UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de São José do Rio Preto

Marcelo Scobosa

O problema da mistura em uma indústria de concreto

São José do Rio Preto
2020

Marcelo Scobosa

O problema da mistura em uma indústria de concreto

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Matemática, junto ao Programa de Pós-Graduação em Matemática, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Alexandre de Araujo

Financiadora: CNPQ

São José do Rio Preto
2020

S421p

Scobosa, Marcelo

O problema da mistura em uma indústria de concreto / Marcelo Scobosa. -- São José do Rio Preto, 2020

75 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: Silvio Alexandre Araujo

1. Indústria de concreto. 2. Otimização linear. 3. Problema da mistura. 4. Modelagem matemática. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Marcelo Scobosa

O problema da mistura em uma indústria de concreto

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Matemática, junto ao Programa de Pós-Graduação em Matemática, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CNPQ

Comissão Examinadora

_____
Prof. Dr. Silvio Alexandre de Araujo
Orientador

_____
Prof. Dra. Eli Angela Vitor Toso
Engenharia de Produção - UFSCAR

_____
Prof. Dr. Geraldo Nunes Silva
Matemática Aplicada - UNESP

São José do Rio Preto
26 de junho de 2020

Dedico esta dissertação à minha esposa Kivia, pelo apoio incondicional.
Dedico também ao meu orientador Prof. Dr. Silvio Alexandre de Araujo, pela confiança, paciência, incentivo, amizade e excelente orientação.
Sem o apoio de ambos, este trabalho não teria sido realizado.
Esta dissertação é dedicada também a meus pais, José Scobosa (que com certeza festeja lá de cima) e Maria Scobosa e todos os familiares que torcem por mim, dentre eles meu irmão Gilberto.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Kivia por estar sempre ao meu lado e torcer para que meus objetivos tenham êxitos, principalmente pelo ingresso no Mestrado e sucesso deste projeto.

Ao professor Silvio Alexandre de Araujo, pela orientação totalmente eficiente, segura e objetiva, além de suas valiosas sugestões.

À UNESP - IBILCE pelo apoio sempre concedido.

Ao CNPQ pelo auxílio financeiro, colaborando desde o início para que este projeto se concretizasse.

Aos amigos do Mestrado, que sempre se colocaram à disposição para todo e qualquer auxílio.

Ao Samy, engenheiro responsável pela empresa foco desta dissertação, que sempre se mostrou bastante solícito, sempre atendendo rapidamente minhas solicitações referentes a dados, testes, informações para o encaminhamento do projeto.

Aos meus pais que me trouxeram ao mundo.

À Deus, por todo conhecimento provido em cada etapa deste projeto.

RESUMO

Diante da importância do ramo de construção civil, existem no Brasil muitas indústrias responsáveis pelo fornecimento do concreto para grandes obras, com sua dosagem sendo realizada nos conhecidos centros de dosagens. Ainda hoje, mesmo com muita tecnologia ao alcance industrial, as empresas em boa parte usam de métodos empíricos e baseados na experiência dos funcionários para se chegar a um composto final aceitável. A proposta deste trabalho visa obter um modelo matemático de otimização linear que minimize os custos com ingredientes, sob o âmbito do clássico problema da mistura em um viés multi produto, de maneira a satisfazer toda especificação técnica e parâmetros envolvidos com a tecnologia e engenharia do concreto. Neste estudo foram realizadas duas abordagens da mistura, sendo uma sem a utilização de aditivos, com o concreto sendo formado apenas pelos seus ingredientes usuais (cimento, água, agregado fino e agregado grosso) e outra com a incorporação do aditivo plastificante polifuncional retardador de pega. Um estudo comparativo foi realizado mostrando-se a importância do uso deste componente. Na abordagem do problema da mistura com aditivo, pelo motivo de sua influência ser totalmente específica, alterando as características da reação química existente, não existe uma equação universal e genérica de maneira a relacionar quantitativamente a influência do aditivo e compostos com parâmetros a serem atendidos. Para contornar esta questão foi necessário obter várias misturas aleatórias no centro de dosagem e avaliar como a quantidade de cada componente influencia nos parâmetros mais relevantes, especialmente o abatimento. Uma análise estatística foi realizada para se obter uma equação linear completa, a qual foi introduzida ao modelo. Vários testes de validação do modelo foram realizados, como medições laboratoriais e a formação de um gráfico de dosagem, através das soluções encontradas pelo modelo, totalmente coerente com as clássicas leis da tecnologia de concreto. Ademais, testes de viabilidade econômica foram realizados comparando-se as soluções encontradas com as utilizadas pela indústria, de

maneira empírica, durante um período de três meses.

Palavras-chave: Indústria de Concreto, Otimização Linear, Problema da Mistura, Modelagem Matemática.

ABSTRACT

Given the importance of civil construction industry, there are many industries in Brazil responsible for supplying concrete for major works, with its dosage being fulfilled in the well-known dosage centers. Even with the possibility of an easy technological access nowadays, concrete companies use empirical methods based on the experience of employees to reach an acceptable final blending. The purpose of this work is to obtain a linear optimization mathematical model that minimizes the costs with ingredients, under the multi product scope of the classic blending problem, in order to satisfy all technical specifications and parameters involved with concrete technology and engineering. In this study, two approaches to the blending problem were carried out, one without the use of additives, with the concrete being formed only by its usual ingredients (cement, water, fine aggregate and coarse aggregate) and the other with the incorporation of an additive retardant plasticizer polyfunctional. A comparative study was accomplished showing the importance of using this component. In the approach of the blending problem with additive, as its influence is totally specific, changing the characteristics of the existing chemical reaction, there is no a universal and generic equation in order to quantitatively relate the influence of the additive with parameters to be met. To get around this issue, it was necessary to obtain several random mixtures at the dosage center and assess how the quantity of each component influences the most relevant parameters, especially the slump. A statistical analysis was performed to obtain a complete linear equation, which was introduced to the model. Several tests of validation of the model were carried out, such as laboratory measurements and the formation of a dosage graph, through the solutions found by the model, totally coherent with the concrete technology classic laws. In addition, economic feasibility tests were carried out by comparing the solutions found with those used by the industry, in an empirical way, during a three month period.

Keywords: Concrete Industry, Linear Optimization, Blending Problem, Mathematical Modelling.

Lista de Figuras

1.1 Produção de cimento no Brasil (década de 60 a 2018) - Fonte: SNIC . . 23
1.2 Índice de intenção de investimento no setor de construção civil - Fonte: CNI 23

2.1 Abatimento do tronco de cone - Fonte: Mehta & Medeiro 29
2.2 *Slump Test* - Fonte: Concreto na construção civil: controle de qualidade, 2018 30
2.3 valores de *slumps* em diferentes cenários - Fonte: RIPPER, 1995 31
2.4 Curva de Abrams - Fonte: Próprio autor 32
2.5 Curva de Abrams para tipos de cimento distintos - Fonte: Clube do Concreto 33
2.6 Diagrama de dosagem - Fonte: Helene & Terzian 36

4.1 Baias de agregados - Fonte: Processo produtivo em uma indústria de artefatos de concreto 46
4.2 Silo de cimento - Fonte: Processo produtivo em uma indústria de artefatos de concreto 47
4.3 Reservatório de água - Fonte: Processo produtivo em uma indústria de artefatos de concreto 47
4.4 Painel de comando - Fonte: Próprio autor 48
4.5 Visão geral do processo produtivo - Fonte: Próprio autor 49

5.1 Regressão linear da Curva de Abrams - cimento CPV 40 - Fonte: Próprio autor 52

6.1 a/c x m - Fonte: Próprio autor 67
6.2 m x Consumo_Cimento - Fonte: Próprio autor 67

Lista de Tabelas

5.1 Amostragem mix concreto 56
5.2 Análise de Regressão 57

6.1 Ingredientes: Custos e Características 59
6.2 Especificações Técnicas 60
6.3 Demanda Volumétrica 60
6.4 Resposta do modelo sem aditivo 61
6.5 Especificações resultantes 61
6.6 Custos de fabricação 61
6.7 Resposta do modelo com aditivo 62
6.8 Especificações resultantes(2) 62
6.9 Custos de fabricação(2) 62
6.10 Parâmetro previsto pelo modelo x Parâmetro real 63
6.11 Resultados mix pelos programas HS, NN, GA e Modelo Proposto . . . 64
6.12 Resultados módulo CAD 64
6.13 Resultados Modelo Proposto 65
6.14 Soluções modelo linear: a/c x m 66
6.15 Soluções modelo linear: m x Consumo 66
6.16 Volume vendido em novembro 68
6.17 Volume vendido em outubro 68
6.18 Volume vendido em setembro 68
6.19 Custos por traços de concreto 68
6.20 Custos por traços de concreto CPLEX 69

Sumário

1 Introdução **21**
1.1 Justificativas . . . 23
1.2 Objetivo . . . 24
1.3 Estrutura do Trabalho . . . 25

2 Conceitos e Características do Concreto **27**
2.1 Concreto . . . 27
2.2 Estado Fresco . . . 28
2.3 Estado Endurecido . . . 31
2.4 Métodos de Dosagem . . . 33
2.4.1 Método IPT/EPUSP . . . 34
2.5 Aditivos . . . 36

3 Revisão Bibliográfica **39**

4 O Processo Produtivo **45**
4.1 A Empresa . . . 45
4.2 Unidade de Insumos . . . 45
4.2.1 Baias de Agregados . . . 46
4.2.2 Silo de Cimento . . . 46
4.2.3 Reservatório de Água . . . 47
4.3 Unidade de Produção . . . 48

5 Modelagem Matemática **51**
5.1 Equações Paramétricas . . . 51
5.2 Formulação Matemática sem Aditivo . . . 53
5.3 A Influência dos Aditivos . . . 54
5.3.1 Dados Experimentais . . . 55
5.3.2 Formulação Matemática com Aditivo . . . 57

6 Resultados Computacionais **59**
6.1 Abordagem sem Aditivos . . . 59
6.2 Abordagem Aditivada . . . 61
6.3 Análise de Resultados . . . 62
6.3.1 Comparação com Abordagens da Literatura . . . 63
6.3.2 Verificação das Leis Universais da Engenharia de Concreto . . . 65
6.3.3 Análise Financeira . . . 67

7 Conclusões e Propostas Futuras **71**

1 Introdução

O setor de construção civil encontra-se em constante evolução devido ao crescimento socioeconômico do país, sendo o concreto o principal insumo compatível com este segmento devido a suas propriedades tanto no estado fresco, em que se verifica um composto com alto índice de plasticidade, possibilitando facilmente sua modelagem conforme a forma desejada, quanto em seu estado endurecido, em que possui alta resistência à compressão, propriedade extremamente relevante para se atender a segurança da obra contratada.

Historicamente, há uma unanimidade entre pesquisadores que os romanos foram os primeiros a usar o concreto em larga escala, quando descobriram que misturando-se a cinza vulcânica com cal hidratada obtinham uma pasta que endurecia sob a água. Com o composto final, chegaram à construção do Coliseu e do Panteão. O concreto segue em crescente evolução desde os tempos de Roma, com a engenharia aliada à tecnologia buscando cada vez mais encontrar formulações para que os produtos tenham maior durabilidade, confiabilidade, eficiência e menor custo envolvido.

O concreto de cimento do tipo Portland é o material de construção civil mais utilizado em obras e também o mais consumido em escala mundial [1]. O concreto propriamente dito é uma mistura homogênea obtida entre um aglomerante (cimento Portland), agregados miúdos (areia fina, areia média), agregados graúdos (brita, pedrisco) e água [2], além da presença de aditivos químicos utilizados em pequena escala visando redução de custo e melhoria em várias de suas propriedades, tanto em seu estado fresco quanto endurecido [3] e são cada vez mais empregados nas indústrias de concreto.

A dosagem destes componentes em proporções adequadas é o principal objetivo de qualquer centro de dosagem, culminando em uma mistura (concreto) compatível com as especificações técnicas exigidas em projeto. Diante do cenário de competitividade industrial cada vez mais exacerbado, entregar um composto simplesmente aceitável pode fazer a empresa cada vez mais perder clientes e se extinguir do mercado; portanto a busca incessante por um produto final em seu estado de otimalidade, ou seja, que atenda todos os critérios exigidos de qualidade e segurança com o menor custo possível, deve ser sempre tratada como prioridade.

