

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALESSANDRO RETIZLAF

**OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DE ESCÓRIA ALTO-FORNO
E DEMAIS COMPONENTES PARA PRODUÇÃO DE
CIMENTO SUPERSULFATADO**

FRANCISCO BELTRÃO

2019

ALESSANDRO RETIZLAF

**OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DE ESCÓRIA ALTO-FORNO
E DEMAIS COMPONENTES PARA PRODUÇÃO DE
CIMENTO SUPERSULFATADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao curso de especialização em Métodos matemáticos Aplicados da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Especialista Em Métodos Matemáticos Aplicados”

Orientador: Prof. Me. Franklin Angelo Krukoski

FRANCISCO BELTRÃO

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Francisco Beltrão
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Especialização em Métodos Matemáticos Aplicados

TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização

OTIMIZAÇÃO DA DOSAGEM DE ESCÓRIA ALTO-FORNO E DEMAIS COMPONENTES PARA PRODUÇÃO DE CIMENTO SUPERSULFATADO

por

ALESSANDRO RETIZLAF

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização apresentado às 08 horas e 00 min. do dia 09 de novembro de 2019, como requisito parcial para obtenção do grau de especialista em Métodos Matemáticos Aplicados, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores que abaixo assinam este Termo. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

FRANKLIN ÂNGELO KRUKOSKI

Professor Coorientado

**MAIQUEL SCHMIDT DE
OLIVEIRA**

Membro da Banca

VILMAR STEFFEN

Membro da Banca

Prof. Vilmar Steffen

Responsável pela Coordenação do CEMMA
Curso de Especialização em Métodos Matemáticos Aplicados

***A FOLHA DE APROVAÇÃO ORIGINAL (ASSINADA) ENCONTRA-SE NA COORDENAÇÃO DO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM MÉTODOS MATEMÁTICOS APLICADOS.***

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a DEUS por estar sempre em minha direção.

Gostaria de agradecer e dedicar esse trabalho para minha família em especial, as minhas irmãs Bruna Aparecida de Bairro e Ana Tais de Bairro Carvalho Pereira, a minha mãe Delair Aparecida Leal de Bairro e ao meu pai João Maria de Bairro.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador Me. Franklin Angelo Krukoski, por ter me conduzido neste trabalho.

Agradecer de forma especial aos professores da Especialização em Métodos Matemáticos Aplicados que certamente contribuíram para o meu crescimento acadêmico.

Enfim, a todos os colegas da Especialização e amigos.

*Pesquisar é acordar
para o mundo.”*

(Marcelo Lamy)

RESUMO

RETIZLAF, ALESSANDRO. **Otimização Da Dosagem De Escória Alto-Forno E Demais Componentes Para Produção De Cimento Supersulfatado**. 2019. 41. Trabalho de Conclusão de Curso da Especialização em Métodos Matemáticos Aplicados - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2019.

O Cimento Portland é um dos produtos mais utilizados na construção civil. No entanto, seu processo produtivo causa alguns impactos ambientais irreversíveis. Estudos no sentido de minimizar os impactos ambientais causado pela produção do Cimento Portland, têm se intensificado. Existem muitas alternativas que visam diminuir os impactos ambientais, como a utilização de aditivos no cimento, entre eles a escória de alto-forno, cinzas volantes, pozolanas e fíler calcário, que podem ser usados como substituinte parcial ou total do clínquer. No caso da escória de alto-forno pode ser usada como substituinte total e dar origem ao Cimento Supersulfatado. Esta é gerada durante a produção do ferro-gusa, no entanto como é um resíduo industrial a escória pode apresentar diferente composição química em função da forma como ela foi obtida, exercendo papel determinante na qualidade do cimento supersulfatado produzido. Deste modo, encontrar meios que determinem a dosagem adequada de escória a ser utilizada é extremamente importante. Diante disso, o presente trabalho aplica a técnica de Programação Linear por meio do método Simplex disponível no Solver do Excel para determinar a dosagem de diferentes escórias a serem utilizadas para produzir cimentos supersulfatados com composição química semelhantes. Neste trabalho foram realizadas três simulações, uma utilizando escória ácida, outra básica e outra utilizando uma mistura das escórias ácidas e básicas. Ao fim do estudo, foi possível obter as três dosagens de cimento supersulfatado, com composição química semelhante.

Palavras-chave: Cimento Portland. Cimento Supersulfatado. Programação Linear. Método Simplex. Escória de alto-forno.

ABSTRACT

RETIZLAF, ALESSANDRO. **Optimization of Blast Furnace Slag Dosage and Other Components for Production of Supersulfated Cement** 2019. 41. Final Paper Presented To The Applied Mathematical Methods Specialization Course - Federal Technology University - Paraná. Francisco Beltrão, 2019.

Portland cement is one of the most used products in construction. However, its production process causes some irreversible environmental impacts. Studies to minimize the environmental impacts caused by Portland Cement production have intensified. There are many alternatives aimed at reducing environmental impacts, such as the use of cement additives, including blast furnace slag, fly ash, pozzolans and limestone, which can be used as a partial or total clinker substitute. In the case of blast furnace slag it can be used as a total substituent and give rise to the Supersulfated Cement. This is generated during the production of pig iron, however, as it is an industrial waste, the slag may have different chemical composition depending on the way it was obtained, playing a determining role in the quality of the supersulfated cement produced. Thus, finding means for determining the proper dosage of slag to be used is extremely important. Given this, the present work applies the Linear Programming technique using the Simplex method available in Excel Solver to determine the dosage of different slag to be used to produce supersulfated cements with similar chemical composition. In this work three simulations were performed, one using acidic slag, another basic and another using a mixture of acidic and basic slag. At the end of the study, it was possible to obtain the three dosages of supersulfated cement, with similar chemical composition.

Keywords: Portland cement. Supersulfated Cement. Linear Programming. Simplex Method. Blast furnace slag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção do cimento Portland.	13
Figura 2 - Classificação do Cimento Portland	15
Figura 3 - Funcionamento de um alto forno	18
Figura 4 - Fases do estudo da PO	22
Figura 5 - Fluxograma da descrição geral do algoritmo Simplex	25
Figura 6 - Quadro do Modelo Tabular para um problema de maximização	26
Figura 7 - Formulação do cimento para a amostra ACSSb	31
Figura 8 - Parâmetros do Solver para as amostras ACSS e BCSS	32
Figura 9 - Parâmetros do Solver para a amostra ABCSS	32
Figura 10 - Resultado obtido quando todas as restrições eram satisfeitas	33
Figura 11 - Formulação do cimento para a amostra ABCSS	33
Figura 12 - Formulação do cimento para a amostra BCSS	34
Figura 13 - Formulação do cimento produzido para a amostra ABCSS	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do Cimento Portland	16
Tabela 2 - Comparação da composição das escória e o cimento Portland	19
Tabela 3 - Exemplo de Aplicações da PO	22
Tabela 4 - Composição química das escórias utilizada pra simulação	27
Tabela 5 - Limita da quantidade de cada óxido utilizados simulação	28
Tabela 6 - Matriz completa de coeficientes das variáveis	30
Tabela 7 - Dosagem de cada componente em (%)	35
Tabela 8 - Dosagem de cada componente em grama	35
Tabela 9 - Composição química das amostras simuladas	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	Referencial Teórico	13
3.1	Produção Do Cimento Portland	13
3.1.1	Produção do clínquer	14
3.1.2	Composição química do cimento	15
3.2	ADIÇÕES DO CIMENTO	16
3.3	Escória De Alto-Forno	17
3.3.1	Produção da escória	17
3.3.2	Morfologia e composição química da escória	18
3.4	Impactos Ambientais	20
3.5	Pesquisa Operacional	21
3.5.1	Programação Linear	23
3.5.2	Método de Simplex	23
4	MÉTODOS	27
4.1	Descrição Do Problema	27
4.2	Formulação e construção do modelo matemático	29
4.3	Implementação do modelo	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A palavra cimento tem origem no Latin *caement*, que significa pedra proveniente de rochedos. A história do cimento passa pelas Pirâmides do Egito que utilizavam em suas construções um pó de gesso calcinado, pela Roma e Grécia antiga que utilizavam na construção de seus monumentos uma massa gerada pela hidratação de cinzas vulcânicas, mas só ganhou forma em 1756 pelas mãos do engenheiro inglês John Smeaton por meio da calcinação de calcário e argila. Após a descoberta de Smeaton e vários estudos o construtor inglês Joseph Aspdin patenteou em 1824 o que é chamado hoje de Cimento Portland. No pedido da patente constava que o calcário era moído com argila, em meio úmido, até transformar em um pó impalpável. A água era evaporada pela exposição ao sol. A mistura seca era calcinada em fornos e depois moída até obter um pó bem fino que foi denominado de Cimento Portland (GOMES et al., 2017).

