UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, ADMINISTRAÇÃO E ECONOMIA

CAMPUS MORRO DO CRUZEIRO

OURO PRETO – MINAS GERAIS - BRASIL

WERLLEY CRISTIANO DE OLIVEIRA

PROPOSTA DE MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

USO DE ANALISE ENVOLTÓRIA DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DE MODELOS COM E SEM RESTRIÇÃO AOS PESOS: UM ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Orientadora: Prof. Doutora Lásara Fabrícia Rodrigues

Ouro Preto, 2019

O48e Oliveira, Werlley Cristiano de.
Uso de análise envoltória de dados para avaliação de modelos come sem restrição aos pesos [manuscrito]: um estudo de caso para análise de alternativas de reaproveitamento de rejeito de minério de ferro na construção / Werlley Cristiano de Oliveira. - 2019.

56f.: il.: grafs; tabs.

Orientadora: Profª. Drª. Lásara Fabrícia Rodrigues.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Sustentabilidade. 2. Reaproveitamento de rejeito. 3. Construção civil. I. Rodrigues, Lásara Fabrícia. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 669.1

Catalogação: ficha.sisbin@ufop.edu.br

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento Engenharia de Produção, Administração e Economia

ATA DE DEFESA

Aos quinze de março de 2019, às 19:00hs, no Laboratório 1307 da Escola de Minas, da Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno **Werlley Cristiano de Oliveira,** sendo a banca examinadora constituída por: Profª. Dr. Lásara Fabrícia Rodrigues, Prof. Dr. Máximo Eleutério Martins e Prof. Msc. Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva e Eng. Ramon Sávio Moreira Lopes. O aluno apresentou a monografia intitulada: "USO DE ANALISE ENVOLTÓRIA DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DE MODELOS COM E SEM RESTRIÇÃO AOS PESOS: UM ESTUDO DE CASO PARA ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL". A banca examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do candidato, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporação no texto final das alterações sugeridas. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca examinadora e pelo aluno.

Ouro Preto, 15 de março de 2019.

Lásara Fabrícia Rodrigues
Orientador / Presidente

Máximo Eleutério Martins
Examinador

Cristiano Luis Turbino de Franca e Silva
Examinador

Ramon Sávio Moreira Lopes
Examinador

Werlley Cristiano de Oliveira
Aluno

RESUMO

A atividade mineradora é uma importante atividade comercial para o Brasil, essencial para a vida humana, responsável por transformações tecnológicas na sociedade. Porém no processo de extração e beneficiamento do minério surge o material não aproveitado denominado rejeito mineral. O rejeito mineral é constituído de percentagens de minerais que não conseguem ser reaproveitados no processo de beneficiamento, sendo, portanto depositados em barragens.

As barragens de rejeito são construídas para conter este rejeito, porém mesmo após o encerramento das atividades mineradoras, estas barragens ainda continuam presentes no meio ambiente, representando um risco iminente a fauna, flora e a população desta região.

Este estudo propõe uma análise sustentável de alternativas de utilizar rejeito evitando a disposição destes em barragens e a utilização dos rejeitos das barragens existentes. As alternativas em estudo estão diretamente ligadas a construção civil. Entretanto, vale-se destacar que existem alternativas relacionadas a outros setores. Nessa análise, utilizou-se a Análise Envoltória de Dados (DEA), baseada nos pilares de sustentabilidades. A variável Custo de investimento representou o pilar econômico e foi classificada como *input*, a variável Geração de Emprego representou o pilar social e a variável CO_2 representou o pilar ambiental, ambas classificadas como *output*.

O modelo clássico da DEA utilizado foi o BCC proposto por Banker, Charnes e Cooper (1984). Além disso, também utilizou-se o modelo BCC com restrição aos pesos. Como resultado da análise, a alternativa Bloco de Concreto foi classificada como melhor alternativa em questão ambiental em ambos modelos a alternativa Cerâmica apresentou melhores resultados nos aspectos sociais e econômicos do modelo BCC clássico e a alternativa Cimento Portland obteve melhores resultados sob a perspectiva social e econômica do modelo BCC com restrições.

Palavras-chave: DEA, aproveitamento de rejeito, sustentável, construção civil.

ABSTRACT

Mining activity is an important commercial activity for Brazil, essential for human life, responsible for technological changes in society. However, in the process of extraction and beneficiation of the ore appears unutilized materials called tailings ore. The tailings ore consists of percentages of minerals that can not be reused in the process of beneficiation, therefore deposited in dams.

The tailings dams was built to contain this tailings ore, but even after the mining activities close, these dams are still present in the environment, representing an imminent risk to the environment and population of this region.

This study proposes a sustainable analysis of the ways to use the tailing ore, avoiding its deposition in the dams and using those that are already stored in dams. The alternatives, under study, were built using the Data Envelopment Analysis methodology (DEA) and based on sustainability approaches. The alternatives have directly linked to the civil construction field. However, it is worth highlighting that there are other alternatives related to other fields.

The variable Investment Cost was used as an economic pillar and it was set as an input, the variable Employment Generation was pointed as the social pillar and the variable CO2 as the environmental pillar, both set as outputs.

The DEA classic model used was the BCC proposed by Banker, Charnes and Cooper (1984). According to the study analysis the BCC model, with weight restriction, was used in comparison with the classic BCC model.

In conclusion, the Concrete Block was ranked as the best alternative in environmental matters in both models. On the another hand, the alternative Ceramics presented the best results in the social and economic aspects of the classic BCC model and the alternative Portland Cement was rated the best alternative in social and economic perspective of the BCC model with restrictions.

Key-words: DEA, Ore tailings reuse, sustainable, civil construction

SUMÁRIO

1 - Introdução 8
2 - Mineração e Sustentabilidade 11
3 - Análise Envoltória de Dados 13
3.1 - Modelo CCR 15
3.2 - Modelo BCC 17
3.3 - Restrição aos pesos 19
4 - Material e Métodos 21
4.1 - Alternativas (Seleção das DMUs) 21
4.2 - Pilares da sustentabilidade (Seleção de variáveis) 23
4.3 - Coleta de dados 24
4.3.1 - Composição 25
4.3.2 - Método QE-CO_2 26
4.3.3 - Viabilidade econômica e social 28
4.3.4 - Organização dos dados 30
5 - Aplicação de DEA 32
5.1 - Modelo BCC 32
5.2 - Modelo BCC com restrição aos pesos 36
5.3 - Comparando Resultados 39
6 - Conclusão 42
Referências 43

1 - Introdução

No Brasil, destaca-se a atividade mineradora, desde os tempos da colonização com extração de ouro, ferro, diamante e outros minerais. Atualmente, a mineração é um dos setores produtivos mais promissores da economia nacional.

O Brasil é o quinto país de maior extensão territorial do mundo e o primeiro do hemisfério Sul, apresentando a sexta maior produção mineral mundial (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2002). Apesar dessa estatística, segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (2014), a maior parte do país ainda não foi explorada: apenas 30% de todo o território brasileiro foi sistematicamente explorado por meio de mapeamento geológico.

Além disso, as transformações socioeconômicas e de infraestrutura vivenciadas pelo Brasil nos últimos anos, associadas ao processo de urbanização em países emergentes e ao fortalecimento das economias mundiais, têm impulsionado o aumento da demanda por minerais e, consequentemente, o valor da Produção Mineral Brasileira (PMB).

Dada a importância da atividade mineradora do país, deve-se ter atenção ao seu processo, pois a mineração é também causadora de impactos severos ao meio ambiente, em especial a mineração de ferro que é a predominante no país.

Segundo o U.S Geological Survey (2012) e a UNCTAD (Conferência das Nações Unidas para o Comércio e o Desenvolvimento) (2012), o Brasil é o segundo maior produtor e exportador mundial de minério de ferro e dos 180 bilhões de toneladas de reservas mundiais, 29 bilhões estão situados no Brasil (*apud* IBRAM, 2012, p. 32).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (2012), dos 390 milhões de toneladas de minério de ferro produzidas no Brasil em 2011, cerca de 85% (330 milhões de toneladas) da produção foram exportados, tendo como principal destino a China.

A extração de minério é um processo que gera resíduos formado por grande quantidade de lama devido ao alto volume de água necessária para o beneficiamento do minério de ferro. Esses resíduos são constituídos de material

escuro, muito fino e com baixa coesão, denominado de rejeito e são normalmente acumulados em barragens.

De acordo com Soares (2010), os rejeitos são definidos como a fração do minério destituída de mineral útil ou sem valor econômico, obtida por processo de beneficiamento mineral. Como neste processo a britagem e a moagem são etapas praticamente obrigatórias para a liberação dos minerais de interesse, as partículas geradas são angulosas, com bordas cortantes e superfícies rugosas exibindo fraturas frescas.

Os rejeitos resultantes das diversas etapas do beneficiamento – lavagem, peneiramento, deslamagem, concentração gravítica e magnética, flotação, lixiviação, dentre outras – são constituídos em proporções variadas de gases, líquidos e sólidos.

A deposição de rejeito pode ser feita em forma de pilhas em área determinadas, que após depositada é feito o reaproveitamento da área designada, ou então essa deposição é feita em barragens.

Maciel Filho (2008) define barragem como sendo um elemento estrutural, construído transversalmente a vales ou depressões com o objetivo de elevar o nível da água dos cursos naturais, ou para formar reservatório destinado à acumulação de água. Este tipo de estrutura, seja ela concebida de materiais rochosos, terrosos ou de concreto, pode ser projetado com múltiplos propósitos, a fim de que satisfaça as necessidades de projeto.

Segundo Barbosa et al. (2013), uma grande barragem é um tipo de obra que influencia o meio ambiente, pois ela modifica o regime de rios, os níveis freáticos e as paisagens próximas, além de que as formações geológicas saturadas pelo represamento passam a ter comportamento diferente.

O presente estudo tem como objetivo utilizar a Análise Envoltória de Dados (DEA) para uma análise sustentável aplicada às alternativas de utilização do rejeito.

O estudo avalia as alternativas de reaproveitamento de rejeito em mineração de ferro, buscando um desenvolvimento sustentável dessa atividade mineradora. Para isso, uma análise social, ambiental, econômica e tecnológica será realizada com base nas alternativas encontradas para o reaproveitamento do rejeito.

A análise será realizada utilizando a metodologia de Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA), um método de estimação não paramétrico da fronteira Pareto-Koopman, no qual as alternativas serão classificadas como Unidades Tomadoras de Decisão (*Decision Making Units* – DMUs) e, assim, as alternativas eficientes delimitarão a fronteira ótima de estudo.

Desse modo, o objetivo desta técnica é proporcionar artifícios para que as DMUs consideradas ineficientes se movam em direção a tal fronteira através de alterações em seus respectivos níveis de *inputs* e/ou *outputs*, acompanhando as DMUs eficientes, que servirão como pontos de referência ("*benchmarks*").

Esse estudo justifica-se por analisar as possíveis alternativas de utilização do rejeito, de forma sustentável, baseando-se nos pilares de sustentabilidade contribuindo para amenizar o principal fator dos problemas ambientais ocasionados pela mineração, o "rejeito".

O presente estudo está organizado em capítulos. O Capítulo 2 apresenta a mineração e o seu papel sustentável. O Capítulo 3 apresenta a Análise Envoltória de Dados e os modelos adotados para análise e o Capítulo 4 descreve os materiais e métodos. O Capítulo 5 relata a aplicação da DEA e resultados da análise. No Capítulo 6, as conclusões são apresentadas e posteriormente as referências bibliográficas do estudo.

2 - Mineração e Sustentabilidade

A mineração é um dos setores básicos da economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem-estar e a melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações.

Nesse sentido, é fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade equânime, desde que seja operada com responsabilidade social, estando sempre presentes os preceitos do desenvolvimento sustentável.

Por outro lado, também é importante reconhecer e manter sob controle os impactos que esta atividade provoca no meio ambiente, assim proporcionando um meio ambiente adequado para as futuras gerações.

O principal impacto ambiental causado pela atividade mineradora é o que se refere à degradação visual da paisagem, não se pode, porém, aceitar que tais mudanças e prejuízos sejam impostos à sociedade, da mesma forma que não se pode impedir a atuação da mineração, uma vez que ela é exigida por essa mesma sociedade (Silva, 2007).

Segundo Barreto (2011), o setor mineral brasileiro foi construído sob uma visão estratégica de desenvolvimento nacional, tendo por base uma política e uma legislação fomentadoras.

As preocupações com a preservação do meio ambiente aparecem nos anos 80, embora algumas empresas tenham começado a incorporá-las já na década de 1970. Nesse sentido, tem-se uma evolução do equacionamento da dimensão ambiental no Brasil, que se refletiu no setor mineral o que se pode identificar em três grandes fases.