O maior responsável para que a mistura tenha o comportamento citado é o cimento, pois somente ele possui a capacidade de aumentar a viscosidade do concreto, o que propicia uma melhor interação entre os agregados durante o processo, reduzindo os espaços vazios e, consequentemente, formando uma mistura homogênea com a resis-

tência suficiente e necessária para segurança do projeto.

Diante do exposto, o consumo de concreto vem aumentando em escala global, já que sua utilização se dá na construção dos principais segmentos de infraestrutura, como portos, aeroportos, usinas, edifícios (apartamentos, shopping centers), pavimentação (ciclovias, calçadas, praças, parques), dentre outros. No Brasil, o concreto produzido e transportado por centrais dosadoras para as obras envolvidas gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos anuais, valor inferior apenas ao consumo de água [4]. De acordo com o SNIC (2019), 52,7 milhões de toneladas de cimento foram vendidas no país em 2018, mas foi em 2014 que seu consumo atingiu o ápice no Brasil, atingindo a marca de quase 72 milhões de toneladas. Esta diferença significativa é facilmente justificada pela crise econômica sofrida pelo país a partir de 2016. A Figura 1.1 ilustra o consumo de cimento desde meados da década de 60.

De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), o setor de construção civil tem perspectiva de crescimento de 3% para o ano de 2020, o que pode gerar 150 mil novos empregos e também houve um aumento na intenção de investimentos no setor pelos empresários de construção segundo estudo realizado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI), mostrando que os investidores acreditam no crescimento do setor em 2020, conforme Figura 1.2. O índice de intenção de investimento chegou a 42.2 pontos em dezembro de 2019, sendo o maior desde 2014. Observa-se que tais perspectivas foram tratadas antes da pandemia ocasionada pelo COVID-19 e que vem assolando o mundo nas últimas semanas. Possivelmente, devido às consequências econômicas, essas perspectivas terão que ser revistas.

Diante dos números bastante relevantes e expressivos do setor de construção civil e sua importância macroeconômica para o país, o uso do concreto deve também ser analisado com certo cuidado no quesito impacto ambiental devido a alta presença de cimento, componente da mistura de maior impacto ambiental em virtude da emissão de dióxido de carbono e elevado consumo energético para o trabalho exigido em seu processo de fabricação [5].

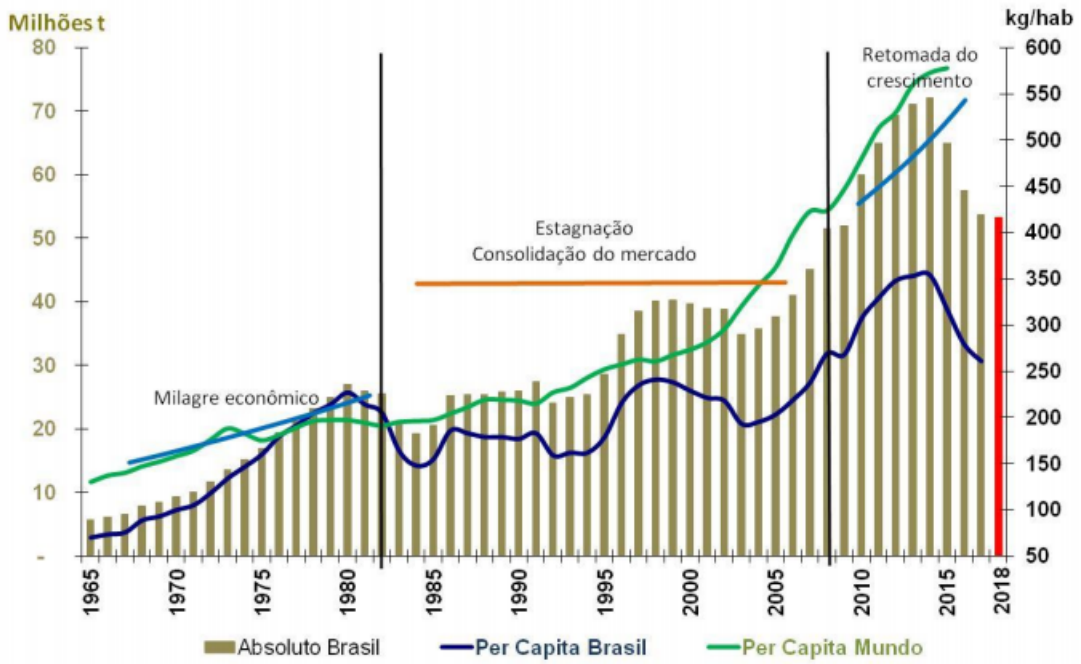

Figura 1.1: Produção de cimento no Brasil (década de 60 a 2018) - Fonte: SNIC

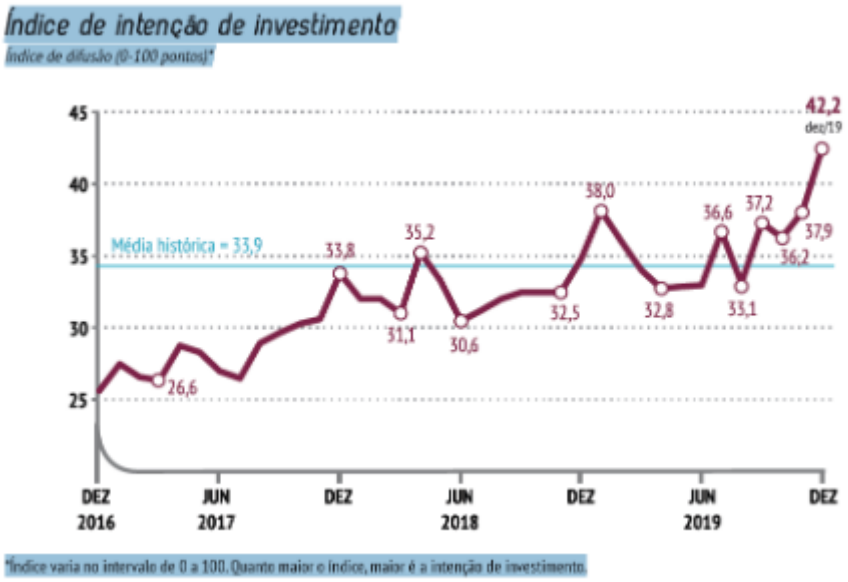

Figura 1.2: Índice de intenção de investimento no setor de construção civil - Fonte: CNI

1.1 Justificativas

Atualmente a empresa, objeto da pesquisa deste trabalho, não dispõe de uma ferramenta eficaz capaz de retornar a melhor dosagem possível, possuindo como suporte para o engenheiro, que se utiliza de sua experiência, o uso de ábacos que fornecem alguns intervalos pertinentes e relações admissíveis entre os componentes da matéria-prima. Neste cenário, via de regra, a mistura obtida tem que passar por etapas de

redosagem até se atingir características técnicas e visuais plenamente admissíveis, podendo o método ser classificado a princípio como tentativa e erro, sem nenhum viés de otimização a ser levado em consideração.

Como motivação inicial para este trabalho tem-se o uso e a aplicação de ferramentas de modelagem em uma empresa do setor como forma de auxiliar as tomadas de decisões, gerando economia e prevendo, com certo grau de confiabilidade, os valores correntes dos principais parâmetros exigidos para cada tipo de produto final, principalmente com a utilização de aditivos, que alteram significativamente as propriedades originais do concreto. O uso de aditivos é de extrema relevância para a melhoria de determinadas propriedades químicas do concreto, permitindo sua ampla variedade de aplicação, com vantagens econômicas e ambientais, pois permitem a redução de água e consequentemente de cimento no concreto, e ainda assim, melhoram sua trabalhabilidade ou efeito *slump* [6]. Define-se *slump* como um parâmetro que mede a consistência do concreto visando conferir a trabalhabilidade necessária.

Neste trabalho, considera-se para a confecção das restrições o uso de intervalos encontrados por pesquisadores em estudos específicos sobre o comportamento do concreto e a influência de cada matéria-prima e suas relações no composto final. Dessa forma, o modelo é fundamentado para que se consiga atingir um resultado satisfatório de qualidade. Na literatura, existe uma relação que foi utilizada nesta dissertação e representa, matematicamente, o comportamento do *slump* de maneira generalizada (para o concreto não aditivado); no entanto, devido às variações de cada componente do concreto e ao complexo dimensionamento da reação química envolvida entre eles, é extremamente complicado se obter modelos com 100% de confiabilidade para tais características, pois variam conforme temperatura, umidade, tipos de cimento, granulometria dos agregados, etc. Ademais, por uma linearização da lei de Abrams (equação não linear que diz que a resistência à compressão do concreto é inversamente proporcional à sua relação água-cimento) foi extraído o comportamento da resistência para o tipo de cimento utilizado na indústria abordada.

1.2 Objetivo

Este trabalho visa, em parceria com uma empresa de fabricação de concreto alocada no interior do Estado de São Paulo, através do uso de um modelo matemático de programação linear, buscar a melhor composição da mistura com o menor custo possível, de maneira a satisfazer as especificações técnicas exigidas pelo cliente, em especial a resistência de projeto e o *slump* para vários tipos de produtos distintos, ou seja, em uma abordagem multi produto.

Serão realizados dois estudos, sem aditivo e com aditivo na mistura final. Para o segundo caso, devido à ausência de referências e equações coerentes que simplifiquem a relação entre a variável dependente *slump* e as variáveis independentes referentes à proporção entre os elementos constituintes do produto final, foram colhidas várias amostras com o objetivo de se chegar a uma regressão linear múltipla para o *slump* que possa atender, de maneira eficiente, o modelo com aditivo. Pelas clássicas leis de Abrams, Lyse e Molinari referentes à engenharia do concreto no quesito dosagem o

modelo resultante seria não linear.

1.3 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação está organizada em capítulos, conforme segue abaixo:

No Capítulo 1 é feito uma introdução ao tema, apresentando um quadro geral sobre o concreto visto sob o problema da mistura, além de uma abordagem geral do mesmo no Brasil sob o aspecto evolutivo e econômico. De maneira complementar, uma motivação para o trabalho e objetivos a serem alcançados foram incluídos.

No Capítulo 2 é apresentado uma avaliação teórica sobre o concreto incluindo suas principais propriedades nos estados fresco e endurecido, estudos de dosagens, apresentação das leis de Abrams, Lyse e Molinari e o uso de aditivos.

No Capítulo 3 é realizado uma revisão bibliográfica com enfoque no concreto, ou seja, apresentação de artigos sobre otimização e métodos utilizados para resolver o problema de mix de concreto.

No Capítulo 4 é descrito o processo produtivo da empresa foco deste trabalho, bem como, os materiais envolvidos.

No Capítulo 5 são apresentados os modelos matemáticos e todo processo até se chegar nas principais equações que regem o modelo comportamental do concreto. Detalhou-se o mix de concreto testado em centro de dosagem relacionando cada quantidade com a medida do *slump*, além de uma análise estatística de validação.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos e uma análise bem detalhada para cada tipo de abordagem (com e sem aditivo). Nesta etapa, o leitor será munido de dados reais e utilizados na empresa. Comparações com outros autores, adequação às leis clássicas e análise econômico financeira estão presentes.

No Capítulo 7 são feitas considerações finais, apontando as principais conclusões tiradas da dissertação.

2 Conceitos e Características do Concreto

Neste Capítulo tem-se as informações para o entendimento das principais características de projeto solicitadas na preparação de um determinado tipo de concreto, bem como as fases do mesmo onde as tais são reconhecidas e aplicadas. Também foi detalhado um método de dosagem bastante utilizado por unidades dosadoras. O objetivo é a familiarização com algumas grandezas e nomenclaturas utilizadas no escopo de obtenção de um traço final de concreto. Define-se traço como sendo a proporção quantitativa entre os componentes do concreto. Ele mostra a quantidade de água, areia, brita e aditivos para uma unidade de cimento. Também podem ser quantificados em massa para 1 metro cúbico de concreto.

2.1 Concreto

Para [7], as razões para o uso tão difundido do concreto estão relacionadas à facilidade de execução dos elementos estruturais deste composto, sua fácil disponibilidade nos canteiros de obras e seu custo relativamente baixo comparado com outros materiais, tornando-se o material mais importante da construção civil. O aglomerante (cimento) em presença da água forma uma pasta que se liga aos agregados, formando uma mistura de fácil trabalhabilidade e elevada resistência mecânica [8].

Segundo [9] os requisitos básicos a serem atendidos pela mistura, de maneira que o produto esteja apto e viável para ser utilizado em toda e qualquer obra, são descritas a seguir.

A **resistência mecânica** é o parâmetro mais comumente especificado e seu valor é sempre definido em Mega Pascal (MPa).