Por sua versatilidade, durabilidade, valor econômico, entre outras características, o Cimento Portland é largamente empregado na construção civil. No entanto, a produção deste material apresenta alguns problemas como: o consumo de matéria prima não renovável, elevado custo energético e além disso, a produção do cimento é responsável por emitir em torno de 5% das emissões de CO₂ provocada pelo homem (JUENGER et al., 2011).

Visando a sustentabilidade, a indústria cimenteira tem investido muito em tecnologia na produção de cimento (HOLANDA, 2015). Uma das possibilidades para a diminuição do consumo de matéria prima do gasto energético e das emissões de CO₂ é a utilização de aditivos ou alternativos na produção do cimento como escórias siderúrgicas, cinzas volantes, pozolanas artificiais e fíler calcário (CNI, 2012).

Um dos aditivos amplamente estudado na produção do cimento é a escória de alto-forno que é um subproduto obtido a partir da produção de ferro-gusa (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003). A escória de alto-forno é rica em CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO conferindo-lhe uma composição química semelhante ao Cimento Portland. Quando a escória líquida é resfriada rapidamente forma-se uma fase vítrea com alta atividade de cimentação sendo possível sua utilização tanto como substituinte parcial ou total do Cimento Portland (ZHANG et al., 2013). No entanto, o emprego da escória com características cimentícias depende fortemente da sua reatividade que

está associada diretamente com suas propriedades físicas e químicas, além das condições de obtenção (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003).

Diante disso, o controle rigoroso na composição química dos cimentos feitos com escórias ácidas/básicas se faz necessário. Deste modo, a Pesquisa Operacional tem papel fundamental na determinação das quantidades de cada constituinte que deve estar no cimento por meio da Programação Linear.

Sendo assim, o presente trabalho tem como finalidade apresentar estudos otimização da formulação de cimentos a partir de escórias ácidas e ou básicas visando produzir cimentos com composição química semelhante. Uma vez que a composição química tem um papel importante sobre as características físicas e química do cimento (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003). Para tal finalidade, foi modelado um problema de Pesquisa Operacional aplicado pela técnica de Programação Linear utilizando algoritmo Simplex disponível no Solver do Excel.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: Além desta introdução, no capítulo 2 encontram-se os objetivos, no capítulo 3 discorre-se sobre o referencial teórico, no capítulo 4 é apresentado os métodos, no capítulo 5 os resultados e discussão, no capítulo 6 a conclusão e por fim as referências.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Otimizar o processo de dosagem de escória de alto-forno e demais componentes para produção de cimento supersulfatados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

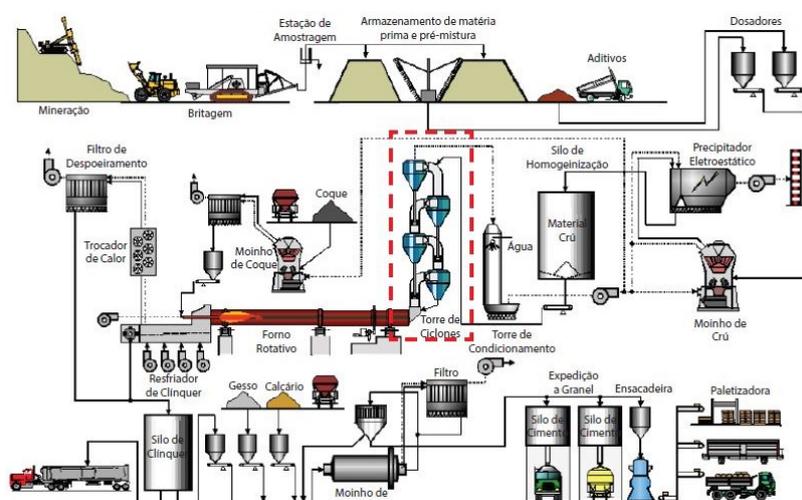
- Aplicar o problema da mistura para otimizar o processo de adição de escória de alto-forno para produção de cimento supersulfatados.
- Resolver o problema utilizando o método Simplex a partir do Solver do Excel.
- Possibilitar a elaboração de cimentos supersulfatados a partir de escórias ácidas e básicas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Desde seu desenvolvimento, o Cimento Portland é um dos principais constituintes na produção do concreto (JUENGER et al., 2011). Seu processo de produção, pode ser resumido como uma combinação da exploração e beneficiamento de várias substâncias por meio da formação do clínquer, em forno a cerca de 1450 °C, seguida da moagem e adição de outras substância (CNI, 2012). O clínquer de cimento Portland pode ser definido como um material obtido através da sinterização de rochas carbonáticas e argilosas, ou outro material similar que possua composição semelhante e suficiente reatividade (MELLER, 2017). Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do processo de produção de cimento Portland.

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção do cimento Portland



Fonte: Adaptado de European Commission (2013)

Uma das etapas iniciais da produção do cimento é a explosão das rochas de calcário que é uma das principais substâncias que compõem a farinha e está presente em torno de 70% em peso na composição da matéria prima crua e por isso as fábricas de cimentos são localizadas bem próximas às jazidas de calcário. Após a extração, as pedras de calcário são transportadas até o britador, que reduz seu tamanho. Após

a britagem o calcário é transportado por correias para o pátio de pré-homogeneização e deste modo garante-se a uniformidade da matéria-prima a ser utilizada na produção do clínquer (GONZAGA, 2009).

Após a pré-homogeneização o calcário, argila e minérios de ferro são armazenados separadamente em silos equipados com balanças dosadoras automáticas que dosam a quantidade de cada matéria prima, baseando-se em parâmetros químicos pré-estabelecidos. Após definida a mistura as matérias primas são transportadas para um moinho na vertical de rolos, onde as substâncias são moídas e secas em uma temperatura entre 200 °C à 300 °C e em seguida, a farinha é transportada ao silo de homogeneização. Após esse processo, a farinha crua em forma pulverulenta é conduzida à torre de ciclones, onde num trajeto descendente a farinha é pré-aquecida gradativamente e se deslocam nas torres no sentido ascendente em contracorrente com a farinha crua dando início a pré-calcinação (GONZAGA, 2009).

3.1.1 Produção do Clínquer

As torres de pré-aquecimento, presentes no forno rotativo, aquecem a farinha dando início a calcinação ou a descarbonatação do calcário, passando em seguida para o forno rotativo, onde a temperatura chega próximo aos 2000 °C, no ponto de maior temperatura (CNI, 2012). No forno rotativo ocorre a combustão em proporções corretas da matéria prima (calcário, argilas) para formar principalmente o óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro III (Fe₂O₃) que são os principais constituintes do clínquer que compõe o cimento Portland (AÏTCIN, 2004).

No forno rotativo o material atinge altas temperaturas e funde-se parcialmente resultando no clínquer. Esse, é resfriado, é então moído com gesso e, dependendo da classe de cimento a ser produzida, são adicionados os demais materiais, como escória de alto-forno, cinzas volantes, pozolanas e fíler calcário, para formar o cimento Portland (CNI, 2012).

