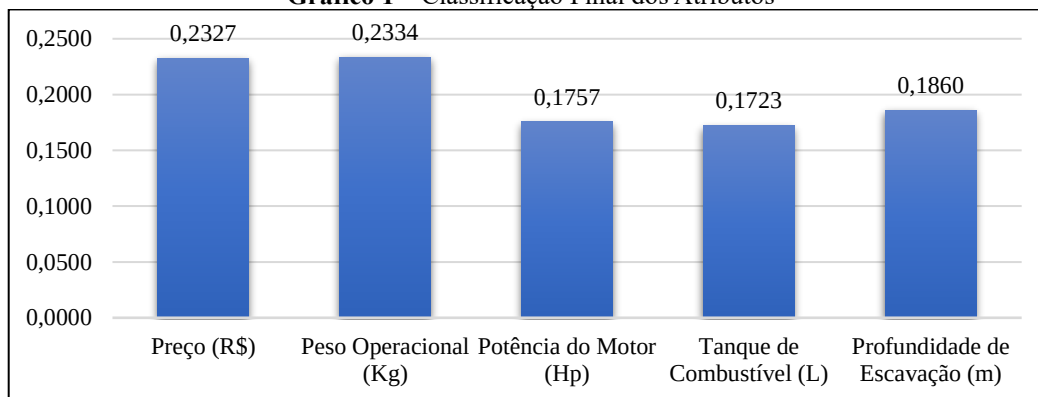
De acordo com o resultado obtido com o método CRITIC, a partir do cálculo do Índice (C), é gerado a ordenação dos critérios com seus respectivos pesos e porcentagem, como mostra a Tabela 4 e no Gráfico 1 mostra classificação final dos atributos de acordo com sua importância.

Tabela 4 – Ordenação CRITIC

C	W	%	RANKING
2,345	0,2327	23,27%	2
2,352	0,2334	23,34%	1
1,771	0,1757	17,57%	4
1,736	0,1723	17,23%	5
1,875	0,1860	18,60%	3

Fonte: Autor (2023)

Gráfico 1 – Classificação Final dos Atributos



Fonte: Autor (2023)

O critério que terá maior peso é o Peso Operacional com 23,34%, em segundo lugar ficou o Preço com 23,27%, seguido por Profundidade de Escavação com 18,60% e por Potência do Motor com 17,57% e em último lugar ficou o Tanque de Combustível com 17,23%.

4.3. Aplicação do MOORA

Concluindo a aplicação do CRITIC e obtendo assim os valores em porcentagem dos pesos, agora segue a aplicação no MOORA com o preenchimento dos pesos de acordo com cada critério, o tipo de atributo se é monotônico de custo ou benefício e os dados de cada alternativa, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Matriz de Decisão com Pesos e Atributos Ajustados

PESOS	23,27%	23,34%	17,57%	17,23%	18,60%
TIPO	MIN	MIN	MAX	MAX	MAX
ALTERNATIVA/CRITÉRIOS	Preço (R\$)	Peso Operacional (Kg)	Potência do Motor (Hp)	Tanque de Combustível (L)	Profundidade de Escavação (m)
Jonh Deere - 350G LC	622944,3	36180	271	630	8,18
Luigong - CLG922E	457519,36	22000	150	450	6,62
New Holland - E405C EVO	673195,14	38574	284	580	6,4
Volvo - EC480DL	955181,26	48000	360	685	9,17

Fonte: Autor (2023)

A próxima etapa é realizar a normalização e ponderação da matriz de decisão, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 – Matriz de Decisão Normalizada e Ponderada

MATRIZ NORMALIZADA X_{ij} E PONDERADA					
ALTERNATIVA/CRITÉRIOS	Preço (R\$)	Peso Operacional (Kg)	Potência do Motor (Hp)	Tanque de Combustível (L)	Profundidade de Escavação (m)
Jonh Deere - 350G LC	0,1035	0,1130	0,0860	0,0916	0,0991
Luigong - CLG922E	0,0760	0,0687	0,0476	0,0654	0,0802
New Holland - E405C EVO	0,1118	0,1205	0,0902	0,0843	0,0775
Volvo - EC480DL	0,1586	0,1499	0,1143	0,0995	0,1111

Fonte: Autor (2023)

Concluindo a aplicação do MOORA, a Tabela 7 mostra o ranqueamento final das alternativas de acordo com os valores máximos gerados na Tabela 6.

Tabela 7 – Ordenação MOORA

S(x)	Ordem
0,0603	1
0,0485	2
0,0197	3
0,0164	4

Fonte: Autor (2023)

A alternativa proposta pelo MOORA é a Jonh Deere - 350G LC, com uma pontuação de 0,0603, seguida pela Luigong - CLG922E com 0,0485, em penúltimo lugar ficou a New Holland - E405C EVO com 0,0197 e em último lugar ficou a Volvo - EC480DL com 0,0164.

5. Considerações Finais

O estudo desenvolvido teve por objetivo, estar apresentando um caso em que a aplicação de um método de Apoio Multicritério à Decisão pode ter alto impacto para a área de mineração do Brasil, com a ordenação das máquinas de escavações.

Os métodos CRITIC e MOORA, mostraram seus resultados satisfatórios, a partir do momento em que habilita operar dados quantitativos de forma equivalente quanto as suas análises e resultados, a partir de planilhas elaboradas no Microsoft Excel, entregando uma obtenção de normalização, correlação e atribuições de pesos de forma bem estruturada e uma análise de resultados de ordenação de preferência.

Para o setor de mineração, espera-se que este trabalho sirva para apoiá-los em uma tomada de decisão relacionada ao reconhecimento de quais escavadeiras são as mais favoráveis em uma aplicação eficiente e eficaz em suas operações nas minerações.



REFERÊNCIAS

GERMANY, José Darcy. **A mineração no Brasil. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.** Rio de Janeiro, (2002). Disponível em: < <http://www.finep.gov.br/images/a-finep/fontes-deorcamento/fundos-setoriais/ct-mineral/a-mineracao-no-brasil.pdf> >. Acesso em: 03/06/2023.

GOMES, L. F. A. M., e GOMES, C. F. S. **Princípios e métodos para a tomada de decisão: Enfoque multicritério** (6a ed.). São Paulo: Atlas. (2019).

GRECO, S.; EHRGOTT, M.; FIGUEIRA, J. R. **Multiple Criteria Decision Analysis State of the Art Surveys.** Second edi ed. New York: Springer, 2016.

JAWORSKI, Tadeo. **Equipamentos para Escavação – Compactação e Transporte.** Curitiba, 2011. Disponível em: < http://www.dtt.ufpr.br/Equipamentos/Arquivos/Apostila%20de%20Equipamentos%20Digitalizada_Tadeo_Jaworski.pdf >. Acesso em: 04/06/2023.

LIMA, Brayan de Almeida. **Introdução ao método de Importância dos Critérios por meio da Correlação entre Critérios (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation - CRITIC).** São João de Meriti – RJ. 2021.

PEREIRA, Djalma; COSTA, Roberto. **Terraplenagem: Tomo I.** Curitiba: Educa, 1983.

RAMIRES, Geraldo José Sigwalt. **Estudo comparativo entre escavadeiras hidráulicas e motoscrapers.** 2017.

RICARDO, Hélio de Souza; CATALINI, Guilherme. **Manual Prático de Escavação.** 2ª ed. São Paulo: PINI, 1990.

VILLA, A. J. et al. **Una revisión de literatura de 1980 a 2018 de los métodos Multi-criterio.** MundoFesc, v. 9, n. 18, p. 89–102, 2019.