Todos os concretos requerem uma certa **trabalhabilidade**, medida pelo teste de abatimento ou mais comumentemente encontrado como *Slump Test*, devendo ser adequada para toda e qualquer situação onde este concreto será utilizado. Várias condições de projeto devem ser avaliadas para se chegar à conclusão de qual a melhor trabalhabilidade do concreto, sendo elas: formas e detalhes geométricos dos projetos arquitetônicos e estruturais, equipamentos a serem utilizados (bombas, carrinhos, caçambas, submerso ou auto adensável), necessidades de acabamento (polido, aparente, lixado, desempenado ou sarrafeado) e por último, as condições ambientais que tanto interferem na mistura final (temperatura, umidade ou insolação). Seu valor é medido

em unidade de comprimento (cm ou mm). De maneira resumida, a trabalhabilidade depende fundamentalmente da consistência, sendo esta uma propriedade inerente ao concreto, mas também de características particulares de cada obra.

Todos os concretos devem apresentar a característica de **durabilidade**, frente a todas as intempéries e solicitações de esforços aos quais serão expostos durante sua vida útil. Esta característica é considerada muito complexa por ser uma variável que depende de inúmeras outras e ainda não se obteve êxito à criação de um método normativo consensual para ser medida como as duas anteriores.

A **deformabilidade** é um parâmetro que com o passar dos anos vem sendo cada vez mais solicitado pelos projetistas, a partir de dados como módulo de elasticidade, deformação inicial e fluência do concreto. Neste trabalho este tópico foi desprezado por falta de uma base de dados e pelo tempo necessário que esta avaliação demandaria.

O fator **sustentabilidade**, tão reiteradamente citado em fóruns e órgãos nacionais e internacionais, também vem tendo muita importância. No caso em questão, o cimento é a variável onde se busca sua redução por motivos de agressão ao meio ambiente e alto consumo de energia elétrica em seu processo.

As propriedades do concreto são separadas conforme a fase em que as reações químicas da mistura estão ocorrendo, podendo ser divididas em fase do concreto fresco e fase do concreto endurecido. Ademais, existem componentes definidos pela norma NBR 11768/97 como aditivos que "adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições."

2.2 Estado Fresco

A principal característica e parâmetro a ser levado em conta durante a fase do concreto em seu estado fresco é a trabalhabilidade. Para [10] o concreto é trabalhável à medida que pode ser adensado (processo de movimentação e compactação, com consequente redução das bolhas de ar) com certa facilidade, e de fácil lançamento com ausência de segregação. O mesmo autor ainda afirma que é de fundamental importância que a consistência do concreto em seu estado fresco seja adequada para que o mesmo possa seguir todos os processos até sua deposição, ou seja, transportado, lançado, adensado e acabado com facilidade.

Para [7], a trabalhabilidade é definida como a maior ou menor facilidade com que o concreto pode ser manuseado, quando é colocado na forma, não sendo uma característica inerente ao concreto, enquanto a consistência é a medida da umidade do concreto, sendo esta relacionada com a relação água/materiais secos, granulometria, aditivos e temperatura e a boa trabalhabilidade do concreto permite que se realize um eficiente lançamento, enchimento e compactação no interior das formas. Segundo [11], o concreto pode ser trabalhável num caso e não em outro e a natureza da obra será a responsável por indicar o grau de consistência mais conveniente.

A obtenção do grau de trabalhabilidade do concreto é realizada pela medida da consistência e o principal método para esta medida é o abatimento do tronco de cone, mais conhecido também como *Slump Test*, que deve ser realizado conforme a NBR NM 67:1998 e ilustrado nas Figuras 2.1 e 2.2. O *slump* é um teste rápido, prático e fácil de usar em qualquer unidade dosadora ou canteiro de obra e nada mais é do que a diferença da medida entre o topo do cone invertido e o topo do volume de mistura (passo 6 da Figura 2.1). Quanto maior o *slump*, maior a fluidez e a quantidade de água do concreto, o que pode ser desejado para se melhorar a plasticidade do mesmo. No entanto, maior quantidade de água implica em menor resistência e reside neste quesito um dos motivos de divergência entre os engenheiros responsáveis e os profissionais que irão realmente trabalhar com este concreto nas obras.

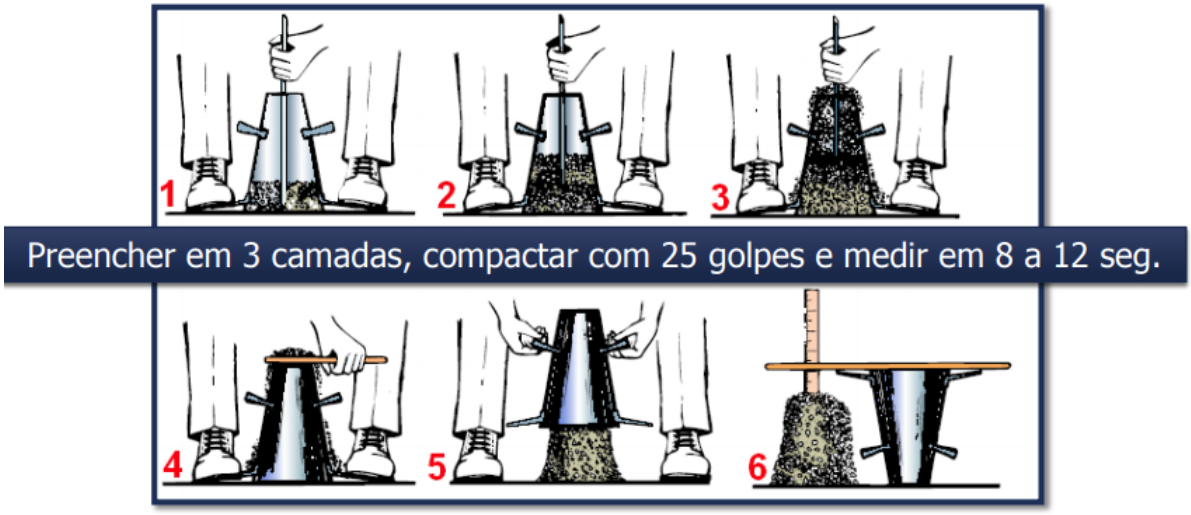

Figura 2.1: Abatimento do tronco de cone - Fonte: Mehta & Medeiro

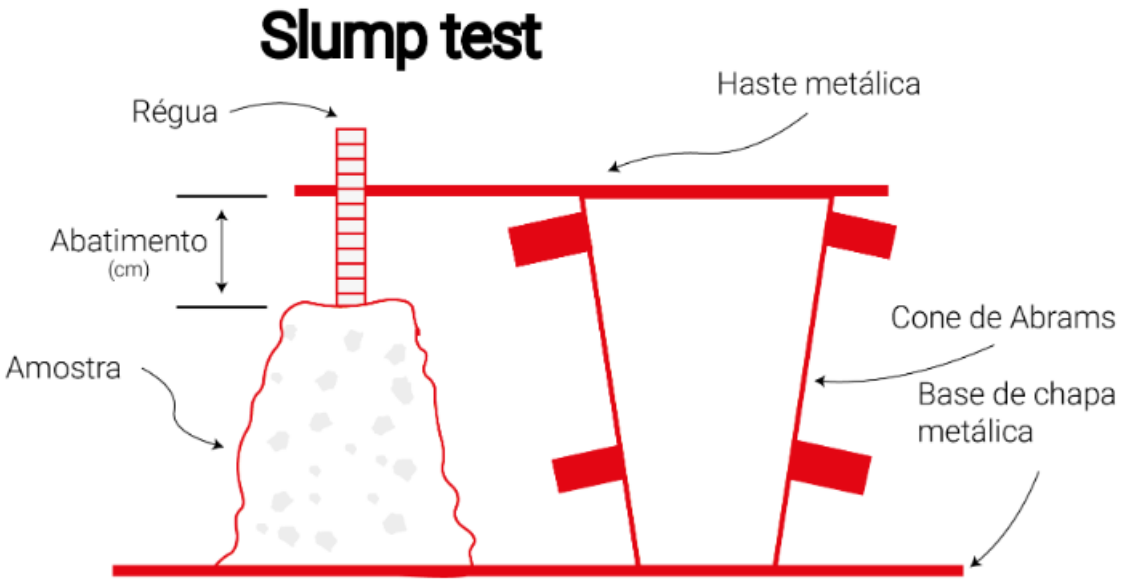

Figura 2.2: *Slump Test* - Fonte: Concreto na construção civil: controle de qualidade, 2018

A medida máxima e mínima do *slump* é definida pelo calculista ou engenheiro, em função das propriedades desejadas de trabalhabilidade, susceptíveis também às características da obra e métodos adotados de transporte e compactação da mistura. Um concreto com *slump* pré definido pode ser excelente e de fácil trabalhabilidade quando aplicado em um tipo de estrutura, como um piso, mas o mesmo pode ser desastroso quando aplicado em outro tipo de construção, como um pilar por exemplo. A consistência do concreto é a mesma em ambos os casos, mas a mudança de aplicação do material torna o mesmo impossível de se trabalhar, exemplificando a afirmação de Bauer. Daí a importância dos responsáveis pela obra em averiguar com bastante critério a faixa pretendida para o *slump*, tornando-se este o principal requisito para o estado fresco.

A tabela 2.3 ilustra uma faixa admissível do parâmetro *slump* para diferentes obras e serviços, exemplificando como a consistência do concreto deve ser alterada com a mudança da aplicação.

Tipo de construções		Consistência/ trabalhabilidade	Valores de abatimento em mm Min.	Máx.
Fundações e muros não armados		Firme	20	60
Fundações e muros armados		Firme até plástico	30	70
Estruturas comuns		Plástico	50	70
Peças esbeltas ou com excesso de armadura		Mole até plástico	70	90
Concreto aparente		Plástico até mole	60	80
	Até 40 m	Mole	80	100
Concreto bombeado	Mais de 40 m	Muito mole	90	130
Elementos pré-fabricados		Plástico até firme	30	80
Lastros-pisos		Firme até plástico	50	70
Pavimentação		Firme	20	50
Blocos maciços (concreto socado)		Muito firme	10	30

Figura 2.3: valores de *slumps* em diferentes cenários - Fonte: RIPPER, 1995

Campitelli [12] relacionou a consistência do concreto (*slump*) com a relação água-materiais secos, a dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo e sua massa específica e tal equação tem demonstrado sua eficiência para a obtenção de um traço inicial o mais próximo possível do traço final, tornando-se necessário alguns poucos ajustes em laboratório. O método de Campitelli, que se utiliza dos parâmetros citados para obtenção do *slump*, tem sido utilizado pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Ponta Grossa, com resultados adequados e será, por tal motivo, usado nesta dissertação como uma das equações de restrições ao modelo, estando de acordo com [10] que afirma que o principal parâmetro para se determinar a consistência do concreto fresco é a relação água-cimento, definindo o mesmo como a "resistência momentânea do concreto fresco à mudança de forma, ou a aptidão do mesmo em fluir".

2.3 Estado Endurecido

Além de satisfazer o requisito de trabalhabilidade, os métodos de dosagem devem satisfazer às exigências estruturais e de durabilidade definidas pelo projeto [13]. Para [14] as propriedades do concreto endurecido dependem fundamentalmente da relação água/cimento, das reações entre a pasta de cimento com a água e do processo de cura. A qualidade do concreto é influenciada pelas propriedades e características em seu estado endurecido, definidas comumentemente após 28 dias, e o principal parâmetro para se realizar esta avaliação é a resistência. Sua relevância para a obra é explícita pois esta grandeza é a responsável por garantir a segurança da estrutura e deve ser compatível com as exigências da ABNT NBR 6118.

Para [7] a propriedade mais valorizada pelos engenheiros em fabricação de concreto é a resistência à compressão, já que muitas de suas qualidades, como módulo de elasticidade, impermeabilidade e resistência às intempéries estão diretamente relacionadas e segundo os mesmos autores, o principal critério para se obter a resistência do concreto está relacionado à sua relação água-cimento. Trata-se de um dos parâmetros mais importantes do ponto de vista de sua durabilidade, pois é o que vai definir a micro estrutura da mistura final, sendo preponderante na característica de porosidade da pasta de cimento endurecida e compactação do produto em seu estado endurecido.

Quanto maior a relação água-cimento utilizada, maior o volume de água susceptível à evaporação, com consequente aumento do número de vazios na estrutura microscópica do concreto, aumentando assim a permeabilidade e reduzindo sua durabilidade [15].