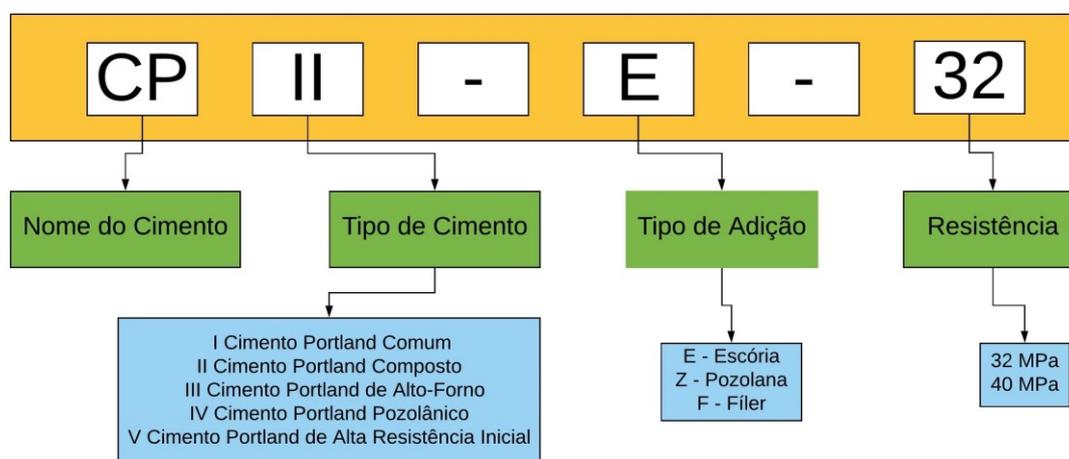
3.1.2 Composição Química do Cimento

Além das matérias-primas básicas (calcário e argila) a indústria cimentícia nacional tem utilizado subprodutos de outras atividades industriais e matérias-primas alternativas há mais de 50 anos, prática que nos últimos anos vem se intensificando pelo mundo (CNI, 2012).

A utilização de aditivos ou alternativos na produção do cimento como escórias siderúrgicas, cinzas volantes, pozolanas artificiais e filer calcário, além de diversificar a aplicação do cimento colabora para uma redução significativa das emissões de CO₂ (CNI, 2012).

Em função das diferentes adições é produzido comercialmente várias classes de Cimento Portland com composições química diferentes o que possibilita inúmeras aplicabilidades do cimento. Sendo assim, é necessário ter uma nomenclatura para classificar cada tipo de cimento. Na Figura 2 é apresentado como é feito essa classificação.

Figura 2 - Classificação do Cimento Portland



Fonte: Autoria Própria (2019)

A nomenclatura é composta pelo nome do cimento seguido do número, cujo o qual caracteriza o tipo de cimento, ou seja, se existe adição ou não naquele cimento. Após é apresentado uma letra que indica o tipo de adição (E- Escória, Z-Pozolana, F-Filer) e por último a resistência a compressão do cimento apresentado geralmente em Mpa.

Na Tabela 1 é evidenciado algumas das principais classes do Cimento Portland com as referidas adições e normativas.

Tabela 1 - Classificação do Cimento Portland

Tipo de cimento	Adições	Sigla	Norma
Cimento Portland Comum	Escória, pozolana (até 5%)	CP I	NBR 5732
	Fíler calcário (6-10%)	CP I -S	
Cimento Portland Composto	Escória (6-34%)	CP II -E	NBR 11578
	Pozolana (6-34%)	CP II -Z	
Cimento Portland de Alto-Forno	Fíler (11-25%)	CP II -F	NBR 5735
	Escória (35-75%)	CP III	
Cimento Portland Pozolânico	Pozolana (15-50%)	CP IV	NBR 5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	Fíler (até 10%)	CP V-ARI	NBR 5733

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2019)

3.2 ADIÇÕES DO CIMENTO

Com o objetivo de minimizar os gastos energéticos e a emissão de CO₂, nos últimos anos tem-se intensificado os estudos na busca por aglomerados de baixos impactos ambientais. Desta maneira, uma variedade de materiais residuais tem sido empregada com este fim. No próprio Cimento Portland já apresenta algumas adições de matérias suplementares (JUENGER et al., 2011).

Uma substituição parcial do Cimento Portland por materiais suplementares quando disponível com preços competitivos, pode-se mostrar como uma alternativa vantajosa, não apenas econômica ou ambiental, mas também estruturais (AÏTCIN, 2004). Dentre os possíveis substituintes totais ou parciais no Cimento pode-se destacar os materiais pozolânicos, as cinzas volantes, o fíler calcário e as escórias providentes das siderúrgicas.

Os materiais pozolânicos são compostos silicosos ou silico-aluminosos, que quando moídos e misturas com a água reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades de se aglomerar. No entanto, sem a presença da água esses matérias possuem pouquíssimas propriedades aglomerantes. Dentre os matérias pozolânicos, encontram-se a sílica ativa, argilas calcinadas, cinza da casca

do arroz, cinza volante, cinzas vulcânicas e cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (BARROSO, 2011).

As cinzas volantes são minerais produzidos a partir da queima de carvão para a geração de energia elétrica em usinas termoeletricas. Os resíduos sólidos gerado neste processo resultam na produção de cinzas volantes e pesadas, sendo que a utilização das cinzas volantes na fabricação de cimentos vem sendo estudada a muito tempo em função dos benefícios econômicos e técnicos proporcionados ao produto final (WITZKE, 2018).

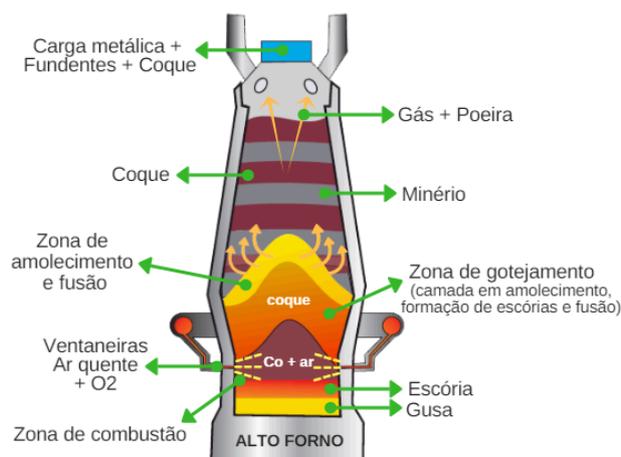
O fíler calcário caracteriza-se como um pó fino, proveniente da rocha calcário classificado como calcítico ou dolomítico, dependendo de sua composição química. De modo geral sua estrutura é porosa e com superfície rugosa (MORAES, 2010).

3.3 ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

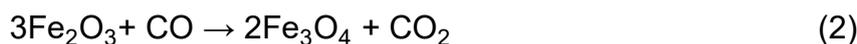
3.3.1 Produção da Escória

Na Figura 3 é apresentado o funcionamento de um alto-forno utilizado na produção do ferro gusa. A principal função do forno é reduzir o minério de ferro em ferro metálico (Fe^0) e a separação das partes não metálicas (escória). A separação do ferro é obtida a partir da reação do óxido de ferro com o monóxido de carbono (CO) como apresentado nas Equações de (1) à (4). A parte metálica é separada da parte não metálica por meio da fusão em torno de 1500 °C. A escória incorpora todas as impurezas indesejáveis e fica sobrenadante, possibilitando a separação do ferro gusa e a escória (MOREIRA, 2006).

Figura 3 - Funcionamento de um alto forno



Fonte: Usiminas (2019)



A escória de alto-forno é um subproduto obtido a partir da produção de ferro-gusa em altos fornos (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003). Ela se forma pela junção de agentes fundentes e impurezas do minério de ferro (LI; SUN; LI, 2010), sendo que para cada tonelada de ferro gusa produzido ocorre a geração de 250 à 300 kg de escória (ABRÃO, 2018).

3.3.2 Morfologia e composição Química da Escória

A escória de alto-forno é rica em CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO conferindo-lhe uma composição química semelhante ao Cimento Portland. Quando a escória líquida é resfriada rapidamente forma-se uma fase vítrea com alta atividade de cimentação sendo possível sua utilização tanto como substituinte parcial ou total do Cimento Portland (ZHANG et al., 2013). No entanto, o emprego da escória com características cimentícias depende fortemente da sua reatividade que está associada diretamente

com suas propriedades físicas e química além das condições de obtenção (PAL; MUKHERJEE; PATHAK, 2003).

Uma das condições obtenção importante é com relação ao resfriamento. A taxa de resfriamento deve ser rápida de tal modo que se obtenha uma fase amorfa. Desta maneira, o resfriamento rápido pode ser feito com a adição de água, e com isso é minimizado a formação de cristais e garantido a formação de uma fase amorfa na escória (ZHANG et al., 2013).