A primeira, até os anos 60, é caracterizada por uma visão fragmentada, quando a proteção ambiental incidia apenas em alguns recursos, particularmente aqueles relacionados mais estreitamente à saúde humana, como o controle da água potável, a preocupação com algumas espécies da flora e fauna e pelas condições no ambiente de trabalho. A segunda, dos anos 70 a 80, inicia-se com o enfrentamento de questões mais amplas, como a poluição ambiental e o crescimento das cidades, culminando com a visão holística do meio ambiente como um ecossistema global.

Já a terceira, a partir dos anos 90, que posiciona o paradigma do desenvolvimento sustentável como o grande desafio, ou seja, como equacionador do desenvolvimento econômico e social com preservação do ecossistema planetário.

Segundo Bacchi (2006), os impactos causados pela exploração de bens minerais estão associados a várias etapas do processo, desde a abertura de cavas, desmonte das rochas, detonação nas jazidas e beneficiamento do minério, afetando o solo, água, ar e a população.

Segundo o IBAMA (2006), a mineração em áreas urbanas e periurbanas é um dos fatores responsáveis pela degradação do subsolo. Atualmente, junto às grandes metrópoles brasileiras, é comum a existência de enormes áreas degradadas, resultante das atividades de extração de argila, areia, saibro e brita.

A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED, 1990) adota o conceito de desenvolvimento sustentável como sendo o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer as habilidades das futuras gerações de satisfazerem suas necessidades.

Diante disso, Barreto (2001) afirma que a atividade mineradora terá um desenvolvimento sustentável se sua operação desde o planejamento à lavra conseguir informações precisas sobre: os riscos e a proteção dos impactos ambientais; monitoramento e a recuperação das áreas degradadas, de forma progressiva e contínua; compartilhamento de benefícios econômicos com a sociedade nacional, em especial as comunidades locais; uso futuro da área minerada; a máxima integração do projeto mineiro com o desenvolvimento das comunidades vizinhas.

Aprofundando nessa perspectiva de sustentabilidade na mineração, tem-se o rejeito mineral, que normalmente é depositado em barragens, impactando grandes áreas territoriais, degradando a paisagem, a fauna e flora. Portanto, reaproveitar o rejeito, reduzindo o seu acumulo é vital para o empreendimento de mineração se tornar mais sustentável.

3 - Análise Envoltória de Dados

A Análise Envoltória de Dados – DEA (*Data Envelopment Analysis*) é uma ferramenta matemática utilizada para mensurar a eficiência das DMU *(Decision Making Units)* proposta por Charnes, Cooper e Rhodes (1978).

Segundo Cooper, Seiford e Tone (2007), DMU é uma entidade responsável pela conversão de entradas em saídas e cujos desempenhos devem ser avaliados de forma relativa. Na seleção da DMU, deve-se observar se:

- Dados numéricos estão disponíveis para cada entrada e saída, tendo valores positivo para todas as DMUs.
- DMUs e variáveis (entradas e saídas) devem refletir o interesse e objetivo do gerente na avaliação.
- Em princípio, pequenas quantidades de entradas e maiores quantidades de saídas fazem o estudo interessante.
- As unidades de medida das diferentes entradas e saídas não precisam ser expressas nas mesmas unidades. Essas medidas podem envolver o número de pessoas, áreas de espaço, dinheiro gasto, etc.

Conforme Cooper, Seiford e Tone (2007), a DEA utiliza técnicas de programação matemática, o que possibilita a manipulação de um grande número de variáveis e restrições. Isso faz com que esta ferramenta possa ser empregada em uma vasta gama de setores, tais como: saúde, energia, tecnologia da informação, cadeia de suprimentos, varejo, etc.

A partir da seleção de DMUs segue a difícil tarefa de escolher as variáveis do modelo. Essas variáveis *(inputs e outputs)* devem partir de uma ampla lista contendo todos os fatores quantitativos e qualitativos, controláveis ou não, que evidenciem as relações de produção de um conjunto de DMUs.

Segundo Paiva Jr (2000), as variáveis precisam estar em conformidade com os objetivos da análise e das DMUs e os dados precisam ser confiáveis e relevantes para resultar em uma abordagem eficaz.

Conforme Sherman e Zhu (2006), a razão entre *output* e *input* define o valor de "eficiência". Neste contexto, cada *input* pode ser definido como uma entrada ou um insumo relativo a um determinado processo. De maneira análoga, os *outputs* são todas as saídas ou produtos obtidos a partir dos *inputs*.

O critério de análise de eficiência de uma DMU pode ser observado pelo critério de otimização de Pareto-koopmans que argumenta que dada uma eficiência de uma determinada DMU em análise, essa eficiência não pode ser melhorada se esta resultar em uma diminuição do valor de eficiência de outra DMU.

Charnes, Cooper e Rhodes (1978) formalizaram definições para as eficiências em cenários possíveis. No primeiro caso onde se conheça a priori, a completa eficiência (100%) é atingida por uma DMU, se, e somente se, não for possível otimizar seus insumos ou produtos sem alterar negativamente outros insumos ou produtos.

O segundo caso acontece quando não se conhece a priori, a completa eficiência (100%) é atingida por uma DMU se, e somente se, a melhoria no desempenho de uma DMU não influencie em um pior desempenho de outra DMU.

Avalia-se essas eficiências entre as DMUs, realizando um processo de *benchmark*, ou seja, dado um conjunto de DMUs, a DEA é responsável por selecionar as mais eficientes entre si, agrupando-as em um Conjunto Eficiente de Referencia (*Efficiency Reference Set* – ERS). A ERS será utilizada para identificar falhas nas DMUs, possibilitando análises destas falhas a fim de otimiza-las.

Os modelos DEA clássicos são os modelos CCR e BCC. O modelo CCR (*Constant Returns to Scale*) foi proposto por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e o modelo BCC também conhecido como VRS (*Variable Return to Scale*) foi proposto por Banker, Charnes e Cooper (1984).

Os modelos DEA clássico utilizam duas orientações sugerindo alternativas para que uma DMU ineficiente se torne eficiente, através de alterações realizadas nos *inputs* ou *outputs*. Nesse caso, quando se reduz os recursos mantendo constantes o produto, têm-se a orientação a *inputs*, já o caso onde se mantem os recursos e alterando os produtos têm-se a orientação a *outputs*.

3.1 - Modelo CCR

O modelo (CCR), proposto por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), foi o primeiro modelo DEA apresentado na literatura. De acordo com Dreyer (2013), este modelo foi proposto com o objetivo de maximizar a relação entre *inputs* e *outputs*, ou seja, a eficiência das alternativas em análise, que passaram a ser denominadas DMUs.

O termo retorno de escala surge no contexto da função de produção e explica o comportamento da taxa de aumento da produção (*output*) em relação ao aumento associado nos insumos (*inputs*).

Segundo Gelles e Mitchel (1996), as leis de retorno à escala são um conjunto de três leis inter-relacionadas e sequenciais: Lei dos Rendimentos Crescentes em Escala, Lei dos Retornos Constantes em Escala e Lei dos Rendimentos Decrescentes em Escala.

Se a saída aumentar pela mesma mudança proporcional à medida que todos os *inputs* mudam, haverá retornos constantes de escala (CRS). Se a produção aumentar em menos que a mudança proporcional nos insumos, haverá retornos decrescentes de escala (DRS). Se a produção aumentar em mais do que a variação proporcional nos insumos, haverá retornos crescentes de escala (IRS).

Em se tratando do modelo CCR, duas das formulações mais comuns são a primal (multiplicador) e a dual (envelope). Essas formulações são apresentadas na Tabela 1 a seguir na orientação a *output*.

Tabela 1 Modelo CCR

Primal (multiplicador)	Dual (envelope)
$Min\ h_o = \sum_{i=1}^{r} v_i x_{io}$ (1)	$Max\ h_o$ (5)
Sujeito a	Sujeito a
$\sum_{j=1}^{s} u_j y_{jo} = 1$ (2)	$x_{io} - \sum_{k=1}^{n} x_{ik}\lambda_k \geq 0, \ \forall i$ (6)
$\sum_{j=1}^{s} u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^{r} v_i x_{ik} \leq 0, \forall k$ (3)	$-h_o y_{jo} + \sum_{k=1}^{n} y_{jk}\lambda_k \geq 0, \forall j$ (7)
$u_j, v_i \geq 0, \forall\, j, i$ (4)	$\lambda_k \geq 0, \forall k$ (8)

Fonte: Elaborado pelo Autor

O modelo CCR orientado a *output* maximiza as saídas mantendo inalteradas as entradas e através do modelo dos multiplicadores determina o conjunto ótimo de pesos *(trade offs)* onde as premissas importantes são:

- Número de restrições é igual ao número de DMUs + 1.
- Número de variáveis é igual ao número de *inputs* mais o número de *outputs.*

A variável h_o é a eficiência; v_i e u_j representam os pesos, sendo os *inputs i*, $i = 1, ..., r$, e os *outputs j*, $j = 1, ..., s$; x_{io} e y_{jo} representam *inputs i* e *outputs j* da DMU_o. A Equação 1 representa a função objetivo, onde a eficiência é o valor que deve ser multiplicado por todos os *inputs* de forma a obter valores que coloquem a DMU na fronteira eficiente. A Equação 2 assegura que a soma dos *outputs* da DMU_o em análise é igual a 1. A Equação 3 garante que a diferença entre os *outputs* e *inputs* do modelo sejam menores ou iguais a 0. E, por último, a Equação 4 garante que os pesos v_i e u_j assumam valores não negativos.

O modelo do envelope determina a intensidade da contribuição de cada unidade de referência na formação do alvo e identifica as unidades de referência (*benchmark),* determinando as ineficientes e as eficientes. As premissas desse modelo são:

- Número de restrições é igual ao número de *inputs* mais o número de *outputs*.
- Número de variáveis é igual ao número de DMUs mais 1.

A variável h_o é a eficiência; as variáveis v_i e u_j representam os pesos, sendo os *inputs* i, i = 1, ..., r, e os *outputs* j, j = 1, ..., s; x_{io} e y_{jo} representam *inputs* i e *outputs* j da DMU_o, λ_k representa a contribuição da DMU k na formação do alvo da DMU_o.

A Equação 5 maximiza h_o e representa por quanto todos os produtos devem ser multiplicados, mantendo-se constantes os recursos, para a DMU_o atingir a fronteira eficiente. A Equação 6 garante que o *input* da DMU_o em análise é maior ou igual a combinação de *inputs* e contribuição de cada DMU. Já a Equação 7 assegura que o *output* da DMU_o em análise é maior ou igual a combinação de *outputs* e contribuição de cada DMU. E, por fim, a Equação 8 garante que a variável λ_k seja não negativa.

3.2 - Modelo BCC

Conforme Coelli et al. (2005), a utilização do modelo CCR é apropriada quando firmas ou organizações operam em condições consideradas ótimas. No entanto, problemas como competições imperfeitas, regulamentações governamentais, restrições financeiras, tamanho das organizações, etc., podem acarretar à não operação em escala ótima.

O modelo proposto por Banker, Charners e Cooper (1984) avalia DMUs que operam em escalas diferentes, adaptando a modelagem CCR para retornos variáveis de escala. Esse tipo de formulação passou a ser conhecida na literatura como VRS (*Variable returns to scale*) ou BCC, em homenagem aos três autores citados acima.

Assim como o modelo CCR, o modelo BCC apresenta formulações primal (envelope) e dual (multiplicador). Entretanto, no modelo BCC, o axioma de proporcionalidade é substituído pelo axioma de convexidade, com soma dos λ igual a 1.

A convexidade do modelo BCC permite que DMUs que operem com baixos valores de *input* tenham retornos crescentes de escala e as que operam com altos valores de *input* tenham retornos decrescentes de escala. Desse modo, eficiência dos modelos BCC são maiores ou iguais às dos modelos CCR. As formulações são apresentadas na Tabela 2 a seguir para a orientação a *output*.

Tabela 2 Modelo BCC

Primal (envelope)		Dual (multiplicador)	
$Max\ h_o$	(9)	$Min\ Eff_o = \sum_i v_i x_{io} + V*$	(14)
Sujeito a		Sujeito a	
$x_{io} - \sum_k x_{ik}\lambda_k \geq 0, \forall i$	(10)	$\sum_j u_j y_{jo} = 1$	(15)
$-h_o y_{jo} + \sum_k y_{jk}\lambda_k \geq 0, \forall j$	(11)	$-\sum_i v_i x_{ik} + \sum_j u_j y_{jk} - V* \leq 0, \forall k$	(16)
$\sum_k \lambda_k = 1$	(12)	$u_j \geq 0, \geq 0, \forall j, i$	(17)
$\lambda_k \geq 0, \forall k$	(13)	$V* \in \Re$	(18)

Fonte: Elaborado pelo Autor

As variáveis e os parâmetros do modelo BCC são os mesmos já citados no modelo CCR, com a inclusão do fator de escala *V**.