O precursor do estudo de resistência no concreto e quem descobriu a importância da relação água/cimento foi Duff A. Abrams, a quase um século atrás. De maneira generalizada, a famosa lei de Abrams concluiu que a resistência do concreto (fc) varia com a relação água-cimento (a/c), conforme a Figura 2.4. A equação que rege tal comportamento é dada por:

$$fc = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$$

onde k_1 e k_2 são constantes que dependem das características particulares dos materiais envolvidos na mistura.

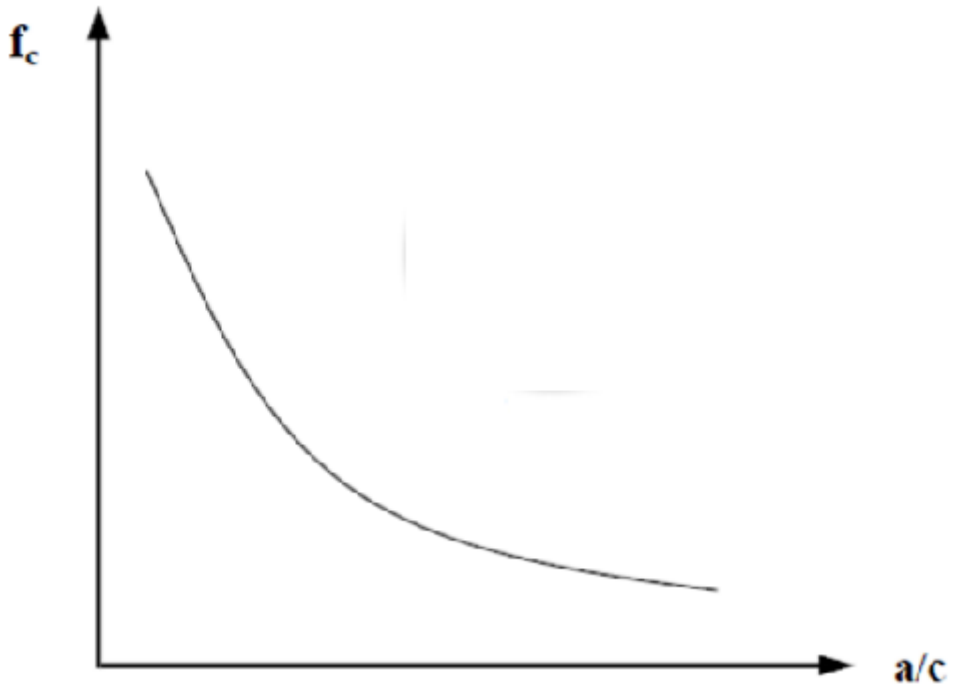

Figura 2.4: Curva de Abrams - Fonte: Próprio autor

Esta curva, dependendo do tipo de cimento utilizado, se desloca no gráfico para posições diferentes e para facilitar o dia-a-dia, adota-se os valores obtidos experimentalmente conforme a Figura 2.5.

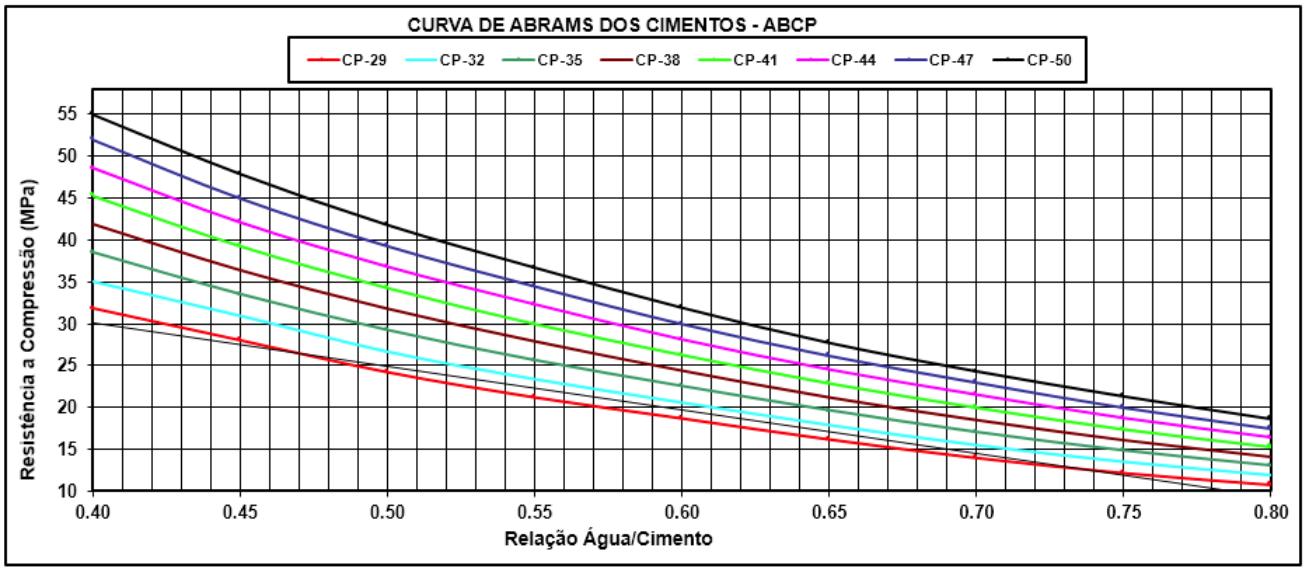

Figura 2.5: Curva de Abrams para tipos de cimento distintos - Fonte: Clube do Concreto

2.4 Métodos de Dosagem

A Revista de Engenharia e Tecnologia [16] mostrou uma comparação de dosagem, por meio teórico e prático, dos aspectos funcionais e operacionais entre três métodos distintos de dosagem, sendo eles: ABCP, O'Reilly e o IPT. Na ausência de aditivos, toda dosagem era elaborada de acordo com um método pré estabelecido. Cada método possui a sua peculiaridade, mas algumas etapas como determinação da resistência e sua relação com o fator água/cimento acabam sendo universais. A opção por um dos métodos depende de sua adequação a uma determinada situação. O método ABCP é considerado bastante ágil, sendo uma alternativa interessante quando não há tempo disponível para elaboração de ábacos ou estudos mais elaborados. O método O'Reilly é pouco utilizado hoje em dia pois é de difícil aplicação, além de não considerar a grande influência da granulometria e as características de cada cimento. O método IPT é o mais completo e detalhado quando há tempo hábil para um estudo mais elaborado dos componentes do concreto, além da criação de ábacos totalmente compatíveis com as leis universais que, permitem a dosagem partindo-se de parâmetros distintos. O trabalho concluiu que apesar de ser uma metodologia trabalhosa em relação às demais, o IPT é capaz de fornecer o melhor custo benefício para as misturas de concreto. Deve-se atentar que o método não faz relação com aditivos químicos e trata-se de uma abordagem totalmente prática, devendo ser realizado em ambiente laboratorial.

O método IPT se baseia na determinação de um traço inicial, obtido de informações obtidas por experiências anteriores, a partir do qual se faz um ajuste experimental das propriedades de interesse. Esta etapa de ajuste em laboratório é bastante simples, porém comporta variações de procedimento dependendo do agente laboratorial designado para esta atribuição. Campitelli [12] propôs um critério para se atingir o traço ajustado na fase de concreto fresco no menor tempo possível, com o mínimo consumo de materiais. A principal adaptação feita ao método IPT diz respeito ao ajuste de con-

sistência H (definida pela relação água-material seco) e de coesão α (definida pelo teor de argamassa). Define-se argamassa como sendo formada por água, cimento e areia e o teor de argamassa como sendo a proporção de massa seca com excessão à brita. Campitelli [12], através da elaboração de uma equação que relaciona o *slump* com H e o uso de uma simples tabela, reduziu de maneira relevante as operações de ajustes laboratoriais, obtendo-se um traço inicial bem próximo do traço final. A equação de Campitelli será utilizada na modelagem deste trabalho.

Devido a seu comportamento complexo, a dosagem de concreto é uma tarefa que sempre gera bastante divergência ao ser realizada por diversos profissionais da área. No Brasil não existe um texto normativo que rege este estudo e desta forma abre-se caminho para a existência de várias tratativas ou métodos de dosagem distintos desenvolvidos pelos próprios institutos nacionais ou ainda por adaptação de normas estrangeiras [17]. Um estudo de dosagem visa obter a melhor proporção possível entre todos os componentes do concreto final, de maneira a satisfazer as especificações de projeto no melhor custo possível. O mais conhecido método de dosagem de concreto no Brasil é o denominado IPT/EPUSP.

2.4.1 Método IPT/EPUSP

Como já informado, vários são os métodos de dosagem disponíveis na literatura mundial. No entanto, o método modificado através de pequenos ajustes da versão de 1963 do livro "Concreto de Cimento Portland", por pesquisadores do IPT e da EPUSP, é um dos métodos mais simples, versáteis e capaz de produzir uma resposta fidedigna aos requisitos exigidos de um concreto. Este método pode ser classificado como teórico-experimental, pois há uma parte prático laboratorial precedida por cálculos baseados em leis de regimento dos concretos. Este método considera como principal parâmetro do concreto a relação água/cimento buscando a melhor proporção entre os agregados com o objetivo de se conseguir uma mistura com a menor quantidade de água e, assim que os ingredientes e a relação água-cimento estão definidos, a resistência e a durabilidade do concreto passam a apresentar a característica de unicidade, mantendo-se a mesma trabalhabilidade (*slump*) da mistura [9].

Para o desenvolvimento do método, dois parâmetros são cruciais para a etapa de experimentação: teor de argamassa (α) e relação água-materiais secos (H), expressados respectivamente pelas equações:

$$\alpha = \frac{1 + a_m}{1 + m}$$

$$H = \frac{a/c}{1 + m}$$

Onde: a_m = relação agregado miúdo (areia)/cimento, em massa (Kg/Kg);
a_g = relação agregado graúdo (brita)/cimento, em massa (Kg/Kg);
$m = a_m + a_g$ = relação total agregados/cimentos, em massa (Kg/Kg);

De maneira resumida a fase experimental pode ser dividida em 4 etapas:

a) Utilizando-se dos ingredientes disponíveis na central dosadora produz-se um traço piloto 1:5 (cimento:total de agregados, em massa) e determina-se o teor de argamassa (α) ideal para a obtenção de um concreto que apresente a trabalhabilidade exigida. A estimativa inicial da quantidade de água nesta etapa é feita com base nos valores fornecidos por uma tabela que se utiliza da dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo como variável independente e H como variável dependente.

Conhecidos quantitativamente os conteúdos de agregados e água no traço piloto, inicia-se a primeira iteração para verificação do teor de argamassa adotado. Esta verificação é feita de forma visual através do quão áspero a superfície se encontra, além da presença de vazios e o poder de cobrimento da massa sobre o agregado graúdo (brita). Uma vez constatado a deficiência de argamassa na mistura, são realizados acréscimos de cimento, areia e água (constituintes da argamassa propriamente dita) visando aumentar este teor de 2% em 2%, mantendo-se o traço $m = 5$ (agregado graúdo constante). Com o traço piloto ajustado, confecciona-se uma nova mistura e determina-se suas principais características.

b) De posse dos parâmetros teor de argamassa (α) e relação água-materiais secos (H) do traço piloto, produz-se ainda outras duas misturas, com traços definidos em 1:3,5 (traço rico) e 1:6,5 (traço pobre). As três misturas deverão ser produzidas com o mesmo teor de argamassa e a mesma trabalhabilidade (consistência) especificada, visto ser uma característica da família de traços. Conhecidos os traços auxiliares, produz-se misturas experimentais e determinam-se suas características, conforme extraídas do traço piloto.

c) Para cada um dos traços são moldados corpos de prova a serem enviados para o teste de compressão, principalmente aos 28 dias de idade.

d) Conhecidos os resultados dos ensaios referentes à resistência à compressão, são traçadas as curvas de Abrams, Lyse e Molinari, que permitem a obtenção do diagrama de dosagem e o traço definitivo a ser utilizado na obra, sendo este obtido em função do teor de agregado total (m) e relação água-cimento (a/c), obtidos no diagrama de dosagem para uma dada resistência de dosagem (fc).

O método de dosagem IPT/EPUSP estabelece como saída um gráfico de dosagem, dividido em quadrantes que inter relaciona as diversas variáveis envolvidas regidas pelas leis universais de comportamento do concreto: Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinaire, conforme apresentado na Figura 2.6.