A escória é um resíduo da produção de ferro gusa em alto forno. Dependendo do combustível utilizado na siderurgia (Carvão de coque ou carvão vegetal) pode interferir na composição química da escória principalmente na proporção CaO/SiO_2 . Uma vez, que de um modo geral as escórias de alto forno são classificadas levando em conta a relação CaO/SiO_2 , pois se essa relação for menor que um é classificada como escória ácida e se for maior que um é classificada como básica. Na Tabela 2 é apresentado a composição química das escórias de alto forno do Brasil e a composição do Cimento Portland (JOHN; AGOPYAN, 2002).

Tabela 2 - Comparação da composição das escória e o cimento Portland

Composição	Escória Básica	Escória Ácida	Cimento Portland
CaO	40-45	24-39	66
SiO ₂	30-35	38-55	22
Al ₂ O ₃	11-18	8-19	5
MgO	2,5-9	1,5-9	-
Fe ₂ O ₃	0-2	0,4-2,5	3
FeO	0-2	0,2-1,5	-
SO ₃	0,5-1,5	0,03-0,2	-
CaO/SiO ₂ média	1,31	0,68	3

Fonte: John e Agopyan (2002)

Apesar do Cimento Portland ser o mais utilizado no mundo, ele não é o único aglomerado que existe na construção civil. Os chamados cimentos especiais formam uma categoria de cimento com características únicas possibilitando aplicações cuja as quais o Cimento Portland não é aplicado. Um destes cimentos especiais é o Cimento Supersulfatado (CSS) que diferente do cimento comum é a substituição total clínquer por escória de alto-forno por exemplo. Os primeiros registros da fabricação deste tipo de cimento é datado de 1908, quando descobriu-se propriedades hidráulicas das escórias de alto-forno (VARELA, 2016).

Ao utilizar escória de alto-forno, não apenas como adição, mas como o principal componente do cimento, auxilia na diminuição do impactos ambientais

causados pelo consumo da demanda de matéria prima naturais, além de diminuir o gasto energético e as emissões de CO₂ (RUBERT, 2015).

3.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

Por sua versatilidade, durabilidade, valor econômico, entre outras características, o Cimento Portland é largamente empregado na construção civil. No entanto a produção deste material apresenta alguns problemas. Como a demanda por esse material é grande, a fabricação do Cimento Portland consome em torno de 10 a 11 EJ anualmente o que representa o consumo de 2 à 3% do da energia primaria global. Além disso, na produção do Cimento Portland é liberado cerca de 0,87 tonelada de dióxido de carbono (CO₂) para cada tonelada de cimento produzida, representando em torno de 5% das emissões de CO₂ provocada pelo homem (JUENGER et al., 2011).

Em escala mundial, aproximadamente 90% das emissões de CO₂ oriundas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção do clínquer, seja durante a calcinação/descarbonatação da matéria-prima, seja durante a queima do combustível no interior dos fornos. A parcela restante proveniente do transporte da matéria-prima e das emissões indiretas pelo consumo de energia elétrica na fábrica (CNI, 2012).

A sustentabilidade industrial é uma questão atual, envolvendo inúmeros setores da sociedade, pois existe a possibilidade de tratamento dos resíduos gerando boas práticas de produção. A indústria cimenteira tem investido muito em tecnologia na produção de cimento, e uma das expectativas é produzir cimento com menor consumo de matéria-prima não renovável, além do controle de emissão de gases, co-processamento em sistemas de tratamento de rejeitos industriais para geração de energia e controle térmico durante a clínquerização (HOLANDA, 2015).

Os cimentos com adições representam uma boa solução ambiental, pois utilizam subprodutos de outros processos produtivos. Além disso, a produção de cimento com maiores teores de adição têm contribuído para redução da utilização de matérias-primas não renováveis preservando jazidas minerais e a diminuição do consumo de combustíveis fóssil pelo fato do menor consumo de clínquer (CNI, 2012).

3.5 PESQUISA OPERACIONAL

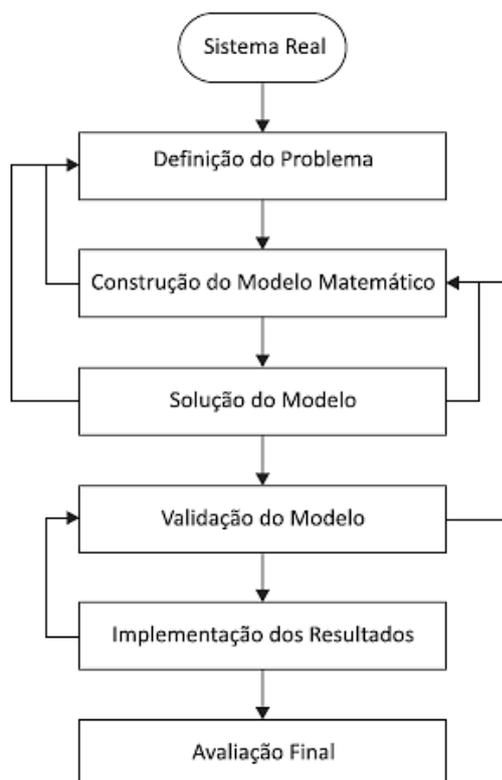
A Pesquisa Operacional (PO), surgiu na Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945) com o intuito de resolver problemas de natureza logística, tática e de estratégia militar, quando um grupo de cientistas foi designado para definir o uso mais eficaz de recursos militares que, em função do conflito, eram limitados. Dentre os problemas estudados pode-se enfatizar: projeto, manutenção e inspeção de aviões, projeto de explosivos, tanques e motores, melhoria da utilização de radar, dimensionamento de frota, canhões antiaéreos e táticas de bombardeios a submarino, entre outros (BELFIORE, PATRÍCIA, 2013).

Pode-se conceituar a Pesquisa Operacional como um método científico usado para tomada de decisões, utilizando várias técnicas e modelos matemáticos, entre eles a Programação Linear. No entanto a PO engloba muitas outras técnicas, como: Programação não Linear, Programação Inteira, Programação Dinâmica, Teoria de Filas, Simulação Monte Carlo, entre outras. Todas essas técnicas são utilizadas com o intuito de encontrar uma solução ótima para a resolução de um determinado problema (SOUTO MAIOR, 2014).

Um estudo de PO parte da formulação do problema seguida de modelagem matemática, com o intuito de simular a realidade. Desta forma, é possível obter conclusões/soluções que podem ser aplicados à realidade, dadas as condições iniciais do problema (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Após a elaboração do modelo matemático a próxima etapa é obter solução ótima do problema por meio de técnicas de PO. No entanto a solução obtida precisa ser validada de tal modo que o objetivo em questão tenha sido atingido. Porém, revisões de uma das fases anteriores podem ser necessárias, até que a conclusão obtida seja satisfatória. A solução otimiza a função-objetivo e atende todas as restrições do problema, de acordo com as variáveis de decisão apresentadas (BAIO et al., 2004). Na Figura 4 são apresentadas as fases para a elaboração de um estudo de PO (BELFIORE, PATRÍCIA, 2013).

Figura 4 - Fases do estudo da PO



Fonte: Belfiore e Patrícia (2013)

A PO é utilizada por empresas dos mais variados seguimentos para solucionar os mais diversos tipos de problemas. Na Tabela 3 é apresentado alguns exemplos de empresas que utilizaram PO para melhorar a eficiência de determinada atividade (RODRIGUES et al., 2014).

Tabela 3 - Exemplo de Aplicações da PO

Empresa	Aplicação	Economia anual
Continental Airlines	Otimizar a realocação de tripulações quando ocorrem desajustes nos horários de voo.	US\$ 40 milhões
Samsung	Redução de tempos de fabricação e níveis de estoque.	US\$ 200 milhões mais receitas
Sears	Programação de rotas de veículos para as frotas de entrega e atendimento domiciliar.	US\$ 42 milhões
General Motors	Aumentar a eficiência das linhas de produção	US\$ 90 milhões
AT&T	Projeto e operação de call centers.	US\$ 750 milhões mais lucros

Fonte: Rodrigues et al. (2014)

3.5.1 Programação Linear

Um dos aspectos fundamentais dos problemas envolvendo tomada de decisões é a otimização; quando o objetivo é encontrar maneiras de utilizar determinados recursos de modo eficiente. Em geral a PO trata-se de recursos limitados e a sua utilização criteriosa possibilitam o maior rendimento ou produtividade do processo em estudo (MARINS, 2011).