O método envelope é o primal na modelagem BCC. Nesse modelo, em comparação com o modelo CCR, é inserida a Equação 12 para garantir que a soma dos λ_k seja igual a 1, formalizando a convexidade.

O modelo dos multiplicadores possui um fator de escala *V** que determina os valores de retorno, caso positivo indica retorno crescentes de escala e caso negativos retornos decrescentes, se nulo, os retornos são constantes simbolizando o modelo CCR.

A Equação 16 do modelo multiplicador BCC se comparada ao modelo CCR insere o fator de escala V* garantindo que o somatório desse fator e os *outputs* sejam menores que os *inputs.* A Equação 18 garante que *V** receberá um valor real.

3.3 - Restrição aos pesos

Muitos problemas possuem múltiplos *inputs* e *outputs* e, nesse caso, o grande desafio está em desenvolver abordagens que permitam lidar com tais problemas sem sobrecarregar indevidamente o modelo com análises excessivas ou cálculos e sem exigir um grande número de (muitas vezes arbitrário ou questionáveis) suposições de modelagem.

Os modelos DEA clássicos não restringem os valores dos pesos de *inputs* e *outputs*. Entretanto, usar essa restrição é uma forma de solucionar tais problemas, pois as restrições apresentam significado gerencial (interesse do pesquisador) e também porque o seu uso pode melhorar significativamente a discriminação de eficiência do modelo DEA.

Conforme Cooper, Seiford e Tone (2007), os pesos devem ser escolhidos com bastante cuidado pois impactam diretamente no valor da eficiência, e devem seguir alguns critérios: (1) todos os dados e todos os pesos são positivos (ou pelo menos não negativos); (2) a razão resultante deve estar entre zero e um; e (3) os mesmos pesos para a DMU em análise serão aplicados a todas as outras DMUs. Consequentemente, a DMU que está sendo avaliada não poderá escolher um melhor conjunto de pesos para sua avaliação (em relação às outras DMUs).

Wong e Beasley (1990) propuseram uma metodologia que consiste em utilizar proporções, para restringir a flexibilidade dos pesos na Análise Envoltória de Dados (DEA). Este método é aplicável quando as DMUs que estão sendo avaliadas têm múltiplas entradas e saídas.

O decisor (ou especialista) podera estabelecer limites [a_j, b_j], onde $(0 < a_j < b_j < 1)$ naquilo que é considerado como adequado limites inferiores (a_j) e superiores (b_j) para a importância da medida de *output j* na DMU*o*, e assim obter o valor adequado:

$$a_j \leq \frac{u_j y_{jo}}{\sum_{j=1}^{s} u_j y_{jo}} \leq b_j \qquad (19)$$

A Equação 19 mostra os limites inferiores e superiores indicados pelo decisor/especialista. Essa restrição deve ser inserida no modelo DEA e possui pontos importantes:

- Impor a restrição somente na DMU em análise, assim cada DMU é analisada com 2 restrições adicionais, o inconveniente dessa abordagem é a DMU de referência pode não ser eficiente.
- Impor esta restrição a todas as DMUs. Assim, cada DMU é analisada com *2N* restrições adicionais, com *N* sendo o número total de DMUs. Dessa vez o inconveniente é a complexidade em programas lineares, tendo um desgaste computacional elevado.

A fim de solucionar o problema de desgaste computacional, utiliza-se a média dos insumos da DMU em análise em relação ao total de DMUs. Assim, tem-se uma proporcionalidade de cada DMU na análise, conforme a Equação 20.

$$a_j \leq \frac{\left[u_j\left(\sum_{o=1}^{n} y_{jo}/n\right)\right]}{\left[\sum_{j=1}^{s} u_j \left(\sum_{o=1}^{n} y_{jo}/n\right)\right]} \leq b_j \qquad (20)$$

Nota-se que a Equação 20 está apresentada com variáveis correspondentes aos *outputs*, para utilizar em relação a *input*, realiza-se a mesma modelagem apenas substituindo as variáveis pelas correspondentes aos *inputs*.

Como o presente estudo busca uma análise sustentável sob os pilares de sustentabilidade, deseja-se dessa forma que as alternativas sejam influenciadas por todos os aspectos sustentáveis (variáveis) abordados, portanto a restrição nos pesos possibilitara que a análise atinja seu objetivo.

4 - Material e Métodos

Neste estudo procurou-se comparar possíveis alternativas de aproveitamento de rejeito de mineração de ferro na área de construção civil.

A metodologia de aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) segundo Paiva Jr. (2000) consiste nos passos: seleção de DMUs, escolha das variáveis, seleção do modelo DEA, coleta de Dados, resolução do modelo DEA e interpretação dos resultados.

4.1 - Alternativas (Seleção das DMUs)

A seleção das DMUs utilizadas nesse estudo baseou-se em um estudo realizado para identificar alternativas para utilização de rejeito de minério de ferro realizado por Silva (2018). Esse estudo considerou aplicações que envolvem a retirada de rejeito de barragens e também a retirada direto do processo produtivo em mineração de ferro.

Como resultado, foram encontradas as alternativas: Argamassa; Concreto; Blocos de Concreto; Pavimentação; Infraestrutura para Pavimentação Urbana e Rodoviária; Cerâmica; Tijolo Ecológico; Cimento Portland; Preenchimento Estrutural; Filtros de Barragens; Preenchimento de Cavas de Minas; Utilização Agrícola e Madeira Plástica.

Pode ser observado também que a maioria dessas alternativas se concentra na área de construção civil, portanto selecionou-se as DMUs referentes a esta área.

Estudos encontrados na literatura sugerem a adequação da utilização desses rejeitos. Carrasco et al. (2017) sugerem que o uso de argamassa feita com o rejeito de barragem de minério de ferro minimizaria problemas ambientais, custos e recursos. Em relação ao concreto, Peixoto (2016) afirma que o uso de concreto feito de rejeito de barragem de ferro é ambientalmente positivo, pois atua na redução dos impactos ambientais da mineração, além de produzir concretos com melhor com melhores desempenhos mecânicos.

Segundo Costa *et al.* (2014), as características das resistências à compressão dos bloquetes produzidos com rejeito da mineração de ferro apresentaram valores muito próximos às obtidas na produção de referência da indústria. De acordo com Sant'Ana Filho (2013), este bloco é ideal para pavimentação de tráfego pesado, médio e leve, podendo ser utilizado em ruas, calçadas de condomínios e casas, pátios industriais de manobras, garagens, praças e jardins, aeroportos e outros pavimentos.

Para a produção de Infraestrutura de pavimentação urbana e rodoviária, Bastos *et al.* (2016) demonstrou que produzir camadas de pavimentos com rejeito mineral atendem parâmetros normativos para resistência mecânica, sendo uma solução viável para a pavimentação rodoviária.

Silva *et al.* (2014) realizou estudos utilizando rejeito para produzir cerâmica e os resultados foram compatíveis com as normas brasileiras, além de propiciar um aumento na resistência a flexão, reduzir a absorção de agua e aumentar a porosidade tornando a cerâmica mais leve.

Segundo Chen *et al*. (2011), tijolos ecológicos produzidos com rejeito mineral apresentaram resultados satisfatórios podendo ser aplicados em construções.

A seguir, na Tabela 3 são apresentados alguns estudos na literatura sobre a utilização de rejeitos na área de construção civil.

Tabela 3 Estudos da utilização de rejeito mineral na área civil

Alternativas (DMUs)	Estudos	Substituição (% rejeito)	Rejeito Barragem / Processo
Argamassa	Peixoto (2016)	100%	Barragem
	Fontes *et al*. (2016)	10 – 100%	Barragem
	Bastos (2013)	100%	Barragem
	Carrasco *et al*. (2017)	0 – 100%	Processo
Concreto	Peixoto (2016)	0 – 50%	Barragem
	Sabat *et al*. (2015)	5 – 30%	Processo
	Ismail *et al*. (2008)	10 – 20%	Processo
	Liu *et al*. (2012)	20 – 80%	Processo

Bloco de Concreto	Peixoto (2016) Carrasco *et al*. (2013)	0 – 25% 10%	Barragem Processo
Bloco Pavimentação	Peixoto (2016) Filho *et al*. (2017) Mattila *et al*. (2017)	0 – 80% 10 – 80% 0 – 100%	Barragem Barragem Barragem
Infra. Urbana e rodoviária	Peixoto (2016) Bastos *et al*. (2016) Campanha (2011) Saraiva (2006)	1 – 70% 0 – 10% 2 – 10% 10%	Barragem Barragem Barragem Barragem
Cerâmica	Silva *et al*. (2014) Souza *et al*. (2008) Vieira *et al*. (2016) Das *et al*. (2000)	0 – 5% 0 – 10% 5% 0 -40%	Processo Processo Processo Processo
Tijolo Ecológico	Chen *et al*. (2011) Nociti (2011) Yang *et al*. (2014)	0 – 84% 0 – 5% 5 – 20%	Processo Barragem Processo
Cimento Portland	Huang *et al*. (2013) Gama *et al*. (2015)	0 – 80% 70%	Barragem Barragem

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 - Pilares da sustentabilidade (Seleção de variáveis)

Conforme Paiva Jr. (2000), no que tange o processo de seleção de variáveis, deve-se inicialmente selecionar todos os possíveis fatores, quantitativos ou qualitativos, que possam vir a interferir no resultado de eficiência das DMUs abordadas.

Definido as alternativas (DMUs) que utilizam rejeito mineral em sua composição na área de construção civil, o próximo passo é a seleção de variáveis a serem utilizadas na análise. Nesse sentido, como o rejeito mineral é estudo foco deste trabalho, o objetivo é fazer uma análise de forma sustentável.

Em função disso, a seleção das variáveis será baseada nos pilares da sustentabilidade, considerando os aspectos ambientais, sociais e econômicos.

Reforçando a importância do desenvolvimento sustentável, estudos realizados por Costa *et al*. (2013), Lins *et al.* (2012) e Oliveira *et al.* (2008) utilizam a metodologia DEA em análises voltadas aos pilares da sustentabilidade.

Costa *et al*. (2013) comparou fontes alternativas de produção de biodiesel, classificando os *inputs* e *outputs* do modelo através do conceito de sustentabilidade, que envolve, os aspectos ambientais, sociais, tecnológicos e econômicos. Desta análise, destacou-se os *inputs*: custo de investimento (aspecto econômico), emissão de CO_2 (aspecto ambiental), custo mensal (aspecto tecnológico); e *outputs*: geração de empregos (aspecto social) e a produção (aspecto operacional).

Lins *et al*. (2012) comparou fontes renováveis de produção de energia elétrica considerando também o conceito de sustentabilidade. Os *inputs* utilizados foram a geração de empregos, a produção de energia e emissão de CO_2 e os *outputs* o custo de investimento e o custo mensal.

Já Oliveira *et al*. (2008) realizou uma análise qualitativa do uso de fontes alternativas de produção de energia elétrica, comparando diferentes metodologias sustentáveis para as fontes alternativas de energia. Essas metodologias também utilizaram os pilares de sustentabilidade descritos anteriormente.

Com bases nestes estudos, foram selecionadas as seguintes variáveis: Custo de investimento (sustentabilidade econômica), geração de empregos (sustentabilidade social) e emissão de CO_2 (sustentabilidade ambiental).

A variável custo de investimento foi classificada como *input* do modelo e os *outputs* foram as variáveis geração de empregos e emissão de CO_2.

4.3 - Coleta de dados

Nesta etapa da modelagem, buscou-se estudos na literatura que assegurasse a possibilidade de utilizar o rejeito em cada alternativa, e assim identificar informações importantes como a composição, custo de investimento, mão de obra e produção de cada alternativa.

Com base nos estudos encontrados, retirou-se a informação sobre a composição de cada alternativa e a quantidade de rejeito necessária para a utilização. A partir destas informações foi possível calcular a produção, e a partir da produção foi possível estimar os demais dados do estudo, combinando com as informações já obtidas. A seguir será explicado a obtenção dos dados em cada etapa.

4.3.1 - Composição

Nesta etapa do estudo, buscou-se selecionar estudos sobre a utilização de rejeito na área de construção civil, que atendessem as normas brasileiras e apresentassem dados técnicos confiáveis.

Um estudo realizado por Peixoto (2016) demostrou a viabilidade da utilização de rejeitos minerais na construção Civil. Foram realizados testes para viabilizar a utilização do rejeito, testes para avaliar a adequação às normas técnicas brasileiras e, por último, comparação entre as amostras de testes (utilizando rejeito) e as amostras originais (produto convencional) para identificar a eficiência das amostras propostas. Nesse estudo, a argamassa teve a areia totalmente substituída por rejeito mineral, o concreto e os blocos de concreto foram produzidos com 10% da areia substituída por rejeito mineral, os blocos de pavimentação utilizaram 50% da areia substituída, a estrutura de infraestrutura urbana e rodoviária teve 30% da composição de rejeito.