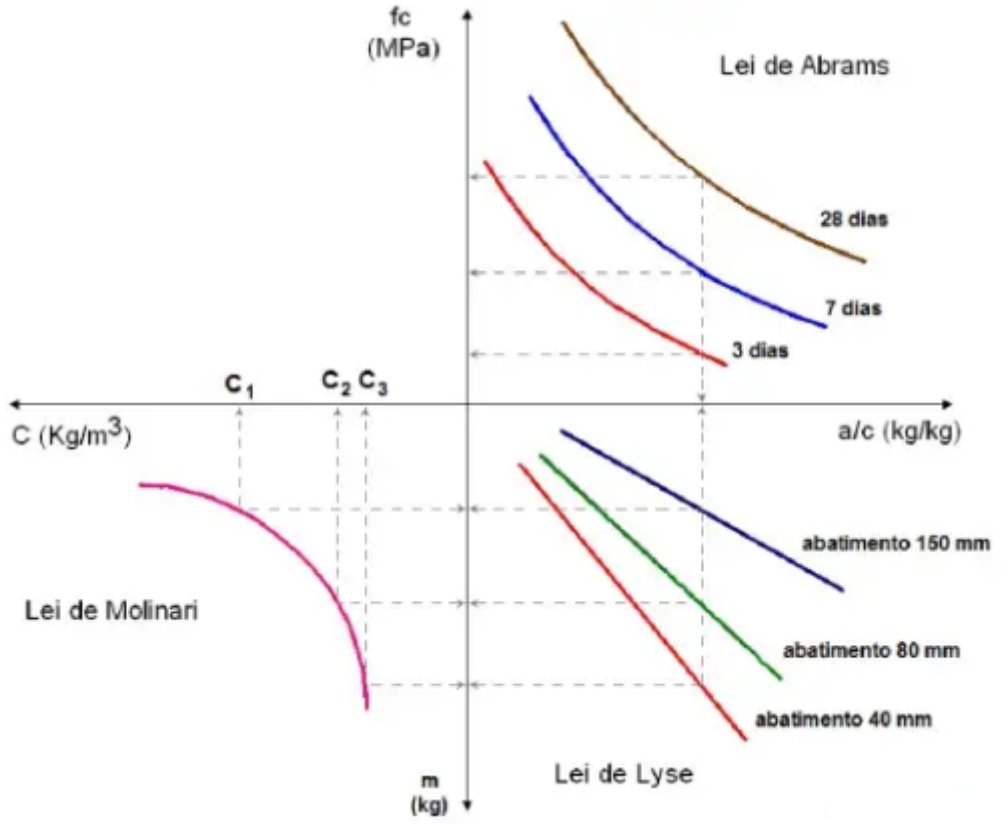

Figura 2.6: Diagrama de dosagem - Fonte: Helene & Terzian

A Lei de Abrams (1918) diz que a resistência do concreto (fc) é inversamente proporcional à relação água-cimento (a/c).

A Lei de Lyse (1932) diz que, fixados o cimento e os agregados, a consistência do concreto fresco depende preponderantemente da quantidade de água por m^3 de concreto ou ainda, para um certo conjunto particular de materiais, mantida a consistência do concreto, o traço m é diretamente proporcional à relação a/c.

A Lei de Molinari (1974) diz que o consumo de cimento por m^3 de concreto varia na proporção inversa da relação em massa seca de agregados/cimento (m).

2.5 Aditivos

Segundo [18], os aditivos já eram utilizados desde o Império Romano quando a população acrescentava clara de ovo, leite e outros materiais para melhorarem a trabalhabilidade do concreto. No Brasil, apesar da utilização de alguns materiais para facilitar o adensamento do concreto, foi somente a partir da descoberta do Cimento Portland, na década de 60, que o uso dos aditivos industriais realmente se disseminou.

Conforme a ABNT NBR 11768 (norma de aditivos químicos válida no Brasil para o uso de cimentos Portland), aditivos devem ser usados em quantidades controladas para alterarem algumas das características do concreto em seu estado fresco e endurecido.

Para [19] os aditivos já são parte integrante da formulação nos vários tipos de concretos e suas vantagens podem ser claramente observadas durante a utilização do mesmo, com a utilização de concretos mais fluidos com capacidade de resistência e durabilidade maiores, agregando ao projeto como um todo viabilidade técnica e econômica.

A mesma norma citada fez uma grande divisão dos diferentes tipos de aditivos utilizados, classificando-os segundo a função que desempenham no concreto. Neste trabalho, o aditivo utilizado pela empresa abordada é classificado como aditivo plastificante retardador de pega (define-se pega como o período de transição entre o estado fresco e o endurecido do concreto), ou de maneira mais generalizada, aditivo polifuncional, pois possui as duas funções denotadas abaixo.

O nome plastificante se deve ao fato de que, segundo a norma vigente, este aditivo permite reduzir o conteúdo de água de um concreto sem modificar sua consistência no estado fresco ou ainda, sem alterar a quantidade de água, aumenta a fluidez e o abatimento (*slump*), modificando sua consistência. A finalidade do uso deste aditivo neste cenário abordado, reside no fato de que reduzindo água na mistura, consegue-se de maneira quase que implicativa, reduzir-se o consumo de cimento (constituinte com maior custo final na mistura), caso contrário a resistência de projeto seria totalmente diferente da resistência real, conforme ilustrado pela Curva de Abrams. Apenas como ressalva, analisando-se individualmente os custos envolvidos, os aditivos contribuem com um percentual bem superior ao cimento, no entanto, como seu uso deve ser controlado, a utilização do mesmo não deve ultrapassar 0.7% do peso de cimento utilizado. Autores que já trabalhavam com aditivos plastificantes na década de 80, como Collepardi (1983), concluíram que o uso destes aditivos em concreto com baixo consumo de cimento o torna totalmente ineficiente, recomendando o uso do mesmo apenas em quantidades de cimento superior a 200 Kg/m^3.

O termo retardador de pega se deve ao fato do aditivo aumentar o tempo de transição entre o estado fresco e endurecido do concreto. Após lançado, o concreto deve iniciar a pega somente 90 minutos depois. Este tipo de aditivo é muito utilizado em regiões de clima quente, caso da indústria estudada, já que retarda a hidratação do cimento, aumentando o tempo para transporte, lançamento e adensamento.

De maneira resumida, segundo a ABNT 11768, os aditivos atuam nas propriedades reológicas e alteram as reações de hidratação do cimento, melhorando sua trabalhabilidade, modificando a viscosidade com maior retenção de água e aumentam sua durabilidade mecânica através da diminuição de fissuração térmica, desde que utilizados em dosagens coerentes.

3 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo foi dado ênfase ao problema da mistura de concreto, ou seja, uma revisão abrangente da pesquisa de otimização referente ao projeto e à proporção de misturas de concreto e como este caso vem sendo abordado na literatura, incluindo as técnicas de otimização aplicadas neste contexto, em diferentes cenários e tipos distintos de grupos de concreto.

No campo da otimização, as características das decisões, objetivos e restrições determinam o tipo de problema de otimização e quais métodos são mais adequados para encontrar uma solução. Por conta da diversidade de distintas decisões, objetivos e restrições disponíveis, pode-se argumentar que existem infinitas formulações possíveis de problemas em otimização do projeto da mistura de concreto que combina diferentes tipos de objetivos e técnicas de solução matemática. Os tipos mais importantes de formulações de problemas com concreto podem ser subdivididos em lineares, não lineares e heurísticas [35]. Vale ressaltar que, conforme citado em [35], no campo da otimização do projeto da mistura de concreto, estudos lineares são escassos, pois muitas das propriedades do concreto, principalmente quando o material cimentício é uma mescla de vários componentes, são melhores modelados por expressões quadráticas das variáveis de decisão.

Dentro da esfera de problemas lineares, Roshavelov [36] fez um estudo em que o objetivo do problema era minimizar a taxa de corrosão. Neste contexto, a taxa de corrosão foi assumida como sendo uma função linear das variáveis de decisão (teor de materiais cimentícios, proporção água/material cimentício, teor de agregado fino/total de agregados, espessura da cobertura do concreto e concentração de cloreto).

Okere [37] propôs um modelo matemático resolvido no método Simplex para otimização da resistência do concreto. O modelo pode fornecer todas as possíveis relações de mistura que podem produzir a resistência desejada do concreto, além do valor ideal e testes estatísticos foram utilizados para validação do modelo. Neste trabalho, aditivos químicos não foram utilizados.

Dentro da esfera de problemas não lineares, a programação quadrática é comum na área de otimização de mistura de concreto pois permite que os pesquisadores incorporem algumas das não-linearidades do comportamento do concreto. Neste universo pesquisadores conduziram estudos com expressões quadráticas para otimizar a resistência à compressão, o *slump* e o conteúdo de ar sujeitos a uma variedade de restrições lineares [35].

A partir deste ponto será discutido o problema da mistura em concretos convencionais não aditivados em uma primeira etapa e na segunda etapa o foco passará a ser os concretos aditivados, especialmente os de alta performance, existentes na literatura quase em sua totalidade quando se diz respeito a mix de ingredientes.

Ahmad e Alghamdi [20] propuseram uma abordagem estatística para obter a proporção ótima de mix de concreto usando os dados obtidos de um programa experimental estatístico. Um total de 27 misturas com três repetições cada, totalizando 81 amostras, foram consideradas pela variação dos principais fatores envolvidos em uma dosagem de concreto, sendo eles: relação água-cimento, conteúdo de cimento e relação agregado fino-total de agregados. Os dados experimentais foram utilizados para realizar análises de variância e desenvolver um modelo de regressão polinomial para resistência à compressão em termos dos três fatores citados, apresentando como resposta uma equação não linear. O modelo estatístico desenvolvido mostrou como a otimização de misturas de concreto pode ser realizada com diferentes opções possíveis. Os autores não utilizaram-se de técnicas clássicas de otimização, baseadas na elaboração de uma função objetivo e suas restrições, mas sim na obtenção de um modelo de regressão polinomial (não-linear) que relaciona a resistência com os três fatores citados, visando obter uma mistura com a maior resistência possível e menor consumo de cimento.

Shariq *et al.* [21] realizaram análises estatísticas para otimização das proporções de mistura de concreto, utilizando a técnica de experimento fatorial completo, ou seja, quando todas as combinações dos níveis de fatores estão presentes no experimento. Através da coleta e amostragem de dados, gerou-se um polinômio de regressão com onze coeficientes possuindo como variável dependente a resistência à compressão. Com base neste modelo estatístico, chegou-se a uma faixa ótima de resistência através de uma solução para as relações água-cimento, total de agregados-cimento e agregado grosso-cimento.

Ahmad [22] apresentou um procedimento laboratorial visando otimizar o custo com ingredientes na obtenção de misturas de concreto, através da utilização de ingredientes localmente disponíveis. Para [22], água-cimento, agregado grosso-total de agregados e total de agregados-cimento são os principais parâmetros que afetam a qualidade e a estrutura de uma mistura de concreto, sendo que a fixação de uma relação água-cimento está diretamente relacionado a requisitos de resistência e durabilidade, podendo as relações agregado grosso-total de agregados e total de agregados-cimento sofrerem variações visando minimizar o teor de cimento dentro das restrições, resultando em uma mistura ideal de concreto. Neste trabalho, o autor busca obter o custo mínimo da mistura testando diferentes combinações de agregados, conforme as descritas acima, dentro de suas faixas ideais, mantendo constante a relação água-cimento e usando o método de volume absoluto do projeto da mistura de concreto.

Saboya *et al.* [23] propuseram um modelo de programação linear para determinar as estratégias de produção na mistura de materiais para o processo de fabricação de blocos de concreto, visando buscar uma redução de custo na fabricação de produtos respeitando os requisitos mínimos de qualidade e as características físicas e mecânicas exigidas pela norma em um processo de pavimentação, ou de maneira mais específica,

minimizar os custos de fabricação dos blocos de concreto usados na pavimentação de áreas com leve tráfego comercial de veículos. Trata-se de um modelo mais voltado para características visuais dos blocos de concreto, definindo faixas permissíveis para cada matéria prima, não levando em conta a resistência à compressão e por motivos óbvios, a trabalhabilidade do concreto, que é uma propriedade pré existente ao endurecimento.