Existem várias técnicas usadas para resolver os problemas de PO, no entanto, a Programação Linear (PL) é uma das mais utilizadas. Essa técnica pressupõe uma relação linear entre as variáveis do problema, buscando uma solução ótima. Essas características são apresentados e relacionados por uma série de equações lineares (RODRIGUES et al., 2014).

De modo geral a PL tem como objetivo encontrar a melhor solução para os problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares. A grande aplicabilidade e simplicidade devem-se a linearidade do modelo. O objetivo da PL é a maximização ou minimização de uma função linear, que é denominada de Função Objetivo (Z) que respeita um sistema linear de igualdade ou desigualdade que são denominadas de restrições (MARINS, 2011).

Todo problema de PL busca obter uma solução ótima para determinada situação. Essa solução é resultante de um conjunto de decisões. Desta forma, as variáveis de decisão são todas as opções que se tem no problema. Elas são as incógnitas a serem definidas na solução. A otimização de um problema de PL tem como objetivo a maximização ou minimização de uma determinado função linear. Desta maneira a Função Objetivo (FO) é uma expressão matemática que quantifica a solução de um dado problema. No entanto, sempre haverá um limitante na otimização do problema. Essas limitações são denominadas de restrições, que são escritas no problemas na forma de equações ou inequações matemáticas, e traduzem as limitações reais do problema representado. (RODRIGUES et al., 2014).

3.5.2 Método de Simplex

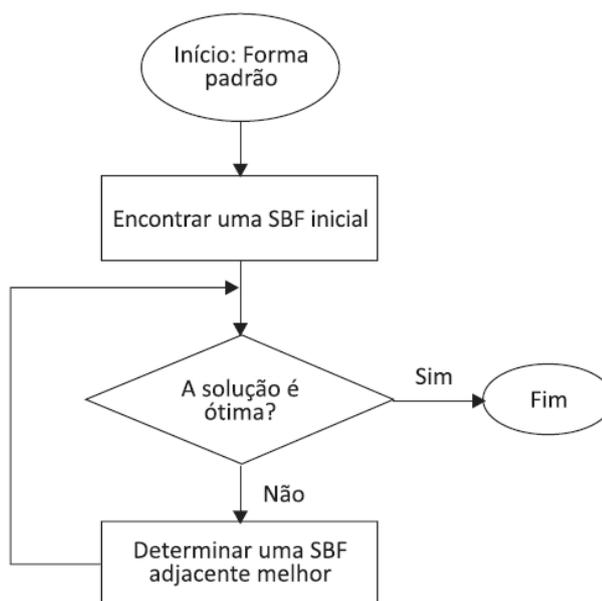
Um problema simples de PL com duas variáveis de decisão pode ser facilmente resolvido pelo método gráfico ou analítico. No entanto, problemas com mais

complexidade tornam-se impraticáveis a resolução pelos métodos citados. Como alternativa, utiliza-se o algoritmo Simplex ou, um *software* existente no mercado para resolução de problemas de programação linear com maior complexidade (BELFIORE, PATRÍCIA, 2013).

O algoritmo Simplex é utilizado em programação linear e tem apresentado grandes aplicações na resolução de problemas. É uma ferramenta que economizou além de tempo muito dinheiro para milhares de empresas e indústrias ao redor do mundo (MACHADO FERREIRA, 2016). O algoritmo Simplex utiliza conceitos de Álgebra Linear, em especial a resolução de sistemas de equações lineares (SOUTO MAIOR, 2014).

O algoritmo Simplex é um método iterativo que parte de uma solução básica factível inicial (SBF) e busca, a cada iteração, uma nova solução básica factível, chamada solução básica factível adjacente, com melhor valor na função objetivo, até que o valor ótimo seja atingido. O conceito de SBF adjacente pode ser descrito da seguinte maneira: A partir de uma solução básica atual, uma variável não básica entra na base no lugar de outra variável básica que passa a ser não básica, gerando uma nova solução chamada solução básica adjacente. Para um problema com m variáveis básicas e $n - m$ variáveis não básicas, duas soluções básicas são adjacentes se elas tiverem em comum $m - 1$ variáveis básicas, podendo as mesmas apresentar valores numéricos diferentes. Isso implica também que $n - m - 1$ variáveis não básicas sejam comuns (BELFIORE, PATRÍCIA, 2013). Na Figura 5 é apresentado o Fluxograma da descrição geral do algoritmo Simplex.

Figura 5 - Fluxograma da descrição geral do algoritmo Simplex



Fonte: Lachtermacher (2009)

A forma padrão de um modelo geral de maximização de programação linear pode ser escrita como apresentado pela Equação (5) sujeito a as restrições descrita pela Equação (6) (BELFIORE, PATRÍCIA, 2013).

$$\text{Max } Z = C_1X_1 + C_2X_2 \dots C_nX_n \quad (5)$$

Sujeito a:

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 \dots a_{1n}X_n = b_1 \quad (6)$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 \dots a_{2n}X_n = b_2 \quad (7)$$

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{matrix}$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 \dots a_{mn}X_n = b_m \quad (8)$$

$$X_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

No entanto, esse mesmo modelo pode ser apresentado de forma Tabular como é apresentado pela Figura 6.

Figura 6 - Quadro do Modelo Tabular para um problema de maximização

n ^o da equação	Coeficientes					Constante
	z	x_1	x_2	...	x_n	
0	1	$-c_1$	$-c_2$...	$-c_n$	0
1	0	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}	b_1
2	0	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}	b_2
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
m	0	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}	b_m

Fonte: Belfiore e Patrícia, (2013)

Com base na Figura 6 pode-se observar que a função z de maximização, na forma tabular, pode ser reescrita como $z - C_1X_1 - C_2X_2 - \dots - C_nX_n = 0$. As colunas intermediárias apresentam os coeficientes das variáveis do lado esquerdo de cada equação, além do coeficiente de z . As constantes do lado direito de cada equação estão representadas na última coluna (BELFIORE E PATRÍCIA, 2013).

4 MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Uma das etapas mais importantes no processo de produção de cimento é a dosagem adequada da matéria, pois a composição química é determinante na qualidade final do cimento.

Como o objetivo deste trabalho é otimizar a dosagem de cada substância na formulação de cimentos supersulfatado de tal modo que, mesmo partindo de matéria prima diferentes, se obtenham cimentos com propriedades semelhantes. Ou seja, um cimento produzido a partir de uma escória ácida tenha propriedades química e físicas semelhante a outro cimento produzido a partir de uma escória básica. No entanto, para que isso seja possível é necessário certificar que a composição química dos cimentos produzidos a partir de diferentes matérias primas sejam semelhantes.

No presente estudo optou por simular três dosagens para a produção do cimento, sendo a primeira - Produção do cimento somente com escória ácida a qual foi chamada de amostra ACSS. A segunda - Produção do cimento somente com escória básica que foi denominada de BCSS e a terceira - Produção do cimento a partir das mistura das escórias ácidas e básicas, a qual foi designada de ABCSS. Na Tabela 4 é apresentada a composição química de cada uma das escória estudadas.

Tabela 4 - Composição química das escórias utilizada pra simulação

Óxidos	Escória Básica (%)	Escória Ácida (%)
CaO	47,70	31,60
SiO ₂	34,70	40,50
Al ₂ O ₃	8,90	14,30
SO ₃	1,60	0,10
Fe ₂ O ₃	0,60	1,80
MgO	4,30	7,50
Na ₂ O	0,10	0,20
K ₂ O	0,40	0,90

Fonte: Autoria Própria (2019)

Para proceder as simulações foi definido uma quantidade ideal de cada óxido presente no cimento listado na Tabela 4. Essas quantidades ideais foram adaptados e definidos baseando-se nos dados experimentais publicado por Angulski Da Luz; Hooton, (2019) onde, obtiveram bons valores para os ensaios de resistência à

compressão quando utilizou-se 88% de escória básica, 10% de anidrita (CaSO_4) e 2% de Cimento Portland (Ativador alcalino). Sendo que a quantidade de cada óxido na simulação variou dentro de limite de 5% para uma quantidade maior (máximo) e menor (mínimo) do valor ideal. Na Tabela 5 é apresentado as quantidades de cada óxido usado no estudo publicado.