De acordo com Barbosa (2017), testes utilizando RBMF com 10% de substituição da areia, mostraram resultados satisfatórios para a produção de cerâmica.

Segundo Valadão, Vilela e Faria (2015), testes realizados ao utilizar 50g de cimento, 250g de solo, 150g de areia e água, substituindo 50% de areia por resíduos obteve resultados satisfatórios na produção de tijolos ecológicos.

Huang *et al.* (2013) realizaram analises com cimento Portland de 45Mpa, utilizando 593 kg/m³ de cimento, 711,9 kg/m³ de escória de alto forno e 469,9 kg/m³ de areia. Os resultados dos testes mostraram que a substituição do cimento em 40% por RBMF obteve resultados satisfatórios.

De acordo com os estudos abordados, organizou-se a Tabela 4, com dados organizados das proporções das diferentes alternativas em estudo. Para cada alternativa, tem-se a composição original e, em seguida, a composição utilizando o rejeito.

Tabela 4 Composição original e com utilização de rejeito

DMUs	Cimento	Brita	Areia	Argila/solo	Rejeito
Argamassa	25%	-	75%	-	-
	25%	-	-	-	75%
Concreto	20%	50%	30%	-	-
	20%	50%	27%	-	3%
Bloco Concreto	5,7%	28,5%	65,8%	-	-
	5,7%	28,5%	59,22%	-	6,58%
Bloco Pavimentação	22,5%	23,1%	54,4%	-	-
	22,5%	23,1%	27,2%	-	27,2%
Infra. Urbana e Rodoviária	20%	50%	30%	-	-
	20%	50%	21%	-	9%
Cerâmica	-	-	50%	50%	-
	-	-	45%	50%	10%
Tijolo ecológico	11%	-	33%	56%	-
	11%		16,5%	56%	16,5%
Cimento Portland	45,4%	-	54,6%	-	-
	27,3%	-	32,7%	-	40,0%

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3.2 - Método QE-CO_2

Todas as alternativas utilizam rejeito mineral para substituir os agregados finos/miúdos (areia) em seus processos. Com base nessa informação, utilizou-se a método QE-CO_2, de Costa (2012), para calcular a redução da emissão de CO_2 devido a areia estar sendo substituída por rejeito.

O método QE-CO_2 consiste em uma fórmula adaptada a cada tipo de material. Esse método “[...] consiste na multiplicação da quantidade de produto utilizado

na obra pelo fator de perda e pelo somatório das emissões geradas pelo consumo de energia e pelo transporte" (Costa, 2012).

O Método QE-CO_2 é adaptado para cada tipo de material de construção analisado. Esse método é subdividido em três níveis de precisão e baseia-se em dados médios e dados específicos. Os três níveis são: Nível Básico, Nível Intermediário e Nível Avançado.

O Nível Básico resume apenas informações de produção, sem dados específicos de insumos e dados de transporte. O Nível Intermediário possui informações relativas ao transporte como distância percorrida e emissões de CO_2 derivadas desse transporte. O Nível Avançado utiliza dados profundos do processo, como a composição química de matéria no processo, energia gasta no processo, concentrações de insumos e outros detalhes.

Para este estudo, utiliza-se o Nível Básico, pois deseja-se obter apenas a quantidade de emissão de CO_2 para utilizar no modelo DEA em estudo.

A equação utilizada será:

$$Emissões MT_i = QT_i * FP_i * FEP_i \quad (21)$$

Onde:

QT_i = quantidade de produto *i* necessária na obra, em toneladas;

FP_i = fator de perda do produto *i*, adimensional;

FEP_i = fator de emissão de CO_2 devido a utilização do produto *i* em edificações, em toneladas de CO_2 / tonelada de produto acabado.

Segundo Tavares (2006), a areia possui um fator de perda (FP) média de 50%, os valores de consumo energético para extração e processamento de agregados miúdos/graúdos (areia) e as emissões associadas a cada tipo são apresentados na Tabela 5.

A FEP utilizada nesse estudo será, então, de 0,0722. Entretanto, é importante ressaltar que a emissão CO_2 referente ao transporte não será estudada neste estudo.

Tabela 5 Energia para extração e processamento por tonelada de material (FEP)

Identificação	Uni./ t agregado	Valor	t CO_2/ t agregado
Óleo Diesel	m³	0,023	0,0717
Eletricidade	MWh	0,009	0,0005
Total	-	-	0,0722

Fonte: Costa (2012)

4.3.3 - Viabilidade econômica e social

Para os aspectos sociais e econômicos, o presente estudo baseou-se em análises de investimentos de estudos anteriores para cada uma das alternativas estudadas.

- Argamassa

  Segundo o SEBRAE (2011), uma empresa de pequeno porte para produção de argamassa, com uma produção de 1.000,8934 m³/mês, teria um custo de investimento de aproximadamente R$400.000,00 e um custo mensal de R$ 36.000,00 e utilizaria 6 colaboradores.

- Concreto

  Segundo Santos Menezes *et al.* (2013), uma empresa com maquinário de uma produção de 30 m³/h, atinge uma produção de 15.840 m³/mês com investimento de R$ 2.000.000,00 utilizando 20 colaboradores

- Blocos de concreto

  Segundo Loebens, Cervi e Rodrigues (2016), com uma produção de 12.960 m³ produz em média de 13.000 blocos/mês de concreto de medidas 14x19x39 o custo de investimento é de R$116.000,00 e o custo mensal é de R$ 25.000,00 e utilizaria 7 colaboradores.

- Blocos de pavimentação

  Segundo a SEBRAE (2005), o custo de investimento seria de R$ 167.000,00 e mensal de R$ 22.000,00 com 7 funcionários. Deve-se

observar que estes valores incluem equipamento e mão de obra de uma produção de 12.795m³, em relação ao custo associado ao volume produzido, os preços dos blocos variam de R$ 1,55 a R$ 9,70 e a instalação por m^2 entre R$ 0,77 e R$ 5,93.

- Produção de infraestrutura para pavimentação urbana e rodoviária
  Segundo Riva (2015), uma empresa de serviços de terraplanagens com faturamento médio anual de R$ 290.000,00, utiliza 7 colaboradores e teria um investimento inicial de R$ 545.000,00 produzindo um volume de 12.932 m³ de estrutura

- Cerâmica

  Segundo Arenhardt *et al.* (2017), a empresa de cerâmica com investimento de R$ 5.000.000,00 tem a capacidade de produzir 2 milhões de peças/mês, totalizando um volume de quase 594.767 m³ e utilizando 30 colaboradores.

- Tijolos ecológicos:
  Segundo SEBRAE (2014) para uma empresa com produção de 75.000 m³/mês de tijolos, necessitaria de um investimento inicial de R$ 28.000,00 e custo mensal de R$ 25.000,00, com de 6 funcionários.

- Cimento Portland:

  Silva e Lima (2012) realizaram um estudo de investimento para fabricas de cimentos e apontaram que para uma produção de 83.000 m³/mês, o custo médio de investimento será de R$ 240.000,00 e o custo de produção de R$ 1.300,00 utilizando na faixa de 10 funcionários.

4.3.4 - Organização dos dados

No presente estudo que avalia formas de utilizar o rejeito, entende-se que os resultados obtidos da análise são os *outputs* (Geração de emprego; emissão de CO_2) e os dados de entrada necessários para atingir esse resultado são os *inputs* (custo).

A quantidade produzida foi utilizada como parâmetro utilizado no cálculo das outras variáveis. A produção foi calculada em função da quantidade de rejeito utilizada no estudo, 400.000 toneladas de rejeito, uma quantidade atingida pela maioria das mineradoras do país.

Com a quantidade de alimentação estabelecida, utilizou-se os traços referenciados na Seção 4.3.1 para calcular a quantidade final de produção de cada alternativa.

A produção de rejeito de 400.000 toneladas, consiste em um volume aproximado de 103.092 m³, esse volume representa o total de rejeito utilizado na produção da alternativa, portanto com composição da produção e conhecendo a quantidade de rejeito, é possível calcular a produção final.

Seguindo a lógica do cálculo tem-se como exemplo a alternativa Argamassa. Sua composição é 3:1 para fazer 1m³ de argamassa, portanto se 103.092 m³ é a quantidade de rejeito utilizado, e neste caso o rejeito substitui a areia completamente, sendo assim será possível produzir 34.364 m³ de Argamassa.

A partir da quantidade possível de ser produzida de cada alternativa, utiliza-se os dados da Seção 4.3.3 para calcular o custo do investimento em cada alternativa para cada volume de produção de cada alternativa. Vale destacar que foi assumida uma relação linear entre volume de produção e custo de investimento, o que não necessariamente acontece na prática.

A variável geração de emprego também utilizou os dados apresentados na Seção 4.3.3 e novamente utilizou-se de proporção simples direta para calcular a quantidade de mão de obra necessária para atingir o nível de produção.

A variável emissão de CO_2 foi calculada diretamente pela fórmula apresentada na Seção 4.3.2 e o seu valor representa a quantidade de CO_2 que deixará de ser

emitida ao meio ambiente, uma vez que parte da areia será substituída por rejeito. Os dados são organizados conforme a Tabela 6.

Tabela 6 Dados utilizados no estudo

DMU	Produção (m^3)	*Inputs*	*Outputs*	
		Custo (R$)	G. Emprego	CO_2 (toneladas)
Argamassa	34364	13.677.317,88	206	14400
Concreto	687285	86.778.437,29	868	2160
B. Concreto	88873	793.021,41	48	16704
B. pavimentação	85911	1.103.621,46	47	12960
Infra. Urb. Rod	229095	9.604.370,43	124	6480
Cerâmica	2061856	5.154.639,18	104	1440
Tijolo Ecológico	68729	513.172,97	11	21600
Cimento Portland	257732	741.674,70	31	8640

Fonte: Elaborado pelo Autor

5 - Aplicação de DEA

A DEA será aplicada utilizando a modelo BCC orientado aos *outputs*. Este modelo não incorpora nenhuma informação adicional sobe a importância do insumos e produtos. Em função disso, o modelo pode atribuir ponderações maiores para variáveis de menor importância ou ignorar variáveis relevantes atribuindo pesos nulos e como resultado apontar DMUs ineficientes como eficientes e vice-versa.

Como solução para este problema, é aplicado também o modelo BCC com restrição aos pesos, com o objetivo de adicionar essas informações sobre a importância relativa das variáveis, evitando atribuições nulas às variáveis do modelo.

Foi utilizada a linguagem computacional *glpk.h* no *software* Gusek para resolução dos modelos.

5.1 - Modelo BCC

Neste estudo, utilza-se os modelos envelope e multiplicador do BCC, os quais permitem que a DMU possa tomar como *benchmark* apenas aquelas que apresentam retornos semelhantes ao seu, assim a eficiência da DMU será a combinação convexa das unidades da ERS.

Os resultados para esses modelos são apresentados na Tabela 7. Observa-se que as DMUs Bloco de Pavimentação e Infraestrutura Urbana e Rodoviária podem ser consdieradas ineficientes e as demais alternativas eficientes. A eficiênia, neste caso, indica que as alternativas devem aumentar seus *outputs* (no caso da orientação a *output*) para atingir uma eficiência maior. Por exemplo, a alternativa Infraestrutura Urbana e Rodoviária que tem a função objetivo igual 1,2683 precisa aumentar em 26,82% os valores de seu *outputs* para se tonar eficiente.