A mistura do concreto não aditivado convencional já foi abordada por alguns diferentes cenários, dentre eles a utilização de um método de dosagem ou ainda uma abordagem estatística que visa otimizar a mistura através de gráficos elaborados a partir da criação de equações regressivas e que geralmente são baseados em funções fundamentais, como a relação água/cimento (Lei de Abrams), a constância da demanda de água (Lei de Lyse) e a teoria da otimização de agregados (Leis de Faury-Bolomey-Fuller) [24], conforme exposto anteriormente. Esses métodos podem ser ajustados para produzir misturas de concreto que contêm materiais cimentícios suplementares e misturas químicas, como os citados a partir de agora, denominados de concretos aditivados.

Lee *et al.* [24] propuseram um algoritmo de busca harmônica (*Harmonic Search - HS*) para o problema de mistura em concreto de alto desempenho ou HPC (*High Performance Concrete*), que em termos gerais, pode ser definido como um concreto que atende a requisitos especiais não necessariamente atendidos pelo concreto convencional, como módulo de elasticidade, durabilidade, permeabilidade, e principalmente resistências à compressão mais elevadas e *slumps* superiores à faixa convencional, fazendo parte portanto de uma família com custo bem superior à do concreto convencional já que contêm uma quantidade bem maior de cimento, vários aditivos químicos em altas dosagens e materiais cimentícios suplementares. Diante do exposto, o projeto de uma mistura HPC torna-se mais complicado. Existem algumas abordagens tradicionais para selecionar os ingredientes apropriados da mistura de HPC, mas esses métodos convencionais para a proporção da mistura de HPC ainda consistem em misturas de teste ou no uso de dados tabulados. Como os métodos empíricos de tentativa e erro não são mais suficientes no projeto da mistura de concreto, várias ferramentas preditivas para proporções e otimização de mistura HPC foram propostas. Os métodos de dosagem de mistura mais prontamente disponíveis são Redes Neurais (NN) e Algoritmo Genético (GA).

O algoritmo proposto em [24] foi comparado com outras abordagens de mix de concreto, como redes neurais e algoritmos genéticos. Neste algoritmo, os autores propuseram encontrar uma mistura otimizada na família dos concretos HPC, onde devido à natureza deste tipo de produto, um processo de otimização se torna mais complicado em relação aos concretos convencionais e grande parte da literatura, até então, se baseava nos clássicos algoritmos genéticos (GA) e redes neurais (NN). Também concluíram que HS é uma ideia bastante promissora para este contexto e obtiveram respostas de *slump* e resistências com erros percentuais menores que 4% e os mixers obtidos em comparação aos algoritmos GA e NN tiveram melhores soluções quando confrontados experimentalmente. A faixa de resistência analisada possui o valor mínimo de 40.2MPa e máximo de 118.5MPa, enquanto o *slump* varia no intervalo de 185 a 245mm

Yeh, I. [25] propôs um modelo bastante interessante para o objetivo desta dissertação, com parâmetros de *slump* e resistência a serem fornecidos como entrada,

utilizando programação não-linear e rede neural para interpretar os dados a todo instante e transformá-los em um valor muito próximo ao real. Com métodos analíticos, buscou-se a composição ideal do concreto, com o menor custo e desempenho necessário. Neste caso, as funções na formulação, incluindo resistência e *slump*, foram modeladas usando-se um módulo baseado em redes neurais e a formulação resolvida usando-se outro módulo baseado em programação não-linear e algoritmos genéticos. O autor faz uso de componentes como *fly ash* e a sílica (*slag*) para formar a pasta como função de aglomerante, além de aditivos super plastificantes e fez uso de uma ferramenta *Computer Aided Design* (CAD) para otimização usando redes neurais.

O método analítico utilizado em [25] tem como base a utilização de seis equações, mais conhecidas como as equações da função objetivo de custo, restrição de exigência de resistência mínima, restrição de exigência de trabalhabilidade, restrição de conteúdo de componente, restrição de proporção de componente e finalizando restrição de volume absoluto. Este módulo, utilizando-se da ferramenta CAD, gerou um modelo bastante preciso nos quesitos resistência e trabalhabilidade. Durante a etapa de treinamento da base de dados, 78 misturas foram utilizadas para alimentação inicial da rede. Ao final do trabalho, o modelo gerou 25 mix distintos entre si com variações nos requisitos de resistência e abatimento.

Sobolev [26] propôs também um modelo de otimização baseado em regressão e análise através de uma base de dados, voltado também para HPC dosado em sílica ativa, um componente que confere maior durabilidade, coesão, resistência a agressões e, assim como o aditivo, faz com que a pasta exija menor quantidade de cimento. O autor apresentou as propriedades de resistência e o comportamento reológico de um sistema cimento - sílica - aditivo super plastificante com resistência acima de 130MPa.

Lutfy *et al.* [27] apresentaram modelos estatísticos desenvolvidos para estudar a influência de parâmetros chave de projeto de mistura nas propriedades de concreto auto adensável e compacto com agregados de xisto. Vinte misturas foram projetadas, onde as respostas referentes às propriedades foram avaliadas para analisar a influência dos parâmetros do mix e consequentemente desenvolver os modelos. Tais respostas incluíram o *slump* e a resistência à compressão, dentre alguns outros pertinentes a este grupo de concreto. Os materiais cimentícios utilizados pelos autores foram o próprio cimento, *fly ash* e sílica fumê. Três fatores de entrada foram usados no programa teste: relação água/composto de cimento (w/b), % de aditivo super plastificante em relação à massa de material cimentício ($HRWRA$) e conteúdo total do composto cimentício (B) e todas as misturas de concreto foram preparadas em um misturador rotativo onde após o período de medições as propriedades frescas e endurecidas foram tabeladas e utilizadas para análise de influência dos parâmetros e desenvolver os modelos estatísticos. Gráficos de $w/b/B$ para diferentes valores de *slump*, $HRWRA/slump$, dentre outros, foram gerados de acordo com o espaço amostral utilizado. As relações matemáticas entre as variáveis independentes e as respostas foram estimadas e as relações quadráticas foram simplificadas. A precisão do modelo proposto foi determinada pela comparação dos valores previstos para medidos, obtidos com as misturas preparadas e cinco outras misturas aleatórias, gerando gráficos isolados de todas as variáveis medidas (previsto x medido) e com base no modelo estatístico desenvolvido e nas relações descritas entre as variáveis da mistura e as respostas, todas as variáveis independentes (como *slump* e

resistência) foram variadas simultaneamente e independentemente, a fim de otimizar a resposta. O objetivo deste processo de otimização é obter o "melhor ajuste" para uma resposta específica, considerando a alternância de várias respostas simultaneamente.

Existem alguns outros trabalhos bastante interessantes no escopo de mistura de concreto, que focam em buscar o melhor intervalo para os agregados, visto que estes ocupam de 60 a 75% do volume de concreto e por conta disto a performance do concreto é altamente afetada pelas propriedades, proporções e disposições dos agregados [28]. Moini [28] desenvolveu as melhores misturas e investigou os efeitos do pacote de agregados (proporções e granulometria) no desempenho do concreto por meio de vários critérios baseados em simulação e experimento.

Vale ressaltar também que existe na literatura centenas de trabalhos cujo objetivo é modelar a variável *slump* do concreto com 95% ou mais de confiabilidade, utilizando-se de várias técnicas, como rede neural, modelo de árvore, regressão não linear, algoritmo genético assistido por rede neural. Esta necessidade de se conseguir medir o *slump* é tão crucial para engenharia de concreto, que dissertações e teses são discutidas apenas neste sentido, principalmente quando a pasta cimentícia é formada por diversos componentes distintos, com suas matérias primas possuindo composições totalmente divergentes. O trabalho realizado por Yeh [38] ilustra esta questão, visto que buscou modelar o *slump* do HPC utilizando-se de regressões de segunda ordem e rede neural artificial.

A literatura mostra que concretos não aditivados são dosados, quase via de regra, através de algum método laboratorial (algumas vezes por regressão estatística) e concretos aditivados, via de regra, principalmente no caso HPC, por técnicas de otimização sofisticadas como algoritmos genéticos, redes neurais e outras que foram testadas como o algoritmo de busca harmônica. Este presente trabalho visa contribuir buscando solucionar um problema de mix de concreto, com o uso de aditivos, através da utilização de programação linear única e exclusivamente. Utilizando-se de abordagens já realizadas em diferentes contextos separadamente, este trabalho visa mesclar as ideias de abordagem estatística, mapeamento das variáveis e parâmetros laboratoriais, faixas de variação admissíveis entre as variáveis, para se chegar a um modelo de otimização linear propriamente dito que tenha uma boa eficiência e eficácia em sua resposta. Esta estratégia praticamente ainda não foi explorada pela literatura, visto que o contexto não-linear complexo, principalmente após a inserção de aditivos químicos, ao qual a tecnologia de concreto está inserida, aparentemente torna-se um obstáculo.

Diante de todo o exposto, será proposto neste trabalho um modelo matemático de programação linear para o concreto convencional (aditivado e não aditivado), com resistência máxima de 40MPa devido à característica do cimento utilizado puramente, com sua confiabilidade sendo originada da medição dos resultados encontrados no centro de dosagem laboratorial e também comparativos com dados da literatura.

4 O Processo Produtivo

Neste capítulo são apresentados o processo produtivo da empresa de fabricação de concreto escolhida, com detalhamento das etapas necessárias para que se consiga uma mistura final que atenda a todos os pré-requisitos necessários.

4.1 A Empresa

A indústria do presente estudo possui um nicho de produção de concretos voltados principalmente para o setor de construção civil (prédios, fabricação de piso, estação de tratamento de esgoto, dentre outros). Situa-se no interior do Estado de São Paulo e possui um parque industrial com cerca de $7.000m^2$, além de uma capacidade de produção diária de $500m^3$ de concreto. Para fornecer os traços do concreto referentes às demandas diárias, o engenheiro responsável trabalha com ábacos e planilhas em excel e assim que a mistura é processada, torna-se quase sempre necessário uma readequação de água, cimento ou aditivo para que as restrições de projeto, principalmente a trabalhabilidade do concreto seja atingida.

Vale ressaltar que como o produto final entregue à obra deve estar ainda no estado fresco, um atraso de poucas horas na entrega em questão pode acarretar a devolução de todo volume contratado, devendo o mesmo passar por um novo processo de redosagem, através da adição de água e aditivos, pois torna-se enrijecido em pouco tempo, reduzindo drasticamente sua trabalhabilidade. No entanto, o aumento de água na mistura faz com que sua resistência final medida a 28 dias sofra uma redução, devendo-se também aumentar a quantidade de cimento. Assim a empresa necessita de um eficiente trabalho de logística para se conseguir entregar a mistura em um curto intervalo de tempo, evitando-se tais prejuízos e, como característica deste segmento, não se trabalha com estoque de produto final devido à sua perecibilidade.

Do ponto de vista organizacional, a empresa possui uma estrutura bem definida, podendo ser dividida entre unidades de insumo e produção.

4.2 Unidade de Insumos

Neste setor temos a estrutura definida para alocar os principais insumos constituintes da mistura. São eles:

4.2.1 Baias de Agregados

O volume de agregados em concreto é de aproximadamente 60-75% [28] e têm um custo relativamente baixo. Antigamente acreditava-se que os agregados, por não terem reações químicas de grande complexidade com a água, eram usados apenas para preencher os espaços vazios da mistura, ou seja, com uso restrito para aumento de volume. Porém, com a evolução das pesquisas, ficou clara a importância destes constituintes e sua influência nas principais propriedades do concreto, seja no estado fresco referente à trabalhabilidade da mistura, seja no estado endurecido referente a sua durabilidade, conforme relatado por [29]. Na empresa abordada nesta dissertação, os agregados utilizados em mais de 90% dos traços são a areia média como agregado miúdo e a brita 16 como agregado graúdo. Em alguns casos específicos, areia fina e pedrisco 9 também são misturados.

Todos estes materiais são armazenados nas chamadas baias de agregados, cada qual destinada a um tipo de insumo, conforme a Figura 4.1. Assim que o traço é liberado pela equipe de engenharia, uma pá carregadeira é destinada às baias de agregados para transportar os agregados envolvidos até uma balança alocada no setor produtivo com o objetivo posterior de se enviar a quantidade em massa pré-estabelecida para o misturador.

Figura 4.1: Baias de agregados - Fonte: Processo produtivo em uma indústria de artefatos de concreto

4.2.2 Silo de Cimento

Existem diversos tipos de cimento comercial para serem utilizados nas mais variadas aplicações. Na empresa em questão, todos os produtos finais são obtidos a partir do uso de cimento Portland do tipo 5, conhecido no mercado como CP V, que atinge altas resistências já nos primeiros dias. Este cimento, ao ser adquirido é armazenado à granel, via descarga pressurizada por caminhões de transporte, em um silo de formato cilíndrico, com capacidade de 80 toneladas, conforme a Figura 4.2.