Tabela 5 - Limita da quantidade de cada óxido utilizados simulação

Óxidos	Mínimo (%)	Composição (%) (Valor ideal)	Máximo (%)
CaO	40,44%	42,57	44,70
SiO ₂	27,60%	29,05	30,51
Al ₂ O ₃	11,59%	12,04	12,81
SO ₃	5,32%	5,60	5,88
Fe ₂ O ₃	3,47%	3,65	3,84
MgO	5,10%	5,37	5,63
Na ₂ O	0,14%	0,15	0,16
K ₂ O	0,68%	0,72	0,76

Fonte: Adaptado de Angulski Da Luz e Hooton, (2019)

Uma vez estabelecido os limites de cada óxido, definiu-se as restrições do problema para a simulação das amostras ACSS e BCSS.

- A quantidade de escória utilizada tem que ser maior que 70%.
- A quantidade de CaSO_4 tem que ser menor que 20%.
- A quantidade de ativador alcalino (CaO) tem que ser maior que 1% e menor que 15%.
- A quantidade de CaO tem que ser maior que 40,44% e menor que 44,70%.
- A quantidade de SiO₂ tem ser maior que 27,60% e menor que 30,51%.
- A quantidade de Al₂O₃ tem ser maior que 11,59% e menor que 12,81%.
- A quantidade de SO₃ tem ser maior que 5,32% e menor que 5,88%.
- A quantidade de Fe₂O₃ tem ser maior que 3,47% e menor que 3,84%.
- A quantidade de MgO tem ser maior que 5,10% e menor que 5,63%.
- A quantidade de Na₂O tem ser maior que 0,14% e menor que 0,16%.
- A quantidade de K₂O tem ser maior que 0,68% e menor que 0,76%.
- A soma das quantidades de todos os óxidos presente nas amostras tem que ser 100%.

Para a amostras ABCSS foi modificado apenas as quantidades de escórias mantendo-se as demais restrições.

- A quantidade de escória ácida foi definida como maior que 20% e de básica maior que 60%.

4.2 FORMULAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Considerando que as variáveis de decisão são definidas por:

x_1 = Proporção de escória ácida;

x_2 = Proporção de escória básica;

x_3 = Proporção do ativador alcalino (CaO);

x_4 = Proporção de CaSO₄;

x_5 = Proporção de SiO₂;

x_6 = Proporção de Fe₂O₃;

x_7 = Proporção de Al₂O₃;

x_8 = Proporção de MgO;

x_9 = Proporção de Na₂O;

x_{10} = Proporção de K₂O;

A função objetivo consiste em maximizar a quantidade de escória utilizada, sendo assim.

$$\text{Máx } Z = \sum_i x_i \quad (10)$$

Onde $i = 1$ para ACSS, $i = 2$ para BCSS e $i = 1, 2$ para ABCSS.

Sujeito as seguintes restrições:

$$Ax \geq b_{min} \quad (11)$$

$$Ax \leq b_{max} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{10} x_i = 1 \quad (13)$$

$$x_i \geq 0, i = 1, \dots, 10 \quad (14)$$

De acordo com a Equação (11) e (12) cada restrição deve satisfazer as quantidades mínimas e máximas, considerando as proporções de cada óxido descritas na Tabela 6. A equação (13) garante que seja gerada uma composição com quantidades proporcionais e a equação (14) limita as restrições quanto a não negatividade.

Na Tabela 6 é apresentado a matriz completa de coeficientes das variáveis, de acordo com a composição química dos óxidos.

Tabela 6 - Matriz completa de coeficientes das variáveis

Óxidos	*EB	*EA	CaSO ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
CaO	47,70	31,60	41,20	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SiO ₂	34,70	40,50	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	8,90	14,30	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO ₃	1,60	0,10	58,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	0,60	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00
MgO	4,30	7,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,10	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
K ₂ O	0,40	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

*EB Corresponde a escória básica e *EA escória ácida

Fonte: Autoria Própria (2019)

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Após a formulação do problema, organizou-se os dados em uma planilha do Excel, em três simulações distintas. Na simulação para amostra ACSS exclui-se a variável x_2 e, conseqüentemente a coluna da escória básica. Na simulação para a amostra BCSS exclui-se a variável x_1 , correspondente à coluna da escória ácida e na simulação da amostra ABCSS utilizou-se todas as variáveis, tal qual apresentado na Tabela 6. Essa última, justifica-se pela dificuldade em se atender as restrições mínimas de alguns componentes químicos da fórmula, sendo essa uma possível alternativa para um bom aproveitamento das diferentes composições das escórias.

Após a implementação do problema utilizou-se o algoritmo do método Simplex disponível Solver do Microsoft Excel para encontrar a quantidade de cada variável a ser utilizada de tal modo que atendesse as quantidades mínimas e máximas de cada óxido utilizado na formulação do cimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a modelagem matemática os dados foram transferidos para uma planilha do Excel. A Figura 7 apresenta a planilha após a inserção dos dados. Na coluna C3 à C10 é exibida a quantidade de cada óxido presente na escória. O item indicado pela coluna L3 à L10 é o valor encontrado para cada óxido após a execução do Solver do Excel, que neste trabalho foi denominado de resposta, sendo que, o valor encontrado tem que estar entre o valor mínimo e máximo da quantidade de cada óxido. A célula M14 indica a função objetivo do problema. As células C15 à K15 indicam a dosagem de cada variável em percentual que deve ser utilizado na produção do cimento de cada amostra. E o conjunto de células C22 à K22 indicam as quantidades de cada óxido em grama que deve ser utilizado para preparar as amostras ACSS, BCSS e ABCSS.

Figura 7 - Formulação do cimento para a amostra ACSS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2		Óxidos	Escória	CaSO ₄	Cao	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Resposta	Mínimo	Ideal	Máximo	
3		CaO		41,20%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		40,44%	42,57%	44,70%	
4		SiO ₂		0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		27,60%	29,05%	30,51%	
5		Al ₂ O ₃		0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		11,59%	12,20%	12,81%	
6		SO ₃		58,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		5,32%	5,60%	5,88%	
7		Fe ₂ O ₃		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%		3,47%	3,65%	3,84%	
8		MgO		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%		5,10%	5,37%	5,63%	
9		Na ₂ O		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%		0,14%	0,15%	0,16%	
10		K ₂ O		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%		0,68%	0,72%	0,76%	
11																
12																
13			X ₁	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀					
14		Variáveis	Escória	CaSO ₄	Cao	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O		F=	0%		
15		Cál (%)														
16																
17			70%	20%	1%											
18		Restrições			15%											
19																
20			X ₁	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	Total				
21		Variáveis	Escória	CaSO ₄	Cao	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O					
22		Massa (g)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
23			Massa total da pasta (g)										300			
24																

Fonte: Autoria Própria (2019)

Em seguida, ajustaram-se os parâmetros do Solver para as fazer as simulações das dosagem de cada componente do cimento para cada uma das amostras. Nas Figuras 8 e 9 é apresentado os paramentos do Solver para as amostras ACSS e BCSS (Figura 8) e para a amostra ABCSS (Figura 9).