Tabela 7 Resultados do Modelo BCC orientado ao output

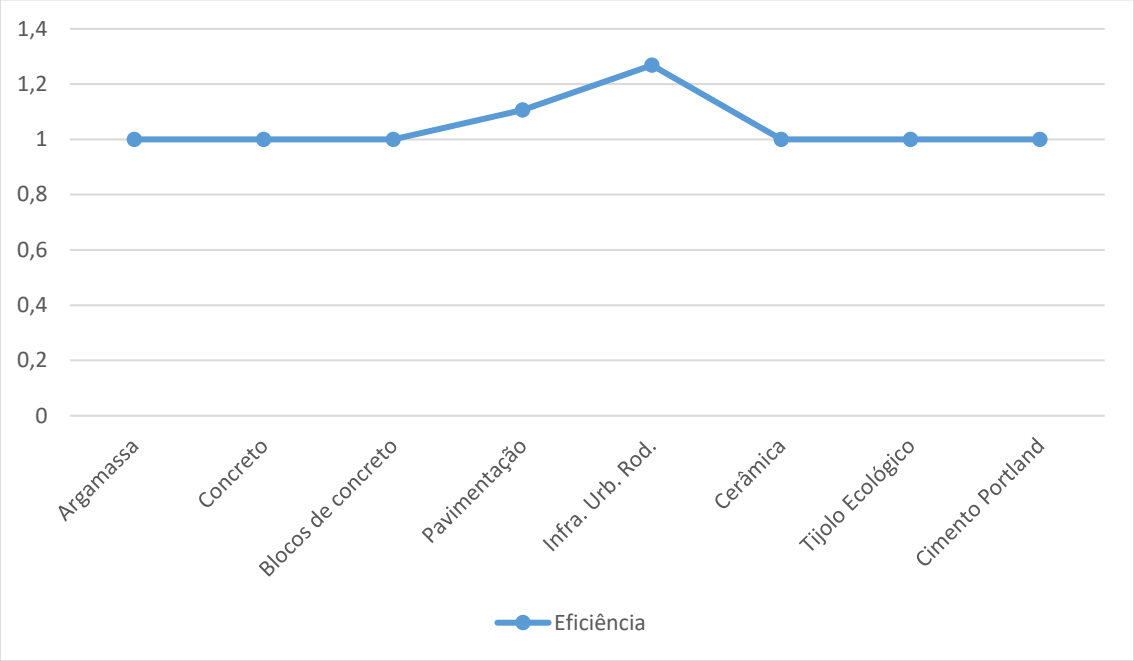
DMU	h_0 objetivo	V* F.escala	λ *benchmark*	Custo Peso	Emprego Peso	CO_2 Peso
Argamassa	1	0.506843		3.6×10^{-8}	3.3×10^{-3}	2.3×10^{-5}
Concreto	1	0.0946301		1.0×10^{-8}	1.2×10^{-3}	0
B.Concreto	1	0.946598		6.7×10^{-8}	6.1×10^{-3}	4.2×10^{-5}
B.Pavimentação	1.1061	0.804642	λ_3(0.928788) λ_6(0.0712121)	27.3×10^{-8}	21.3×10^{-3}	0
Infra. Urb. Rod.	1.2682	0.329261	λ_1 (0.522368) λ_3 (0.000513) λ_6(0.477119)	9.7×10^{-8}	8.0×10^{-3}	14×10^{-7}
Cerâmica	1	0.39519		11.7×10^{-8}	9.6×10^{-3}	17×10^{-7}
Tijolo Ecológico	1	1		0	0	4.7×10^{-5}
Cimento Portl.	1	0.94342		76.2×10^{-8}	32.2×10^{-3}	0

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em relação a variável *V** que representa o fator de escala, todas as alternativas apresentam retornos de escala decrescente, uma vez que *V** > 0. Isto indica que os recursos (*input*s) e produtos (*outputs*) não aumentam na mesma proporçao, por exemplo, se aumentarmos os *inputs* em 10 vezes os *outputs* aumentara em 3 vezes, caracterizando que o retorno do produto é menor que o investido em recurso.

Para os pesos de *inputs* e *outputs*, o modelo DEA possui flexibilidade para atribuir os seus valores. Estes valores representam a importância que cada variável teve na eficiênia da DMU, portanto é importantissimo que todas as variáveis sejam representativas, isto é, as variáveis não podem receber pesos nulos. Entretanto, conforme a Tabela 6 pode-se observar que diversas varíaveis receberam pesos nulos, o que não reflete a situação encontrada na prática. Não é possível que alternativas sejas utilizadas sem um custo de investimento, sem gerar empregos ou sem emitir CO_2. A figura 1 abaixo mostra as eficiências das DMUs.

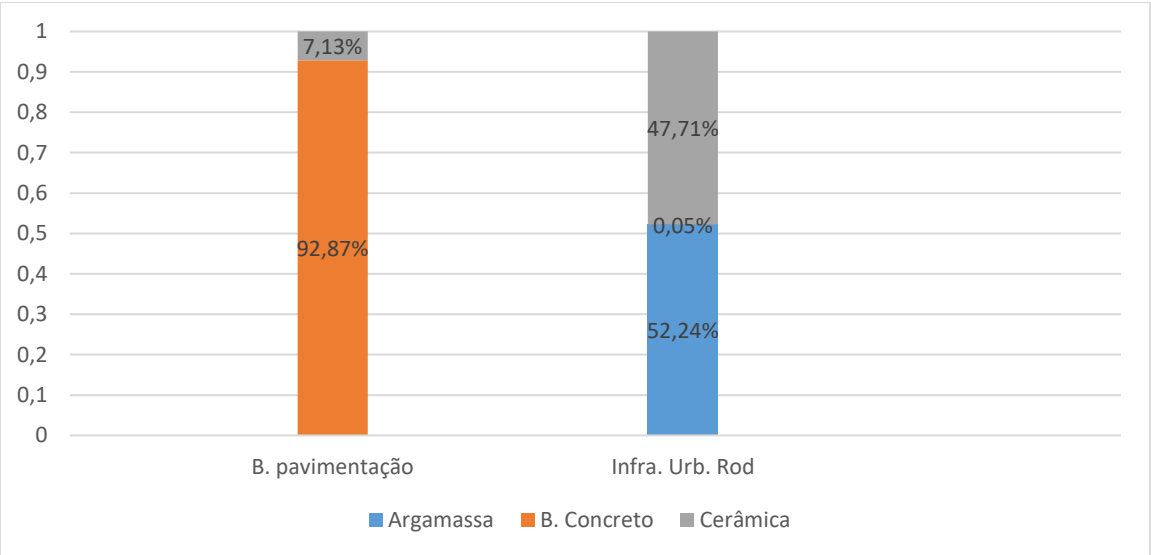
Figura 1 Gráfico da função objetivo



Fonte: Elaborado pelo Autor

Em se tratando das DMUs ineficientes, a Figura 2 apresenta a percentagem de contribuição de cada *benchmark* para cada DMU considerada ineficiente através do modelo BCC orientado aos *outputs*. Observa-se que a DMU Blocos de Pavimentação considerada ineficiente, tem como principal referência a DMU Bloco de Concreto e a DMU Infraestrutura Urbana e Rodoviária tem como referência as DMUs Argamassa e Cerâmica.

Figura 2 Gráfico de benchmark das DMUs



Fonte: Elaborado pelo Autor

Analisando os resultados na Tabela 7, a alternativa Infraestrutura Urbana e Rodoviária possui a menor eficiência, seguida da alternativa Bloco de Pavimentação. As demais alternativas possuem a mesma eficiência, portanto criou-se um critério de desempate, que baseia em considerar os pesos atribuídos a cada variável em estudo (*inputs* e *outputs*).

As alternativas que apresentarem pesos maiores do que zero em todas as variáveis, obterão as primeiras colocações e entre essas alternativas serão utilizados os maiores valores para as variáveis emissão de CO_2, Geração de Emprego e custo de investimento, nesta ordem como critério de desempate. Essa ordenação foi escolhida uma vez que o estudo optou por priorizar o pilar da sustentabilidade, considerando o aspecto ambiental mais importante.

As alternativas que apresentarem valor zero em uma das variáveis obterão as segundas colocações, e o critério de desempate continua o mesmo. Já as variáveis com apenas uma das variáveis com valor maior do zero ocuparão as últimas colocações, assim têm-se a classificação das DMUs:

1-Bloco de Concreto
2-Argamassa
3-Cerâmica
4-Cimento Portland
5-Concreto
6-Tijolo Ecológico
7- Blocos de Pavimentação
8- Infraestrutura Urbana e Rodoviária

De acordo com a classificação, Bloco de Concreto é a melhor opção, um resultado interessante para o estudo pois atualmente é uma alternativa muito abordada em pesquisas, e algumas empresas mineradoras utilizam este tipo de blocos em suas estruturas.

Apesar de apresentar uma classificação das alternativas, como a metodologia DEA atribui pesos livremente apenas com a restrição de ser não negativos, algumas alternativas tiveram pesos nulos em algumas variáveis. Portanto, a fim de solucionar este problema serão utilizadas técnicas restrição aos pesos de *inputs* e *outputs*.

5.2 - Modelo BCC com restrição aos pesos

Nesse estudo, foi utiliza a metodologia proposta por Wong e Beasley (1990), na qual as restrição aos pesos são inseridas baseadas na proporção que cada *input* e *output* relaciona-se com a alternativa. Entretanto, como mencionado anterior, essa metodologia é empregada em casos de múltiplos *inputs* e *outputs*. Assim, será utizada essa metodologia apenas para os *outputs* desse estudo.

Para definir o valor das restrição aos pesos, analisa-se cada variável selecionando seus valores mínimos e máximos. Evidentemente, os valores 0 e 1 não podem ser selecionados, pois o objetivo é dar importancia em todas as alternaivas. Os valores de proporção são mostrados na Tabela 8.

Para obter essas proporções utiliza-se um cálculo simples de proporção que consiste em dividir o *output* da variável da DMU analisada pelo somatório de todos os *outputs* desta mesma DMU, formula 19 apresentada na Seção 4.3. Esse procedimento é repetido para cada variável da DMU.

Tabela 8 Relação de proporção dos pesos

DMU	*Output*	
	G. Emprego	CO_2
Argamassa	0.674	0.326
Concreto	1	0
B.Concreto	0.293	0.707
B. Paviment.	1	0
Infre. Urb. Rod	0.991	0.009
Cerâmica	0.997	0.003
Tijolo Ecologico	0	1
Cimento Port.	1	0

Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao analisar a Tabela 8 percebe-se que para a variável Geração de emprego os valores estão compreendidos entre 0,293 e 0,997, portanto estes serão os limites inferios e superiores para utilização do método de Wong e Beasley (1990). A variável CO_2 terá´seus limites compreendidos entre 0,003 e 0,707.

Assim, serão utiizados os limites para os *outputs* mostrados na Tabela 9 .

Tabela 9 Limites utilizando o método Wong e Beasley (1990)

Input/Output	Inferior	Superior
G. Emprego	0.293	0.997
CO_2	0.003	0.707

Fonte: Elaborado pelo Autor)

A restrição ao peso da variável custo de investimento não será atribuída pelo método proposto por Wong e Beasley (1990), pois há somente um *input* neste estudo, inviabilizando sua aplicação. Portanto, será aplicada outra metodologia para essa variável, conhecida como região de segurança. O método de Regiões de Segurança (*Assurance Region* – AR), desenvolvido por Thompson *et al*. (1990), limita as variações dos pesos a uma determinada região.

$$v_i - v_{i+1} \geq \varepsilon \qquad (14)$$

Onde: v_i, v_{i+1} são os pesos dos *inputs*, ε um número infinitesimal e garante que os pesos não sejam nulos. Nesse estudo, será utilizado o valor de 0,000001.

A Tabela 10 mostra os resultados do modelo BCC com restrição aos pesos. Ao analisar a Tabela 10 identifica-se que os pesos de *inputs* e *outputs* alcançaram valores maiores que zero em todas alternativas, atingido o objetivo inicial da utilização da restrição aos pesos.

Tabela 10 Resultados BCC com restrição aos pesos

DMU	h_0 objetivo	V* F.escala	Custo Peso	Emprego Peso	CO_2 Peso
Argamassa	1	0.197596	5.8×10^{-8}	4.8×10^{-3}	8×10^{-7}
Concreto	1	0.117527	1.0×10^{-8}	1.1×10^{-3}	13×10^{-7}
B.Concreto	1	0.946598	6.7×10^{-8}	6.1×10^{-3}	4.2×10^{-5}
B.Pavimentação	1.1064	0.806737	27.1×10^{-8}	21.2×10^{-3}	2.3×10^{-7}
Infra. Urb. Rod.	1.2681	0.329261	9.7×10^{-8}	8.0×10^{-3}	14×10^{-7}
Cerâmica	1.0060	0.402022	11.7×10^{-8}	9.6×10^{-3}	21×10^{-7}
Tijolo Ecológico	1.5462	1.03458	99.7×10^{-8}	26.6×10^{-3}	3.3×10^{-5}
Cimento Portl.	1	0.943301	76.4×10^{-8}	32.2×10^{-3}	3.4×10^{-7}

Fonte: Elaborado pelo Autor

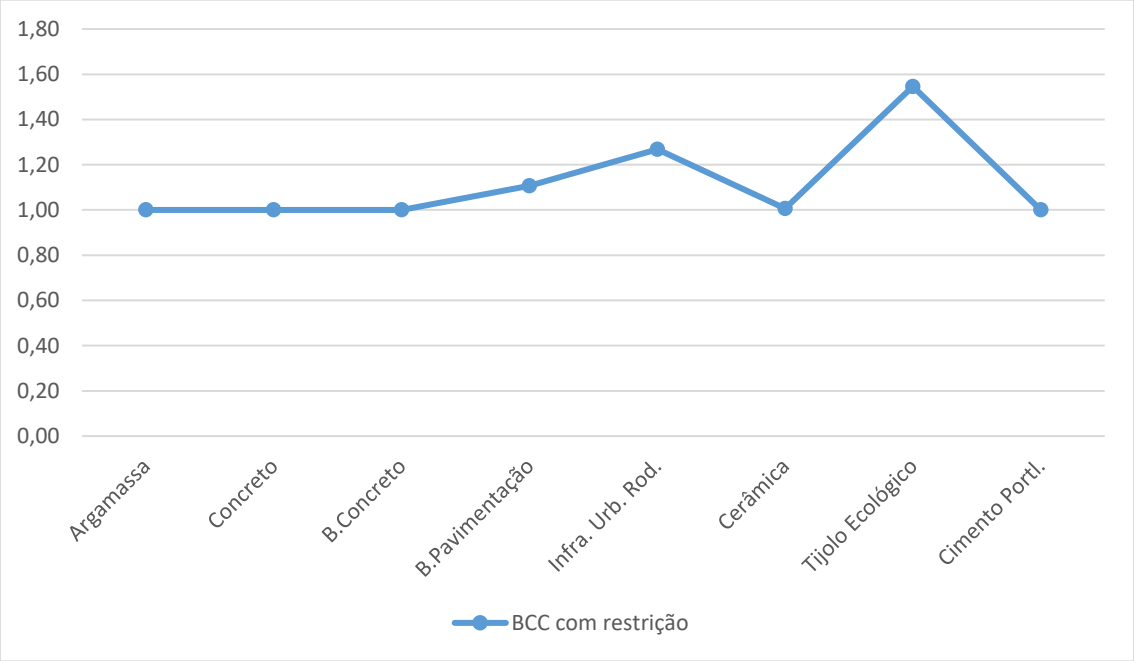
Percebe-se que a variável Geração de Emprego obteve os maiores valores em relação aos pesos, embora o estudo classifique o aspecto ambiental como mais

importante. O aspecto social não deve ser posto de lado, pois um desenvolvimento que garanta o mínimo impacto ambiental possível e que gere emprego para a população é o ideal buscado por todos.