Figura 4.2: Silo de cimento - Fonte: Processo produtivo em uma indústria de artefatos de concreto

4.2.3 Reservatório de Água

A água é um dos componentes mais importantes do concreto, chegando a ocupar em alguns casos até 20% do seu volume total. É utilizada para fazer a mistura do cimento com os agregados em uma reação de endurecimento, permitindo a ligação entre os componentes do concreto, fornecendo plasticidade à mistura [39].

A água usada na empresa abordada é proveniente de um poço artesiano instalado no local e armazenada em um reservatório de água com capacidade para 10.000 litros, conforme a Figura 4.3.

Figura 4.3: Reservatório de água - Fonte: Processo produtivo em uma indústria de artefatos de concreto

4.3 Unidade de Produção

Primeiramente os agregados são transportados das baias por pás carregadeiras até a balança próxima situada no mesmo espaço. Após o peso ser atingido corretamente, a mesma pá carregadeira transporta os materiais para a esteira inclinada e assim que tudo estiver devidamente posicionado a esteira é colocada em movimento com destino a uma outra estrutura conectada ao caminhão misturador, caindo por gravidade. Paralelamente, a base do silo de cimento é interligada a uma rosca sem fim, responsável por transportar o cimento do silo até uma balança e controlada por um CLP (controlador lógico programável). Assim que o peso de cimento solicitado é atingido, o CLP libera uma comporta e o cimento também cai por gravidade para que seja misturado. Assim como o cimento a água é transportada, por bombeamento, até uma balança alocada próxima ao caminhão misturador. Assim que o peso for compatível com o especificado em um hidrômetro existente na sala de painel, a água é despejada por gravidade através da abertura de uma válvula.

A Figura 4.4 ilustra o painel de comando existente em um setor isolado da produção, onde os responsáveis fazem a preparação para que o processo produtivo tenha início.

Figura 4.4: Painel de comando - Fonte: Próprio autor

A Figura 4.5 mostra uma visão geral desde o início do processo em que os agregados são lançados na esteira até o final do mesmo, com todos os ingredientes alocados no caminhão, dando início ao processo de mistura propriamente dito.

Figura 4.5: Visão geral do processo produtivo - Fonte: Próprio autor

5 Modelagem Matemática

Neste capítulo, será proposto um modelo baseado em programação linear para se obter a mistura de concreto com o menor custo no âmbito multi produto, ou seja, para todo e qualquer tipo distinto de família de concretos demandados, atendendo-se a todos os principais fatores e requisitos, seja para o concreto convencional como para o bombeado, sendo este visto como aquele que pode ser transportado por meio de tubos ou mangueiras até o local onde será manipulado, principalmente locais de difícil acesso, sendo imprescindível em uma obra quando as distâncias são longas ou construções em alturas muito elevadas, fazendo-se uso de uma bomba de alta potência.

Este capítulo está subdividido em 2 vertentes, sendo a tratar: modelagem sem aditivo e modelagem com aditivo. Inicialmente serão apresentadas algumas equações paramétricas que serão usadas nos modelos.

5.1 Equações Paramétricas

Como foi percebido e discutido no Capítulo 2, a resistência à compressão, como variável independente, obedece a uma curva exponencial a partir da variável dependente a/c (ver Figura 2.4). Com isto, realizou-se um procedimento de regressão linear, a partir do cimento CPV - 40 utilizado na empresa deste estudo. Através da Figura 2.5, curva em verde referente ao CP-41 (curva para o cimento do tipo CPV, na resistência de 40 MPa), foram obtidos alguns pontos e feito a regressão linear baseada no método dos mínimos quadrados. A reta obtida e sua respectiva função, que será utilizada posteriormente no modelo, estão visualizadas na Figura 5.1.

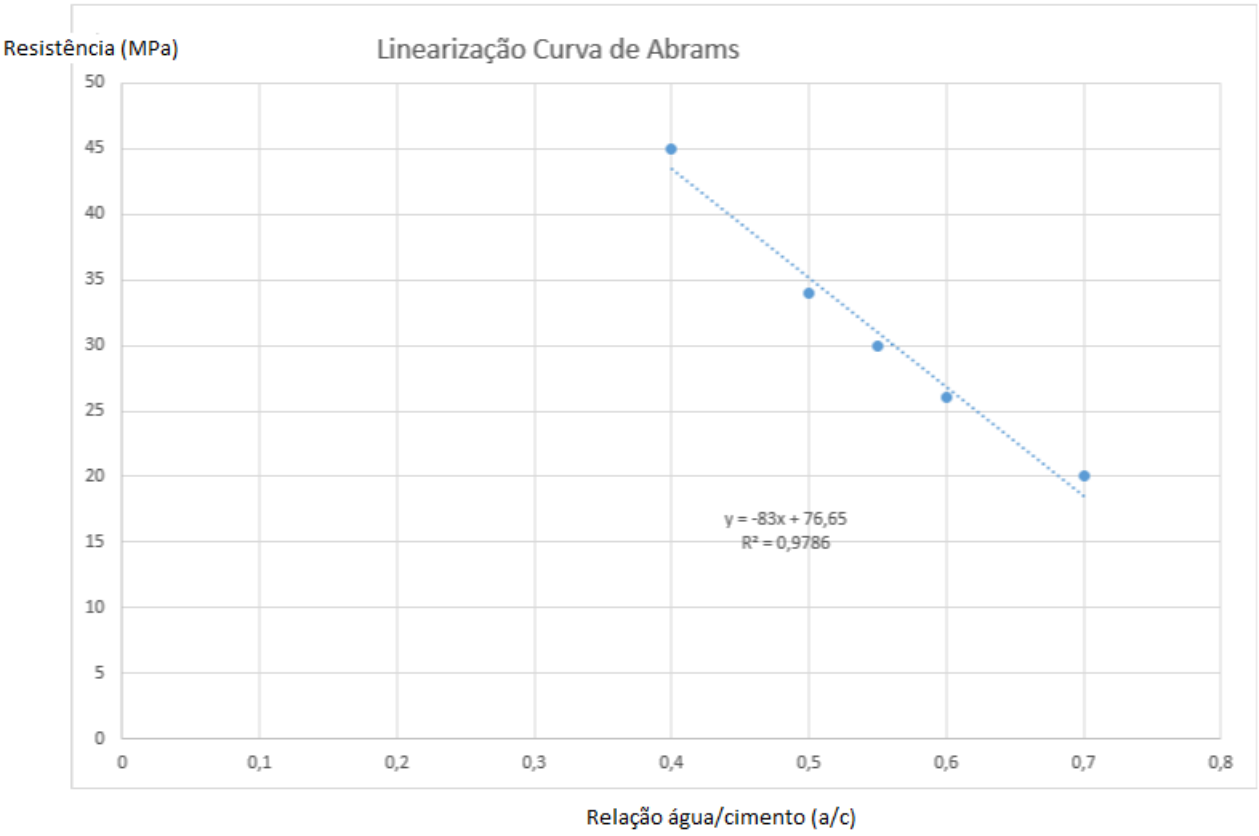

Figura 5.1: Regressão linear da Curva de Abrams - cimento CPV 40 - Fonte: Próprio autor

Desta forma, a partir de agora e durante todo o texto temos que

$$fc = -83 \cdot \frac{a}{c} + 76.65 \tag{5.1}$$

Sendo que: fc é a resistência do produto em MPa, a é a quantidade de água na mistura (Kg) e c é a quantidade de cimento na mistura (Kg).

Definido a resistência à compressão, torna-se necessário definir o segundo parâmetro de extrema importância para o projeto, ou seja, o abatimento (*slump*). Campitelli [12], em testes laboratoriais, constatou que a consistência do concreto (abatimento) é influenciada principalmente pela relação água-massa seca (H), pela dimensão máxima característica (DMC - medida referente ao tamanho do grão em mm) e massa específica da brita (γ). A relação matemática que deixa explícito o parâmetro *slump* (S) dependente dos fatores mencionados é dada por

$$S = \frac{441 \cdot \gamma \cdot H - 783 \cdot (148 - DMC)}{163 - DMC} \tag{5.2}$$

Sendo que: $H = \dfrac{a}{c + fa + ca}$, fa é a quantidade de agregado fino (Kg) e ca é a quantidade de agregado grosso (Kg).

Nesta relação S é mostrado em milímetros (mm) e γ deve ser informado em $(\dfrac{kg}{m^3})$.

Observe que o modelo de Campitelli aborda o *slump* na ausência de aditivo, sendo o foco do texto neste momento.

5.2 Formulação Matemática sem Aditivo

A listagem de símbolos abaixo irá ser utilizada em toda a formulação matemática que será exposta a seguir, sendo separadas por índices, parâmetros e variável de decisão.

ÍNDICES
$J = \{1, ..., |J|\}$ ingredientes (variação em j): cimento(j=*1*), água(j=*2*), agregado miúdo(j=*3*), agregado graúdo(j=*4*);
$P = \{1, ..., |P|\}$ produtos (variação em p);

PARÂMETROS
c_j: custo unitário ($R\$/Kg$) do ingrediente j;
V_p: demanda volumétrica (m^3) do produto p;
SM_j: densidade (Kg/m^3) do ingrediente j;
$fcmin_p$: resistência nominal de compressão (MPa) mínima do produto p;
Qc_p: recomendação mínima exigida de cimento (Kg/m^3) para o produto p;
SLi_p: limite inferior do *slump* (mm) do produto p;
SLu_p: limite superior do *slump* (mm) do produto p;
DMC: dimensão máxima característica (mm) do agregado graúdo;

VARIÁVEIS DE DECISÃO
Q_{jp}: quantidade do ingrediente j (Kg) no produto p;

VARIÁVEIS AUXILIARES
fc_p: resistência à compressão (MPa) do produto p;
S_p: *slump* (mm) do produto p;

$$min \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} c_j \cdot Q_{jp} \tag{5.3}$$

Sujeito a :

$$\sum_{j \in J} \frac{Q_{jp}}{SM_j} = V_p \qquad \forall p \in P \qquad (5.4)$$

$$\frac{Q_{1p}}{V_p} \geq Qc_p \qquad \forall p \in P \qquad (5.5)$$

$$fc_p \geq fcmin_p \qquad \forall p \in P \qquad (5.6)$$

$$SLi_p \leq S_p \leq Slu_p \qquad \forall p \in P \qquad (5.7)$$

$$0.3 \ \leq \frac{Q_{2p}}{Q_{1p}} \leq \ 0.7 \qquad \forall p \in P \qquad (5.8)$$

$$0.4 \ \leq \frac{Q_{3p}}{Q_{3p} + Q_{4p}} \leq \ 0.52 \qquad \forall p \in P \qquad (5.9)$$

$$0.48 \ \leq \frac{Q_{1p} + Q_{3p}}{Q_{1p} + Q_{3p} + Q_{4p}} \leq \ 0.52 \qquad \forall p \in P \qquad (5.10)$$

$$Q_{jp} \geq 0; \quad fc_p \geq 0; \quad S_p \geq 0 \qquad \forall p \in P \qquad (5.11)$$

A função objetivo (5.14) minimiza a soma dos custos com ingredientes para preparo do concreto levando em conta toda a cadeia de produtos. As restrições (5.4) garantem que as demandas volumétricas para cada tipo de produto sejam atendidas dentro de um planejamento. As demais restrições visam atender à especificação final do produto a ser entregue, sendo elas: quantidade mínima de cimento exigida, devendo estar de acordo com a norma da categoria do projeto em questão ou ainda atender a exigência do consumidor ou engenheiro responsável pela obra. As restrições (5.5) garantem esta requisição. As resistências mínimas à compressão são atendidas pelas restrições (5.6), onde fc_p é dada pela equação (5.1) e as restrições (5.7) fazem com que as características dos abatimentos desejados estejam entre os limites pré-especificados, sendo S_p fornecido pela equação (5.2). As restrições (5.8) definem os intervalo admissíveis para a relação água-cimento, enquanto as restrições (5.9) e (5.10) dizem respeito aos agregados, sendo a primeira condizente com a razão agregados finos/total de agregados $(fa/(fa + ca))$, com o mesmo intervalo sendo utilizado por [25], e a última define o intervalo para o teor de argamassa (α) admissível para o concreto convencional, atendendo as características da pasta na empresa em análise e também estando de acordo com as faixas de [30] e [31]. Vale ressaltar que se estivesse sendo otimizado a mistura para concreto bombeado, ao invés do convencional, esta faixa de argamassa deveria ser consideravelmente mais alta, com o mínimo em 0,53 podendo chegar em alguns casos a 0,6, caso contrário a mesma não chegaria ao seu destino final com o bombeamento, devido ao excesso de agregados graúdos. Finalizando as restrições (5.23) nos fornecem os domínios das variáveis de decisão.