Figura 8 - Parâmetros do Solver para as amostras ACSS e BCSS

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo: SNS14

Para: Máx. Mín. Valor de: 0

Alterando Células Variáveis: SCS15:SKS15

Sujeito às Restrições:

- SCS15 >= SCS17
- SDS15 <= SDS17
- SES15 <= SES18
- SES15 >= SES17
- SLS3:SL\$10 <= SOS3:SOS10
- SLS3:SL\$10 >= SMS3:SMS10
- SNS14 = 1

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de: LP Simplex

Método de Solução
 Seleccione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares.
 Seleccione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Seleccione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Ajuda Resolver Fechar

Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 9 - Parâmetros do Solver para a amostra ABCSS

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo: SOS14

Para: Máx. Mín. Valor de: 0

Alterando Células Variáveis: SCS15:SL\$15

Sujeito às Restrições:

- SCS15 >= SCS17
- SDS15 >= SDS17
- SES15 <= SES18
- SES15 >= SES17
- SFS15 <= SFS18
- SFS15 >= SFS17
- SMS3:SMS10 <= SPS3:SPS10
- SMS3:SMS10 >= SNS3:SNS10
- SOS14 = 1

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de: LP Simplex

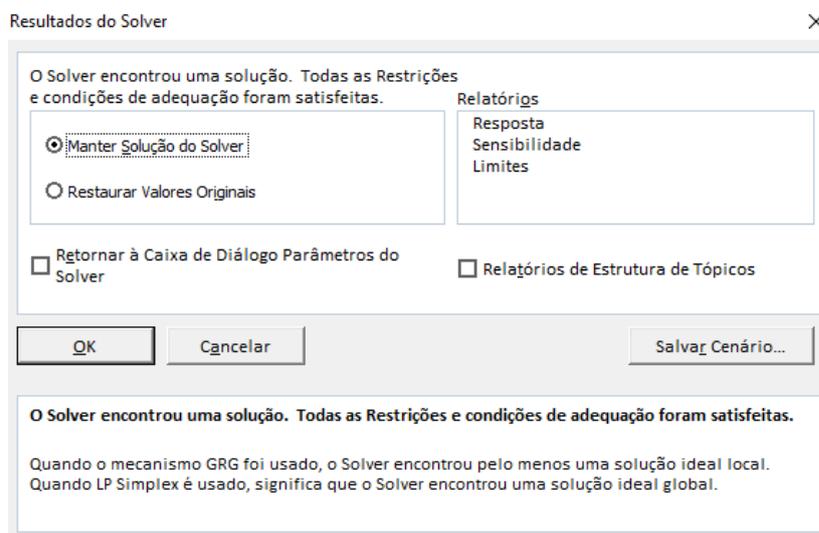
Método de Solução
 Seleccione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares.
 Seleccione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Seleccione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Ajuda Resolver Fechar

Fonte: Autoria Própria (2019)

As restrições apresentadas nas Figuras 8 e 9 foram todas descritas nos item 4.1 e 4.2 deste trabalho. Após estabelecido os parâmetros do Solver procedeu-se a simulação matemática até obter uma resposta que atendesse todas as restrições. Na Figura 10, é apresentado a mensagem que o Solver exibiu após ter encontrado uma solução ótima.

Figura 10 - Resultado obtido quando todas as restrições eram satisfeitas



Fonte: Autoria Própria

Nas Figuras de 11, 12 e 13 são apresentados os resultados obtidos por meio do método Simplex, para a formulação da dosagem para produção das amostras ACSS, BCSS, ABCSS.

Figura 11 - Formulação do cimento para a amostra ABCSS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2		Óxidos	Escória	CaSO ₄	Cao	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Resposta	Mínimo	Ideal	Máximo	
3		CaO	31,60%	41,20%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	41,23%	40,44%	42,57%	44,70%	
4		SiO ₂	40,50%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	29,45%	27,60%	29,05%	30,51%	
5		Al ₂ O ₃	14,30%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	11,59%	11,59%	12,20%	12,81%	
6		SO ₃	0,10%	58,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	5,88%	5,32%	5,60%	5,88%	
7		Fe ₂ O ₃	1,80%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	3,47%	3,47%	3,65%	3,84%	
8		MgO	7,50%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	5,25%	5,10%	5,37%	5,63%	
9		Na ₂ O	0,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,14%	0,14%	0,15%	0,16%	
10		K ₂ O	0,90%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,76%	0,68%	0,72%	0,76%	
11																
12																
13		Variáveis	X ₁	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀					
14			Escória	CaSO ₄	Cao	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O		F=	1,000		
15		Cál (%)	70,00%	9,98%	15,00%	1,10%	1,58%	2,21%	0,00%	0,00%	0,13%					
16																
17		Restrições	70%	20%	1%											
18																
19																
20			X ₁	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	Total				
21		Variáveis	Escória	CaSO ₄	Cao	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O					
22		Massa (g)	210,00	29,95	45,00	3,30	4,73	6,63	0,00	0,01	0,38					
23			Massa total da pasta									300				
24																

Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 12 - Formulação do cimento para a amostra BCSS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1																
2		Óxidos	Escória	CaSO ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Resposta	Mínimo	Ideal	Máximo	
3		CaO	47,5%	41,2%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	43,6%	40,4%	42,6%	44,7%	
4		SiO ₂	34,7%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	27,6%	27,6%	29,1%	30,5%	
5		Al ₂ O ₃	8,9%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	11,6%	11,6%	12,2%	12,8%	
6		SO ₃	1,6%	58,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,9%	5,3%	5,6%	5,9%	
7		Fe ₂ O ₃	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,5%	3,5%	3,7%	3,8%	
8		MgO	4,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	5,6%	5,1%	5,4%	5,6%	
9		Na ₂ O	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,2%	0,1%	0,2%	0,2%	
10		K ₂ O	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,7%	0,7%	0,7%	0,8%	
11																
12																
13			X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀					
14		Variáveis	Escória	CaSO ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O		F=	100%		
15		Cál (%)	70,00%	8,18%	6,98%	3,31%	5,36%	3,05%	2,62%	0,09%	0,40%					
16																
17		Restrições	70,00%	20,00%	1,00%	15,00%										
18																
19																
20			X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	Total				
21		Variáveis	Escória	CaSO ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O					
22		Massa (g)	210,00	24,54	20,95	9,94	16,07	9,15	7,87	0,26	1,21	300				
23			Massa total da pasta (g)										300			
24																

Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 13 - Formulação do cimento produzido para a amostra ABCSS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																	
2		Óxidos	Escória (Ác)	Escória (Bá)	CaSO ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Resposta	Mínimo	Ideal	Máximo	
3		CaO	31,60%	47,70%	41,20%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	40,44%	40,44%	42,57%	44,70%	
4		SiO ₂	40,50%	34,70%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	30,38%	27,60%	29,05%	30,51%	
5		Al ₂ O ₃	14,30%	8,90%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	11,59%	11,59%	12,20%	12,81%	
6		SO ₃	0,10%	1,60%	58,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	5,88%	5,32%	5,60%	5,88%	
7		Fe ₂ O ₃	1,80%	0,60%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	3,47%	3,47%	3,65%	3,84%	
8		MgO	7,50%	4,30%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	5,63%	5,10%	5,37%	5,63%	
9		Na ₂ O	0,20%	0,10%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,16%	0,14%	0,15%	0,16%	
10		K ₂ O	0,90%	0,40%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,76%	0,68%	0,72%	0,76%	
11																	
12																	
13			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀					
14		Variáveis	Escória (ác)	Escória (Bá)	CaSO ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O		F=	100%		
15		Cál (%)	20,00%	60,00%	8,42%	2,03%	1,46%	3,39%	2,75%	1,55%	0,06%	0,34%					
16																	
17		Restrições	20,00%	60,00%	20,00%	1,00%	15,00%										
18																	
19																	
20			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	Total (g)				
21		Variáveis	Escória (Bá)	Escória (Ác)	CaSO ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O					
22		Massa (g)	60,00	180,00	25,26	6,09	4,39	10,16	8,25	4,66	0,17	1,01	300,00				
23			Massa total da pasta (g)										300,00				
24																	

Fonte: Autoria Própria (2019)

Ao analisar as respostas obtidas e apresentadas nas Figuras 11, 12 e 13 é possível verificar que o Solver do Excel encontrou uma solução ótima para cada uma das simulações feitas. Uma vez que todas as restrições e condições de adequação foram satisfeitas

Na Tabela 7 é apresentado a dosagem de cada óxido em percentual que deve ser utilizado para produzir as amostras ACSS, BCSS, ABCSS.

Tabela 7 - Dosagem de cada componente (%)

Amostra	A*	B*	CaSO ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
ACSS	70,00	-	9,98	15,00	1,10	1,58	2,21	0,00	0,00	0,13
BCSS	-	70,0	8,18	6,98	3,31	5,36	3,05	2,62	0,09	0,40
ABCSS	20,0	60,0	8,42	2,03	1,46	3,39	2,75	1,55	0,06	0,34

A* é a escória ácida, B* é a escória básica

Fonte: Autoria Própria (2019)

Na Tabela 8 é apresentado a massa em grama que deve ser utilizado pra produzir as amostras ACSS, BCSS, ABCSS na forma de pasta cimentícia tendo uma massa total de 300 g.