Esse resultado era esperado, pois sabia-se que os limites utilizados para restrição aos pesos dessa variável eram maiores que o da emissão de CO_2.

Com o modelo de restrições, tem-se agora quatro alternativas ineficientes (Tijolo Ecológico, Infraestrutura Urbana e Rodoviária, Bloco de Pavimentação e Cerâmica) e quatro alternativas eficientes (Argamassa, Concreto, Bloco de Concreto e Cimento Portland). A Figura 3 apresenta as eficiências no modelo com restrição aos pesos.

Figura 3 Eficiências das DMUs do modelo BCC com restrição aos pesos



Fonte: Elaborado pelo Autor

De acordo com gráfico, percebe-se que uso de restrição teve bastante impacto na eficiência de algumas alternativas.

Vale destacar também que os retornos de escala continuaram decrescente ($V^* > 0$) ao utilizar o modelo com restrição aos pesos.

Utilizando o mesmo critério utilizado anteriormente, foi elaborada a seguinte classificação:

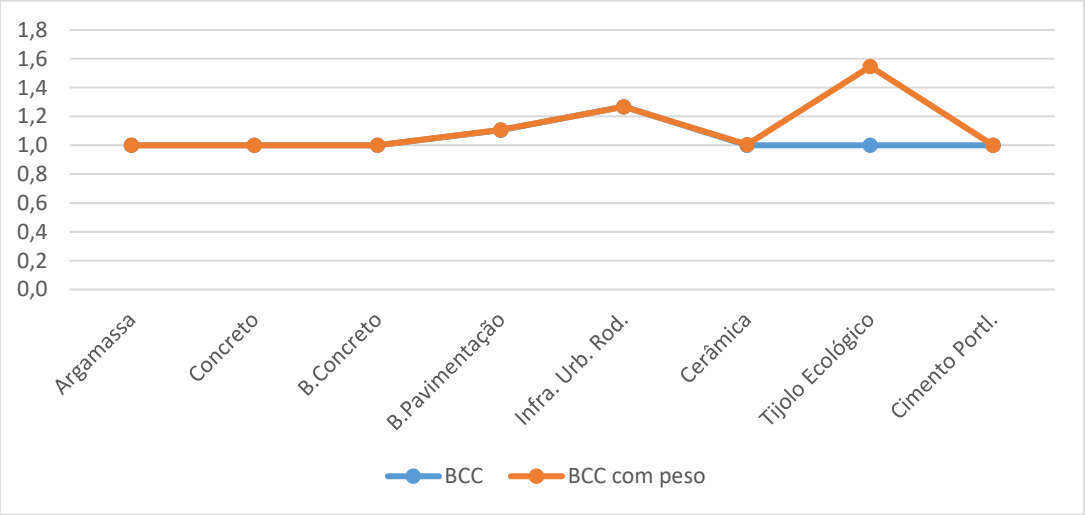
1-Bloco de Concreto
2-Concreto
3-Cimento Portland
4-Argamassa
5-Cerâmica
6-Bloco de Pavimentação
7-Infraestrutura Urbana e Rodoviária
8-Tijolo Ecológico

Percebe-se que a classificação das DMUs utilizando o modelo com restrição aos pesos apresentou grandes mudanças nas posições das alternativas, apesar da melhor posição ainda ser ocupada pela alternativa Bloco de Concreto, indicando a importância da utilização do método de restrição corretamente.

5.3 - Comparando Resultados

Para analisar os resultados obtidos, utiliza-se a Figura 4 que apresenta as eficiências de cada uma das alternativas. Pode-se observar diferença nos valores das funções objetivos, especialmente na alternativa Tijolo Ecológico.

Figura 4 Comparação das eficiências dos modelos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Este resultado evidência a importância da utilização do modelo com restrição aos pesos, pois apesar de garantir que as varáveis fossem incluídas na análise, evitando que recebessem pesos nulos, algumas alternativas se tornaram ineficientes. Essas alternativas eram eficientes ao utilizar o modelo BCC clássico

uma vez que esse modelo permitia que os pesos de determinadas variáveis fossem nulos, ou seja, que essas variáveis fossem desconsideradas na análise. Assim, ao garantir através da restrição aos pesos que essas variáveis fossem consideradas na análise a eficiência dessas alternativas diminuiu.

A Tabela 11 apresenta uma comparação dos resultados desse estudo.

Tabela 11 Comparação das Eficiência e valores das variáveis

DMUs	Eficiência		Inputs		Outputs			
			Custo		G. Emprego		CO_2	
	BCC	BCC/ Peso	BCC	BCC/ Peso	BCC	BCC/ Peso	BCC	BCC/ Peso
Argamassa	1	1	3.6×10^{-8}	5.8×10^{-8}	3.3×10^{-3}	4.8×10^{-3}	2.3×10^{-5}	8×10^{-7}
Concreto	1	1	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.2×10^{-3}	1.1×10^{-3}	0	13×10^{-7}
B. Concreto	1	1	6.7×10^{-8}	6.7×10^{-8}	6.1×10^{-3}	6.1×10^{-3}	4.2×10^{-5}	4.2×10^{-5}
Pavimentação	1.1061	1.1064	27.3×10^{-8}	27.1×10^{-8}	21.3×10^{-3}	21.2×10^{-3}	0	2.3×10^{-7}
Infra. Urb. Rod	1.2682	1.2681	9.7×10^{-8}	9.7×10^{-8}	8.0×10^{-3}	8.0×10^{-3}	14×10^{-7}	14×10^{-7}
Cerâmica	1	1.0060	11.7×10^{-8}	11.7×10^{-8}	9.6×10^{-3}	9.6×10^{-3}	17×10^{-7}	21×10^{-7}
T. Ecológico	1	1.5462	0	99.7×10^{-8}	0	26.6×10^{-3}	4.7×10^{-5}	3.3×10^{-5}
Cimento Portland	1	1	76.2×10^{-8}	76.4×10^{-8}	32.2×10^{-3}	32.2×10^{-3}	0	3.4×10^{-7}

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados indicam a adequação do modelo com restrição aos pesos proposto nesse trabalho, uma vez que os resultados desse modelo alcançaram os resultados esperados ao comparar os resultados com modelo clássico.

A restrição dos pesos busca uma forma de limitar a região de eficiência ou valores, para que os resultados atinjam os interesses do estudo. Portanto, os resultados indicam que a região limitante da restrição atendeu os pesos ótimos e foi efetiva pois atingiu o interesse de estudo das variáveis não receberem valores nulos.

A variável Geração de emprego foi a de maior peso nas duas aplicações, a variável Custo de Investimento praticamente não teve diferença e a variável CO_2 era a que possuía maior quantidade de valores nulos e passou a ter representatividade após a inclusão da restrição aos pesos.

A alternativa Cerâmica foi considerada eficiente no modelo BCC e ainda foi *benchmark* para as alternativas ineficientes Infraestrutura Urbana e Rodoviária e Bloco de Pavimentação, como pode ser observado na Figura 2. No modelo BCC com restrição aos pesos, o resultado sugere que restringir o peso da variável CO_2 teve impacto negativo na eficiência de alternativa Cerâmica.

A alternativa Tijolo Ecológico após restrição apresentou a maior ineficiência, lembrando que o valor de ineficiência nos modelos orientados aos *outputs* é a percentagem que se pode aumentar nos produtos mantendo os recursos constantes a fim de atingir o máximo de eficiência.

Analisando os resultados do modelo BCC com restrição aos pesos, a melhor opção foi a alternativa Bloco de Concreto coincidentemente foi a melhor opção no modelo BCC clássico, ao utilizar o critério de sustentabilidade ambiental como mais importante.

Pelo ponto de vista do critério de sustentabilidade social, a melhor opção seria a alternativa Cerâmica no modelo clássico, para o modelo com restrição aos pesos a alternativa Cimento Portland apresenta melhor resultado. Resultado interessante, pois ao observar os dados da tabela 6, imagina-se que a alternativa Concreto é a que teria melhor resultado na sustentabilidade social, mas isto não ocorre pois apesar da alternativa Concreto ter uma quantidade expressiva de Geração de Emprego, a análise avalia simultaneamente todos os pilares sustentável.

Em análise do critério de sustentabilidade econômica, a melhor alternativa seria novamente a alternativa Cerâmica para o modelo clássico e a alternativa Cimento Portland apresenta melhor resultado para o modelo com restrição aos pesos, assim pode-se observar que o modelo pode ser usado com objetivos diferentes e os resultados interpretados de formas diferentes.

6 - Conclusão

O estudo teve como objetivo realizar uma análise multicritério das alternativas de utilizar o rejeito de minério de ferro, pois sabe-se que a mineração é uma atividade importante para todo o país. Contudo, essa atividade deve ser realizada de forma sustentável garantindo um progresso econômico de forma que contribua socialmente para a sociedade e proteja o meio ambiente para as futuras gerações.

Com base nessas premissas e utilizando a metodologia DEA, foi possível classificar as alternativas. Os resultados mostraram que para o modelo BCC clássico as alternativas Bloco de Concreto, Argamassa, Cerâmica, Cimento Portland, Concreto e Tijolo Ecológico, apresentaram os melhores resultados e para modelo BCC com restrição aos pesos as alternativas Bloco de Concreto, Concreto, Cimento Portland e Argamassa apresentaram os melhores resultados.

Este resultado intensifica a importância de utilizar a técnica de restrição aos pesos, pois ao limitar os pesos das variáveis, com objetivo que estas sejam realmente consideradas na análise implica uma alteração na área de eficiência, podendo tornar DMUs eficientes em ineficientes.

Este estudo apenas reflete um passo inicial, com dados preliminares das alternativas. Tentou-se utilizar esses dados para aplicar a metodologia DEA, com bases nas variáveis de estudo.

Ressalta-se que o fato de não utilizar barragens como depósitos para rejeitos minerais, não está apenas limitada as variáveis de estudo. Sabe-se que a degradação do solo, destruição da fauna e flora, extinção de espécies, perigo a sociedade, são alguns de muitos outros problemas envolvendo a utilização de barragens.

Recentemente tragédias como rompimento da barragem da Samarco em Mariana, rompimento da barragem da Vale em Brumadinho, reflete a importância de novos estudos utilizando outras alternativas, outras variáveis, outros critérios para introduzir na sociedade uma outra forma de tratar o rejeito mineral.

Referências

ARENHARDT, R. L., CARNEIRO JUNIOR, J. B. A., NIVEIROS, S. I., SOUSA, L. P., *A viabilidade de implantação de um projeto: estudo de caso em uma indústria cerâmica no município de Juscimeira – MT.* 62º ICBS World Conference Argentina, p. 160-167, Junho, 2017.

ARGANE, R., BENZAAZOUA, M., HAKKOU, R., BOUAMRANE, A. *Reuse of base-metal tailings as aggregates for rendering mortars: Assessment of immobilization performances and environmental behavior*. Construction and Building Materials, v. 96, p. 296-306, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. *Informações técnicas – Definição e classificação*. Disponível em: http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/. Acesso em setembro de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12267:1992. *Normas para Elaboração de Plano Diretor*. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655:2006. *Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281:2001. *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.* Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ÁVILA, J.P. *Barragens de Rejeito no Brasil*. Comitê Brasileiro de Barragens, Rio de Janeiro, 2012.

AVKIRAM. N. K. *Handbook on data envelopment analysis. Chapter 15 Applications of Data Envelopment Analysis in the Service Sector - Springer Science & Business Media,* 2011.

BANKER, R.D.; CHARNES, A.; COOPER, W.W. *Some models for estimating technical scale inefficiencies in data envelopment analysis*. Management Science, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.

BARBOSA, F., ALMEIDA, G., LÍCIO, J., LUAN, K., FERREIRA, L., ALEXANDRE, L. *Geologia Aplicada a Barragens.* Universidade Federal de Tocantis, UFT-Brasil, 2013.

BARBOSA, P. C. *Aproveitamento de rejeito da concentração de minério de ferro na produção de cerâmica vermelha*. Tese Conclusão de Curso - Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

BARRETO, Maria Laura (Ed.). *Ensaios sobre a sustentabilidade da mineração no Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM; MCT, p. 135, 2001.

BARRETO, Maria Laura. *Mineração e desenvolvimento sustentável: Desafios para o Brasil.* CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2001.

BASTOS, L. A. C., MENDES, J. C., SILVA, G. C., PEIXOTO, R. A. F. *Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material.* Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, 2016.

BASTOS, L.A.C. *Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária*. 112 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

BERNADO PINTO. M. *Análise envoltória de dados na gestão de Bibliotecas universitárias: o caso de uma IFES em Minas gerais.* Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto. Agosto, 2012.

CABRAL J. *Argilas para cerâmica vermelha*. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1085/1/28.ARG.%20CER.VERM%20.pdf>.

CAMPANHA, A. *Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.* Viçosa, 2011. 106 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

CARMO, F. F., KAMINO, L. H. Y., JUNIOR. R. T., CAMPOS, I. C., CARMO, F. F., SILVINO, G., CASTRO, K. J. S. X., MAURO, M. L., RODRIGUES, N. U. C. A., MIRANDA, M. P. S., PINTO, C. E. F. *Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global contexto.* Perspectives in Ecology and Conservation, v. 15, p. 145-151, 2017.

CARRASCO, E. V. M., MAGALHAES, M. D. C., SANTOS, W. J. D., ALVES, R. C., MANTILLA, J. N. R. *Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests*. Construction and Building Materials, p 31-38, 2017.

CARRASCO, E. V. M., MANTILLA, J. N. R., MOREIRA, L.E. *Compression Performance of Walls of Interlocking Bricks made of Iron Ore By-Products and Cement*. International Journal of Civil & Environmental Engineering, v. 13, nº 03, p 56-62, 2013.

CELE, E. N., MABOETA, M. *A greenhouse trial to investigate the ameliorative properties of biosolids and plants on physicochemical conditions of iron ore tailings: Implications for an iron ore mine site remediation*. Journal of Environmental Management, v. 165, p. 167-174, 2016.

CHEN, Y. ZHANG, Y. CHEN, T., ZHAO, Y. *Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings*. Construction and Building Materials, v. 25, p 2107–2111, 2011.

COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; O'DONNELL, C. J.; BATTESE, G. E. *An introduction to efficiency and productivity analysis.* Nova York: Springer-Verlag, 2005.

COOPER, W, W.; SEIFORD, L, M.; ZHU, J. (Ed.). *Handbook on data envelopment analysis*. Springer Science & Business Media, 2011.

COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. *Data Envelopment Analysis*. Boston, MA: Springer US, 2007a.

Costa A. O.; Oliveira L. B.; Lins M.P.E.; Silva A.C.M.; Araujo M.S.M.; PereiraJr A.O.; Rosa L.P. *Sustainability analysis of biodiesel production: A review on different resources in Brazil*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 27, p. 407-412, 2013.

COSTA, B. L. C. *Quantificação das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil*. Dissertação de Mestrado apresentado ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE- Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós- Graduação e Pesquisa de Engenharia- UFRJ, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 190 p, 2012

CRPM. *Perspectivas do Meio Ambiente do Brasil – Uso do Subsolo*. MME - Ministério de Minas e Energia, 2002. Disponível em <http://www.cprm.gov.br>

CUI, X., NI, W., LIU, Q. *Effect of high efficient super plasticizer on performance of iron tailing high-quality concrete*. Metal Mine, v.1, p. 158-161, 2011.

DAS, S. K., KUMAR, S., RAMACHANDRARAO, P. *Exploration of iron ore tailing for development of ceramic tiles.* Waste Management, vol. 20, p. 725-729, 2000.

DAVID SHERMAN. H, CHILINGERIAN. J. A. *Handbook on data envelopment analysis. Chapter 16 Health-Care Applications: From Hospitals to Physicians, from Productive Efficiency to Quality Frontiers - Springer Science & Business Media,* 2011.

DAVIDOVITS, J. *Geopolymer chemistry and properties*. 1st. Eur. Conf. Soft Miner. Compiegne, Fr. 1, p. 25–48, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Sobre a CFEM*. 2014. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=60>.

DUAN, P., YAN. C., ZHOU, W., REN, W. *Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle.* Construction and Building Materials, v.118, p. 76-88, 2016.

DUTRA, R. *Beneficiamento de Minerais Industriais*. 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2008.

DUXSON, P., FERNANDEZ-JIMENEZ, A., PROVIS, J.L., LUKEY, G.C, PALOMO, A., VAN DEVENTER, J.S.J. *Geopolymer technology: the current state of the art.* Journal of Materials Science, v. 42, p. 2917-2933, 2007.

EDRAKI, M., BAUMGARTL, T., MANLAPIG, E., BRADSHAW, D., FRANKS, D.M., MORAN, C. J. *Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches*. Journal of Cleaner Production, p. 411-420, 2014.

ETIM, R. K., EBEREMU, A. O., OSINUBI, K. J. *Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture.* Transportation Geotechinics, v. 10, p. 85-95, 2017.

FERNANDES, G. *Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos.* 250p. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2005.

FERREIRA, R. F. *Dimensionamento de Pavimento Experimental para Tráfego de Caminhões Fora de Estrada em Planta de Mina*. 277p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.

FIGUEIREDO, M. M. *Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração casa de pedra – Congonhas/MG*. 127p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.

FILHO, Carlos Leite Maciel. *Introdução a Geologia de engenharia.* 3 ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2008.

FILHO, J. N. S. *Estudo de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para fabricação de blocos intertravados de uso em pátios industriais e alto tráfego.* Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais. Belo Horizonte, 2013.

FILHO, J. N. S., SILVA, S. N., SILVA, G. C., MENDES, J. C., PEIXOTO, R. F. A**.** *Technical and environmental feasibility og interlocking concrete pavers with iron ore tailings from tailings dams*. Journal of Materials in civil, v. 29, p. 04017104-1-04017104-6, 2017.

FONTES, W. C, JANUZZI, R. V, BORGES, R. A, CURY, A. A, PEIXOTO, R. A. F. *Resíduo da mineração de ferro como matéria-prima alternativa no desenvolvimento de argamassas de revestimento e assentamento*. In: Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC, 2014.

FONTES, W. C., MENDES, J. C., SILVA, S. N., PEIXOTO R. A. F. *Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams*. Construction and Building Materials. Construction and Building Materials, v. 112, p. 988–995, 2016.

FONTES, W.C. *Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

FRANCO, L. C., SANTOS, D. H., ROSA, P. P. G., SILVA, G. J. B. PEIXOTO, R. F. A. *Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto*. In: Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC, 2014.

FRANKS, D. M., BOGER, D. V., C'OTE, C. M., MULLIGAN, D. R. *Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes.* Resource Policy, p 114-122, 2011.

FREIRE, C. B. *Utilização de resíduos da exploração do itabirito em pavimentos intertravados.* Ouro Preto, 2012. 189 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Ouro Preto.

GAMA, E. M., CORDEIRO, R. A. C., SEERING, T. *Metakflex - cement of clays: new product and new revenue plus the elimination of tailings dams in mining.* Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico - UFMG Belo Horizonte. v. 24, n.1, 2015.

Gelles, Gregory M.; Mitchell, Douglas W. (1996). *Returns to scale and economies of scale: Further observations*. Journal of Economic Education. 27(3): 259–261. JSTOR 1183297.

GHANNAM, S., NAJM, H., VASCONEZ, R. *Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand.* Sustainable Materials and Technologies, p. 1-9, 2016.

GIRI, S. K., DAS, N. N., PRADHAN, G. C. *Magnetite powder and kaolinite derived from waste iron ore tailings for environmental applications.* Powder Technology, v. 214, p. 513-518, 2011.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. Al. PERES, A. E. C*. Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro*. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. vol. 64. n.2. 233-236 p. 2011.

GOMES, R. C., ALBUQUERQUE FILHO, L. H. *Geotechnical analysis of eroded sediments in an exhausted pit mine using CPTU tests*. Proc., 4th Int. Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, 2002.

GOMES, R. C., PEREIRA, E. L. *Avaliação do potencial de liquefação de rejeitos de mineração*. III Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, SBMR. São Paulo, 2002.

GOMES, R.C. Notas de Aula. *Disposição de Rejeitos de Mineração - Caracterização Tecnológica de Rejeitos*, 2006.

HAN, F., LI, L., SONG, S., LIU, J. *Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder*. Powder Technology, v. 315, p. 322-331, 2017.

HIZIROGLU, S., WECHSLER, A. *Some of the properties of wood–plastic composites*. Secondary title 42**,** p. 2637–2644, 2007.

HUANG, X., RANADE, R., LI, V. C. *Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore Tailings Powder as Cement Replacement*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013.

IBAMA. *O estado dos subsolos*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. *Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira.* 7ª Edição, p. 32 – 37, Dezembro, 2012.

IBRAM. *Relatório Anual de Atividades*. Instituto Mineiro de Mineração. Disponível em:<http://portaldamineracao.com.br/ibram/wpcontent/uploads/2017/08/WEB_REL_IBRAM_2017.pdf >. Acesso em fevereiro de 2018.

INSTITUTO BRASILEITO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração*. 1ed. 128 p. Brasília, 2016.

ISMAIL, Z. Z., AL-HASHMI, E. A. *Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement.* Waste Management, v. 28, p. 2041-2047, 2008.

KAZADI-MBAMBA, C. K., HARISSON, S. T. L., FRANZIDIS, J. P., BROADHURST, J. L. *Mitiganting acid rock drainage risks while recovering low-*

sulfur coal from ultrafine colliery wastes using froth flotation. Minerals Engineering, v.29, p. 13-21, 2012.

KURANCHIE, F.A., SHUKLA, S.K., HABIBI, D., MOHYEDDIN, A. *Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete.* International Journal of Civil & Environmental Engineering, Cogent Engeneering, 2015.

KURIANCHIE, F. A., KUMAR, S. S., DARYOUSH, H. MONIR, K. *Load–settlement behaviour of a strip footing resting on iron ore tailings as a structural fill*. International Journal of Mining Science and Tecnology, v. 26, p. 247-253, 2016.

KURIANCHIE, F.A., SHUKLA, S.K., HABIBI, D. *Utilization of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks.* International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2014.

LINS, M. E.; OLIVEIRA, L. B.; MOREIRA DA SILVA, A. G.; ROSA, L. P.; PEREIRA JR., A. O. P. *Performance assessment of Alternative Energy Resources in Brazilian power sector using Data Envelopment Analysis.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 1, p. 898–903, 2012.

LIU, M., XU, L. ZHANG, X., HAO, H., DI, Y. *Preparation of Eco-friendly Composite Ceramic from Iron Ore Tailings*. Material Science Forum, v. 610-613, p. 281-284, Trans Tech Publications, Switzerland, 2009.

LIU, W. XU, X., AN, Y. *Study on Sprayed Concrete with Iron Tailings*. Advanced Materials Research, v. 347-353, p. 1939-1943, Trans Tech Publications, Switzerland, 2012.

LOEBENS, D. R., CERVI, J. A., RODRIGUES, M. R. *Viabilidade econômica da implantação de uma fábrica de blocos de concreto.* Fundação Educacional Machado de Assis. Santa Rosa, 2016.

LOTTERMOSER, B. G. *Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes*. Elements, p. 405-410, 2011.

LOZANO, F. A. E. *Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica*. Dissertação (Mestrado). 128p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

LUO, L., ZHANG, Y., BAO, S., CHEN, T. *Utilization of Iron Ore Tailings as Raw Material for Portland Cement Clinker Production*. Advances in Materials Science and Engineering, article ID 1596047, 2016.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de Minérios*. 5ª edição. CETEM. Rio de Janeiro, 2010.