Tabela 8 - Dosagem de cada componente em grama

Amostra	A*	B*	CaSO ₄	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
ACSS	210,0	-	29,95	45,00	3,30	4,73	6,63	0,00	0,01	0,38
BCSS	-	210,0	24,24	20,95	9,94	16,07	9,15	7,87	0,26	1,21
ABCSS	60,00	180,0	25,26	6,09	4,39	10,16	8,25	4,66	0,17	1,01

A* é a escória ácida, B* é a escória básica

Fonte: Autoria Própria (2019)

Com a aplicação do método proposto foi possível simular a formulação de três amostras partindo de matérias primas diferentes (Escória ácida, básica e uma mistura de escória) possibilitando a formação cimentos supersulfatado com composição química muito próxima uma da outra. Na Tabela 9 é apresentado a composição química para cada uma das amostras simuladas.

Tabela 9 - Composição química das amostras simuladas

Óxidos	ACSS (%)	BCSS (%)	ABCSS (%)	Mínimo (%)	Valor ideal (%)	Máximo (%)
CaO	41,23	43,6	40,44	40,44	42,57	44,70
SiO ₂	29,45	27,6	30,38	27,60	29,05	30,51
Al ₂ O ₃	11,59	11,6	11,59	11,59	12,04	12,81
SO ₃	5,88	5,90	5,88	5,32	5,60	5,88
Fe ₂ O ₃	3,47	3,50	3,47	3,47	3,65	3,84
MgO	5,25	5,60	5,63	5,10	5,37	5,63
Na ₂ O	0,14	0,20	0,16	0,14	0,15	0,16
K ₂ O	0,76	0,70	0,76	0,68	0,72	0,76

Fonte: Autoria Própria (2019)

Com base nos valores apresentados na Tabela 8 é possível produzir pastas cimentícias e verificar por meio de análises químicas e físicas como Difractometria de Raios X (DRX), Análise termogravimétrica (TGA), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM), Ensaio de Resistência à Compressão, entre outras análises que poderão certificar que as pastas cimentícias produzidas por meio do método proposto pode produzir cimentos com características químicas e físicas muito semelhantes e desta forma possibilitando um avanço no estudo da utilização da escória como componente principal nos cimento supersulfatado.

6 CONCLUSÃO

Com base no presente estudo é possível aplicar a Programação Linear para determinar a dosagem dos componentes do cimento supersulfatado possibilitando produzir pastas cimentícias com composição química semelhante mesmo partindo de matérias primas com composição química bem distintas.

A certificação desta metodologia por meios de técnicas analíticas (DRX, MEV, TEM, TGA, entre outras) permitirá aplicar a Programação Linear na dosagem dos óxidos que compõe o cimento supersulfatado eliminando a necessidade de estudos do tipo tentativa e erro para definir o melhor traço para produzir um cimento com boa qualidade cimentícia, uma vez que, o método possibilita obter diferentes amostras com posição química semelhante, sendo que, a composição química do cimento tem papel fundamental na qualidade final do cimento.

Por meio do método proposto foi possível simular três amostras partido de escórias com composição química diferente, no entanto, o método não se limita a isso, é possível adicionar as escórias, resíduos indústrias ou até mesmo o Cimento Portland e conseguir pastas cimentícias com composição química e propriedades físicas semelhantes.

Por fim, o método contribui também para difundir o estudo do uso de resíduos industriais na produção do cimento, que tem como objetivo diminuir os impactos ambientais gerados no exercício dessa atividade industrial que é de extrema importância para o mundo moderno.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, P. C. R. A. **O Uso De Pozolanas Como Materiais Cimentícios Suplementares: Disponibilidade, Reatividade, Demanda De Água E Indicadores Ambientais**. São Paulo, p. 131, 2018.

AÏTCIN, P.-C. **High-Performance Concrete E & FN SPON**. New York: 2004.

Associação Brasileira de Cimento Portland: Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/perguntas-frequentes/quais-sao-os-tipos-de-cimento-portland/>> Acessado em: 12 de junho de 2019.

ANGULSKI DA LUZ, C.; HOOTON, R. D. **Influence of Supersulfated Cement Composition on Hydration Process**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 31, n. 6, p. 4019090, 2019.

BAIO, F. H. R. et al. **Modelo De Programação Linear Para Seleção De Pulverizadores Agrícolas De Barras**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal - SP, v. 24, n. 2, p. 355–363, 2004.

BARROSO, T. R. **Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características Físico-Químicas Thais**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro Campos dos Goytacazes – RJ, p. 1–38, 2011.

BELFIORE, PATRÍCIA, L. P. F. **Para Cursos De Engenharia**. Elsevier Editora Ltda, Rio de Janeiro, v. 1, p. 545, 2013.

CNI, C. N. D. I. **Indústria Brasileira De Cimento**. Brasília, p. 58 p., 2012.

EUROPEAN COMMISSION. **Production of Cement , Lime and Magnesium Oxide**. European Commission. p. 35–45, 2013.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória E Programação Linear: Modelos E Algoritmos**. Rio de Janeiro, 2005.

GOMES, M. de M. et al. **Análise da Produção de Cimento Portland Analysis of Portland Cement Production**. v. 1, p. 1–12, 2017.

GONZAGA, L. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-processamento de Misturas de Resíduos**. Itajubá, p. 158, 2009.

HOLANDA, F. do C. **Influência do fósforo proveniente do fosfogesso na hidratação inicial do cimento Portland em presença de aditivos superplastificantes**. São Paulo, p. 144, 2015.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem De Escória De Alto Forno No Brasil**. John & Agopyan, São Paulo, n. 1, p. 1–5, 2002.

JUENGER, M. C. G. et al. **Advances In Alternative Cementitious Binders**. Cement and Concrete Research, v. 41, n. 12, p. 1232–1243, 2011.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional Na Tomada De Decisões**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall do Brasil, 2009.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: **The Comparison Between Alkali-Activated Slag (Si + Ca) And Metakaolin (Si + Al) Cements**. Cement and Concrete Research, v. 40, n. 9, p. 1341–1349, 2010.

MACHADO FERREIRA, L. **Modelo De Programação Para Otimizar O Consumo De Matérias Primas Em Altos-Fornos**. 2016.

MARINS, F. A. S. **Introdução À Pesquisa Operacional**. Cultura Acadêmica : Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação. São Paulo, 2011.

MELLER, J. G. **Obtenção De Clínquer De Baixa Energia a Partir De Resíduos Da Indústria De Papel E Celulose**. Florianópolis, 2017.

MORAES, K. A. de M. **Otimização Do Uso De Adições Mineraias Para A Produção De Concreto Auto-Adensável**. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2010.

MOREIRA, C. E **Desempenho Das Escórias De Alto Forno Como Agregado Para Utilização Em Camadas Granulares De Pavimentos**. 37^a Reunião Anual de Pavimentação/11^o Encontro, Goiânia, 2006.

PAL, S. C.; MUKHERJEE, A.; PATHAK, S. R. **Investigation Of Hydraulic Activity Of Ground Granulated Blast Furnace Slag In Concrete**. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 9, p. 1481–1486, 2003.

RODRIGUES, L. H. et al. **Pesquisa Operacional : Programação Linear Passo A Passo : Do Entendimento Do Problema À Interpretação Da Solução**. São Leopoldo, 2014.

RUBERT, S. **Contribuição Ao Estudo De Cimentos Supersulfatados: Formulação E Mecanismos De Hidratação**. UTFPR - Programa de Pós-graduação em tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Pato Branco, v. Mestrado, 2015.

SOUTO MAIOR, C. D. **Pesquisa Operacional**. Santa Catarina, 2014.

USIMINAS Disponível em: < <https://www.usiminas.com/blog/usiminas-retoma-producao-do-alto-forno-1-em-ipatinga/> > Acessado em: 12 de junho de 2019.

VARELA, M. **Comportamento Do Cimento Supersulfatado Ao Ataque Por Sulfatos**. Pato Branco, p. 114, 2016.

WITZKE, F. B. **Propriedades De Concretos Estruturais Contendo Cinza Volante Em Substituição Parcial Ao Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado em

Engenharia Civil. UDESC. Joinville, 2018.

ZHANG, H. et al. **A Review Of Waste Heat Recovery Technologies Towards Molten Slag In Steel Industry**. Applied Energy, v. 112, p. 956–966, 2013.