LUZ, V. S. P. *Uma Revisão sintética sobre minerais, o processamento mineral e mineralogia aplicada*. Monografia. 43p. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

MANTILLA, J. N. R., MIRANDA, D. N., FUINA, J. S., CARRASCO, E. V. M. *Mechanical Characteristics of Pavers with Iron Ore Tailings*. Key Engineering Materials, v. 864, p. 330- 335, Trans Tech Publications, Switzerland, 2017.

McLELLAN, B. C., CORDER, G. D., GIURCO, D., GREEN, S. *Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – review and analysis of current approaches.* Journal of Cleaner Production, p. 1414-1425, 2009.

METSO. *Mineração e Construção*. Disponível em: < http://www.metsoautomation.com/br/MetsoBrazil_home.nsf/WebWID/WTB-091019-22576-9D2EB?OpenDocument>. Acesso em fevereiro de 2018.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, T. e I. *Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil*, 2014

MINISTÉRIO DA FAZENDA. *Sistema e Administração tributária – Uma visão Geral*. Brasília, DF: Ministério da Fazenda, 2002. Disponível em: <http://www.receita.fazenda.gov.br/Publico/estudotributarios/estatisticas/20SistemaAdministracaoTributaria.pdf>.

MURMU. A. L., PATEL, A. *Towards sustainable bricks production: An overview.* Construction and Building Materials, v. 165, p. 112-125, 2018.

NAGARAJ, H. B., SHREYASVI, C*. Compressed stabilized earth blocks using iron mine spoil waste – An explorative study*. Procedia Engineering, v. 180, p. 1203-12012, 2017.

NOCITI, D. M*. Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelha*. 101 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2011.

OLIVEIRA, M.C.; MAGANHA, M. F. B. *Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas brancas e de revestimento*. São Paulo: CETESB, 2006.

PAPPU, A., SAXENA, M., ASOLEKAR, S.R. *Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials*. Environ, 2007, v. 42, p. 2311-2320. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.04.015. Acesso em março de 2018.

PEIXOTO, R. F. A. *Utilização de rejeitos de barragens de minério de ferro na construção civil*. Relatório técnico, 2016.

PESCARINI, T. *Pavimentação de vias urbanas*. Disponível em: < http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/6/pavimentacao-de-vias-urbanas-227267-1.aspx>. Acesso em fevereiro de 2018.

PORTAL BRASIL. *Entenda o acidente de Mariana e suas consequências para o meio ambiente*. Disponível em: http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/12/entenda-o-acidente-de-mariana-e-suas-consequencias-para-o-meio-ambiente.

REVISTA ECOLÓGICO. *Tijolos Ecológicos: bons e corretos*. Disponível em: <http://www.revistaecologico.com.br/materia.php?id=72&secao=1138&mat=1249>. Acesso em fevereiro de 2018.

RIVA, A. *Análise de viabilidade econômica emu ma empresa prestadora de serviços de terraplanagem*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Fronteira Sul. Chapecó, 2015.

RODRIGUES, Edmundo. Agregados. 2006. Disponível em: <http://www.ufrrj.br/institutos/it/dau/profs/edmundo/Agregados.pdf>.

SABAT, V., SHAIKH, M., KANAP, M., CHAUDHARI, M., SURYAWANSHI, S., KNADGOUDA, K. *Use of Iron ore Tailings as a Construction Material*. International Journal of Conceptions on Mechanical and Civil Engineering, v. 3, 2015.

SALES, G. M. A. *Proposta de um modelo utilizando Análise Envoltória de Dados - DEA na definição das metas dos indicadores da qualidade comercial das distribuidoras de energia elétrica - DER e FER*. UNB – Brasília, 2011. 106 f.

SAMARCO 2016a. *Atualização do Plano de Recuperação Ambiental Integrado.* Disponível em:http://www.samarco.com/wp-content/uploads/2016/10/prai-agosto.pdf. Acesso em fevereiro de 2018.

SAMARCO 2016b. *Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão*. Disponível em: < http://fundaoinvestigation.com/wpontent/uploads/general/PR/pt/FinalReport.pdf >. Acesso em fevereiro de 2018.

SANTOS MENEZES, A. A., LIMA, C. S., ROCHA, F.L., SILVA, L.S., CARVALHO, E.L., SIVA, M.C., ARAUJO, P.J. *Estudo de viabilidade para implantação de uma usina de concreto na região metropolitana de Aracaju.* Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas, Sergipe, v. 1, n.17, p. 117-126, out. 2013.

SANTOS, M. L. L. de O*. Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

SARAIVA, S. L. C. *Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários*. 123p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas. *Como montar uma fábrica de argamassa e rejunte.* Ideias de Negócios, 2011.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas. *Como montar uma indústria de pavimento ecológico.* Ideias de Negócios, 2005.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas Empresas. *Como montar uma fábrica de tijolos ecológicos.* Ideias de Negócios, 2014.

SEBRAE. *Cerâmica Vermelha.* Disponível em: http://www.sebraemercados.com.br/wp-content/uploads/2015/09/ESTUDO-CERAMICA-VERMELHA.pdf.

SHETTIMA, A. U., HUSSIN, M. W., AHMAD, Y., MIRZA, J. *Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete.* Construction and Building Maretials, p. 72-79, 2016.

SHETTY, K. K., NAYAK, G., VIJAYAN, V. *Effect of red mud and iron of tailings on the strenght of selfcompacting concrete*. European Scientific Journal, v.10, nº.21, 2014.

SILVA, A. C., LIMA, F. M. S. *Estudo de viabilidade econômica para implantação de uma fábrica de cimento.* Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Agosto. 2012.

SILVA, F. L. *Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavers e cerâmica*. 109 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2014.

SILVA, F. L., ARAÚJO, F. G. S., CASTRO, C. G., MENDES, J. J., KRÜGER, F. L. a *Recucling of Concentration Tailings of Iron Ore for the Production of Concrete Block (Pavers).* Key Engineering Materials, v. 755-756, p. 631- 634, Trans Tech Publications, Switzerland, 2014.

SILVA, F. L., ARAÚJO, F. G. S., TEIXEIRA, M. P., GOMES, R. C., KRÜGER, F. L. b *Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic*. International Ceramics, v. 40, p. 16085-16089, 2014.

SILVA, J. T. S. *Alternativas para disposição de rejeito da mineração de ferro.* Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro Preto. Fevereiro. 2018

SILVA, R. G. O. *Estudo Laboratorial do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduos Industriais de Minério de Ferro*. 132p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

SILVEIRA, M. D. *Utilização de resíduos da mineração na construção civil.* Monografia – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 39 p. Belo Horizonte, 2015.

SOARES, L. *Barragem de Rejeitos.* CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2010.

SOUZA, C. C. I., VIEIRA, C. M. F., MONTEIRO, S. N. *Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro*. Matéria, v. 13, n. 1, p. 1-9, 2008.

SOUZA, M. A. M. *Análise Envoltória de Dados aplicados ao setor elétrico de transmissão brasileiro.* Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

SOUZA, R. E. *Utilização de Resíduo de Mineração para Obtenção de Madeira Plástica.* Belo Horizonte, 2013. 63 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT.

STEINER, G., GEISSLEN, B., WATSON, I., MEW, M. C. *Efficiency developments in phosphate rock mining over the last three decades*. Resources, Conservation and Recycling, p. 235-245, 2015.

STRUTHERS, S. BRUMLE, J., TAYLOR, G. *An Integrated System for Recycling Base Metal Tailings.* Annual Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation Austin, p. 579-592, 1997.

SUPRAM 2008. *Parecer Único SUPRAM-ZM*. Indexado ao Processo N◦:00015/1984/066/2008. Disponível em: < http://200.198.22.171/reunioes/sistema/arquivos/material/Samarco Mineracao.pdf>. Acesso em fevereiro de 2018.

TAVARES, S. F. *Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras*. (Tese submetida à obtenção do Título de doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC). Santa Catarina, 225 p, 2006.

TEODORO, A. L., LEÃO, V. A. *Recuperação de aminas utilizadas na flotação de minério de ferro, utilizando – se zeólitas naturais*. Revista Escola de Minas, v. 57, nº 3, p 197-201. Ouro Preto, 2004.

THE REPORT OF THE WORLD COMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). *Sustainable Development. A Guide to our conmon future*. Geneve 1990.

THOMPSON, R.G.; LANGEMEIER, L.N.; LEE, C.; LEE, E. & THRALL, R. *The Role of Multiplier Bounds in Efficiency Analysis with Application to Kansas Farming*. Journal of Econometrics, 46, 93-108,1990.

TOFFOLO, R. V. M., FILHO, J. N. S, BATISTA, J. O. S, SILVA, S. N, CURY, A. B, PEIXOTO R. A. F. *Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro*. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto, Outubro/2014.

TOFFOLO, R. V., FILHO, J. N. S., BATISTA, J. O. S., SILVA, S. N., CURY, A. A., PEIXOTO, R. F. A. *Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro*. In: Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC, 2014.

TRIANTIS. K. P. *Handbook on data envelopment analysis. Chapter 14 Engineering Applications of Data Envelopment Analysis - Springer Science & Business Media,* 2011.

UCHECHUKWU, E. A., EZEKIEL, M. J. *Evaluation of the Iron Ore Tailings from Itakpe in Nigeria as Concrete Material*. Advances in Materials. V. 3, No. 4, p. 27-32, 2014.

UGAMA, S. P., EJEH, S. P., AMARTEY, D.Y. *Effect of Iron Ore Tailing on the Properties of Concrete*. Civil and Environmental Research, v. 6, nº.10, 2014.

VALADÂO, I. C. R. P., VILELA, F. O., FARIA, J. *Produção de tijolos ecológicos no UGB.* Revista Episteme Transversalis, v. 6, n. 1, 2015.

VAN KAUWENBERGH, S. *World Phosphate Rock Reserves and Resources*. IFDC, Alabama, 2010.

VERGARA, J.E. *Aplicabilidade dos rejeitos de mineração de ferro para utilização em filtros de barragens*. Brasília, 2012. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Brasília.

VIEIRA, C.M.F., SOUZA, C.C. MONTEIRO, S.N. *Efeito da incorporação de resíduo de minério de ferro nas propriedades e microestrutura da cerâmica argilosa*. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 112-023, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. 2006.

Wong, Y. H. B., and J. E. Beasley. "*Restricting Weight Flexibility in Data Envelopment Analysis*" Journal of Operational Research Society 41(9), 829–835. 1990.

WORLD COMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). *Sustainable Development. A Guide to our common future*. Geneve 1990.

XIAOXIN, F., XUELI, X., JIWEI, C., HONGJUN, C., YUZENG, S*. Investigation of Drying Shrinkage of Concrete Prepared with Iron Mine Tailings.* Key Engineering Materials, v. 477, p. 37- 41, Trans Tech Publications, Switzerland 2011.

XIONG, C., LI, W., JIANG, L., WANG, W., GUO, Q. *Use of grounded iron ore tailings (GIOTs) and BaCO3 to improve sulfate resistance of pastes*. Construction and Building Materials, v. 150, p. 66-76, 2017.

YANG, C., CUI, C., QIN, J. *Recycling of low-silicon iron tailings in the production of lightweight aggregates*. Ceramics International, v. 41, p. 1213-1221, 2015.

YANG, C., CUI, C., QIN, J., CUI, X. *Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings*. Construction and Building Materials, v. 70, p. 36-42, 2014.

YAO, R., LIAO, S., DAI, C., LIU, Y., CHEN, X., ZHENG, F. *Preparation and characterization of novel glass–ceramic tile with microwave absorption properties from iron ore tailings*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 378, p. 367-375, 2015.

YELLISHETTY, M., RANJITH, P.G., THARUMARAJAH, A. *Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable resources?* Conservation and Recycling, v. 54, p. 1084-1294, 2010.

YELLISHETTY. M.; KARPE, V.; SUBHASH, K.N. *Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study*. Elsevier: Resources, Conservation and Recycling. Índia, 2008.

YUFEN, H. *Comparison of Effect of Iron Tailing Sand and Natural Sand on Concrete Properties*. Key Engineering Materials, v. 599, p. 11- 14, Trans Tech Publications, Switzerland 2014.

ZAHO, S. FAN, J., SUN, W. *Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete*. Construction and Building Materials, p. 540-548, 2014.

ZHANG, S., XUE, X., LIU, X., DUAN, P., YANG, H., JIANG, T. WANG, D., LIU, R. *Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources*. Journal of Mining Science, v. 42, p. 403-408, 2006.

Certifico que o aluno Werlley Cristiano de Oliveira, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "Uso de analise envoltória de dados para avaliação de modelos com e sem restrição aos pesos: um estudo de caso para análise de alternativas de reaproveitamento de rejeito de minério de ferro na construção civil", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Lásara F Rodrigues

Doutora Lásara Fabrícia Rodrigues

Orientador