5.3 A Influência dos Aditivos

O problema de otimização do mix de concreto com aditivos pode ser deduzido na mesma ideia da formulação anterior, com o acréscimo da restrição de controle do uso destes aditivos, com base na norma vinculada ao uso do mesmo. No entanto, quando

aditivos são incorporados à mistura, suas propriedades naturais se alteram e não é trivial prever suas características através de equações, mesmo em se tratando de equações não-lineares, pois são vários os tipos de aditivos existentes e cada qual reage de uma maneira distinta na mistura, sofrendo até mesmo influência da temperatura e umidade do ar. Enquanto alguns aditivos conseguem reduzir de 5% a 15% a quantidade de água, outros aditivos como os super plastificantes conseguem chegar a faixas de 40% de redução.

A NBR 11768 adota um valor nominal de 0.5% de aditivo em relação ao peso de cimento para se trabalhar com este produto. No entanto, segundo a mesma norma, em regiões de clima quente a concretagem gera vários problemas no estado plástico da mistura, como perda de trabalhabilidade e redução no tempo de pega, além das dificuldades de lançamento, adensamento e acabamento do concreto, podendo esta dosagem sofrer um aumento condicional. Corrêa [32], em seu estudo sobre aditivos polifuncionais e seu desempenho em concretos de cimento Portland de mesma resistência que o utilizado neste estudo, mostrou que as melhores dosagens foram 0.5% e 0.7% sobre o peso do cimento, levando-se em conta os principais critérios limitadores de dosagens exigidos pela norma de fabricação de concreto dosado em centrais, sendo eles: retardamento do fim de pega do concreto e incremento da incorporação de ar, que tem efeito de maneira relevante sobre a resistência à compressão do mesmo, ficando o aditivo polifuncional dosado em 0.7% com nível de incorporação de ar abaixo de 2.5% em todos os testes realizados, estando desta forma dentro da expectativa de um concreto convencional. Desta forma, como a concretagem deste presente trabalho se dá em uma região dominantemente de clima quente a maior parte do ano, pode-se adotar a faixa de dosagem do aditivo em 0.7% visando uma prorrogação no tempo de pega do concreto e maior tempo de manutenção da trabalhabilidade.

Diante do exposto, um método experimental foi realizado para desenvolver o modelo de otimização, visando alcançar uma implementação bastante satisfatória com maior grau de confiabilidade possível. Diante da não existência de uma relação matemática do *slump* com os ingredientes quando aditivos são incorporados, a realização de uma análise estatística de regressão linear múltipla torna-se uma opção considerável.

5.3.1 Dados Experimentais

Um conjunto de 28 amostras foram testadas para se construir um modelo de regressão através da relação entre a entrada (*slump*) e as variáveis de saída (cimento, água, agregado fino, agregado grosso, aditivo), com objetivo de se encontrar um modelo na forma

$$S" = a_0 + a_1 Wc + a_2 Ww + a_3 Wfa + a_4 Wca + a_5 Wa \tag{5.12}$$

onde: $S"$ = *slump* com aditivo; Wc, Ww, Wfa, Wca e Wa são os pesos de cimento, água, areia, brita e aditivo, respectivamente, em $1m^3$ de concreto e a_i, com $i = 0$, 1, 2, 3, 4, 5 sendo coeficientes numéricos.

Nesta análise foram usados sempre os mesmos tipos de ingredientes, inclusive o aditivo adotado pela empresa classificado como plastificante polifuncional. O espaço amostral obtido tem como finalidade entender como cada variável de decisão interfere

no parâmetro *slump*. A Tabela 5.1 apresenta todas as amostras executadas e medidas em campo.

Tabela 5.1: Amostragem mix concreto

Número Amostra	Slump (mm)	Conteúdo (Kg/m^3)				Conteúdo (l/m^3)
		Cimento	Água	Areia	Brita	Aditivo
1	40	265	158,75	940	965	0,464
2	70	265	158,75	940	965	0,928
3	100	265	158,75	940	965	1,391
4	120	265	158,75	940	965	1,855
5	20	325	69,6	914	1172	2,275
6	50	314	104,4	883	1132	2,198
7	120	303	140,8	853	1094	2,121
8	120	215	155	910	1065	1,51
9	120	225	158	900	1065	1,58
10	120	240	166	885	1065	1,68
11	120	325	159	800	1065	2,28
12	120	350	154	765	1065	2,45
13	140	225	162	900	1065	1,58
14	140	235	165	890	1065	1,65
15	140	250	173	875	1065	1,75
16	140	270	167	855	1065	1,89
17	140	305	165	820	1065	2,14
18	140	335	164	790	1065	2,35
19	140	370	163	755	1065	2,59
20	30	295	125	830	1065	0,517
21	50	295	125	830	1065	1,034
22	80	295	125	830	1065	1,551
23	100	295	125	830	1065	2,068
24	120	295	135	830	1065	2,068
25	60	200	144	925	1065	1,4
26	90	250	155	875	1065	1,8
27	180	350	189	855	965	2,5
28	160	395	174	810	965	2,8

Observa-se que as amostras de números 1, 2, 3 e 4 sofreram variações sucessivas e intervalares em 4 etapas da quantidade de aditivo adicionado, mantendo-se fixas as demais variáveis. Nota-se que pequenas quantidades de aditivos são suficientes para alterarem drasticamente o parâmetro medido (*slump*). Nas amostras 5, 6 e 7 o objetivo foi avaliar a interferência da água, através do incremento da mesma de maneira relevante em 3 etapas, observando-se também seu forte impacto na alteração do parâmetro. Atenta-se ao fato que nestas 3 amostras os outros valores também se alteraram e isto se deve ao fato do traço apresentado ser referente a 1 metro cúbico de concreto e a água ter forte influência em seu volume quando aumentada. Para as amostras de 8 a 12 e 13 a 19 procurou-se variar a relação água-cimento de maneira a se obter vários traços com o mesmo *slump*, ou seja, o *slump* foi mantido para várias configurações

distintas. Nas amostras 20, 21, 22 e 23 fez-se o mesmo procedimento de variação do aditivo, porém para um concreto com diferente resistência à compressão. A amostra 24 teve um incremento de água após a medição da amostra 23. As últimas 4 amostras nos fornecem valores distintos de *slump* para configurações totalmente distintas entre si.

Os dados tabulados foram analisados estatisticamente através da função de regressão linear múltipla do Microsoft Excel e os resultados da análise constam na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Análise de Regressão

Estatísticas da Regressão	
R^2	0,898
Erro Padrão	14,65
Contagem de Variáveis	5
Observações	28
Nível de Confiança	0,95
	Coeficientes
Interceptação	120
Cimento	-0,27
Água	1,068
Areia	-0,143
Brita	-0,054
Aditivo	45,76

Com base nos resultados obtidos da Tabela 5.2, a equação 5.12 tem seus coeficientes calculados e fica definida como:

$$S" = 120 - 0.27Wc + 1.068Ww - 0.143Wfa - 0.054Wca + 45.76Wa \tag{5.13}$$

Fazendo-se uma breve análise da equação acima fornecida, observa-se através do R^2 estatístico, que conseguiu-se uma aproximação linear bastante interessante para o *slump* quando todas as variáveis independentes são analisadas em conjunto. Comparando com base na equação (5.2) do modelo de Campitelli, nota-se que os coeficientes estão bastante coerentes sendo eles negativos para a massa seca (cimento e agregados) e positivo para a água. Obviamente, o aditivo é a principal variável do contexto sendo o mesmo o mais relevante para o aumento de trabalhabilidade do concreto, com sua influência sendo explícita no alto valor de seu coeficiente.

5.3.2 Formulação Matemática com Aditivo

Será incluído um novo índice ($j = 5$) referente ao uso do aditivo na mistura, com o incremento e a substituição de uma restrição na formulação anterior.

$$min \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} c_j \cdot Q_{jp} \tag{5.14}$$

Sujeito a :

$$\sum_{j \in J} \frac{Q_{jp}}{SM_j} + V_{ar} = V_p \qquad \forall p \in P \qquad (5.15)$$

$$\frac{Q_{1p}}{V_p} \geq Qc_p \qquad \forall p \in P \qquad (5.16)$$

$$fc_p \geq fcmin_p \qquad \forall p \in P \qquad (5.17)$$

$$SLi_p \leq S"_p \leq Slu_p \qquad \forall p \in P \qquad (5.18)$$

$$0.3 \ \leq \frac{Q_{2p}}{Q_{1p}} \leq \ 0.7 \qquad \forall p \in P \qquad (5.19)$$

$$\frac{Q_{5p}}{Q_{1p}} \leq \ 0.007 \qquad \forall p \in P \qquad (5.20)$$

$$0.4 \ \leq \frac{Q_{3p}}{Q_{3p} + Q_{4p}} \leq \ 0.52 \qquad \forall p \in P \qquad (5.21)$$

$$0.48 \ \leq \frac{Q_{1p} + Q_{3p}}{Q_{1p} + Q_{3p} + Q_{4p}} \leq \ 0.52 \qquad \forall p \in P \qquad (5.22)$$

$$Q_{jp} \geq 0; \quad fc_p \geq 0; \quad S"_p \geq 0 \qquad \forall p \in P \qquad (5.23)$$

A restrição (5.18) garante o *slump* do concreto dentro dos limites, com a equação que rege agora seu comportamento dada por (5.13), enquanto a restrição (5.20) define a quantidade de aditivo máxima a ser utilizada em relação ao peso de cimento na mistura. O V_{ar} utilizado na restrição 5.15 é o volume de ar aprisionado, considerado como 2% [22].

6 Resultados Computacionais

Neste capítulo foi gerado um conjunto de misturas para se avaliar o desempenho do modelo, com o uso de dados e parâmetros reais aplicados na empresa foco deste trabalho. Na primeira etapa foi abordado apenas o concreto sem aditivos e na segunda etapa a abordagem completa com o uso da amostragem estatística. Os dados fornecidos pela empresa foram solucionados pelo ambiente *CPLEX Studio* IDE 12.9.0 *linkado* com o software *Visual Studio* 2012, em um ambiente escrito em linguagem C++ com base nas modelagens apresentadas. O processador utilizado durante a execução foi um Intel Core i7 3.6 GHz em um computador com memória instalada de 16 GB e sistema operacional de 64 bits.

6.1 Abordagem sem Aditivos

A Tabela 6.1 apresenta os custos unitários e a massa específica de cada ingrediente utilizado para a fabricação do concreto convencional, de acordo com informações fornecidas pela empresa abordada que possui o custo final já com o frete embutido, enquanto a Tabela 6.2 fornece as especificações técnicas para cada tipo de produto por ela fabricado no período de planejamento abordado. Será feito uma análise com base nos 4 produtos abaixo apresentados.

Tabela 6.1: Ingredientes: Custos e Características

Ingrediente	Custo Unitário (R$/Kg)	Massa Específica (Kg/m^3)
Cimento	0.38	3060
Água	0.007	1000
Areia	0.03	2530
Brita	0.03	2800

Tabela 6.2: Especificações Técnicas

Produto	Especificações Técnicas	Valores Nominais
1	Slump (mm)	100 +- 20
	Resistência (MPa)	30
2	Slump (mm)	100 +- 20
	Resistência (MPa)	25
3	Slump (mm)	100 +- 20
	Resistência (MPa)	20
4	Slump (mm)	160 +- 20
	Resistência (MPa)	30

A Tabela 6.3 fornece a demanda a ser atendida para cada um dos produtos no período de planejamento considerado, ou seja, o volume de concreto a ser fabricado para diferentes tipos de produtos nos dias 1 e 2, no caso em questão.

Tabela 6.3: Demanda Volumétrica

Produto	Demanda (m^3)
1	70
2	16
3	15
4	10

A Tabela 6.4 fornece a solução apresentada pelo modelo, através da utilização do Solver Cplex, para a quantidade de produtos distintos ao longo do período de planejamento pré estabelecido. Os conteúdos mostrados, visam atender a todas as restrições apresentadas na sessão anterior e FA/TA, ou ainda $\frac{fa}{fa+ca}$, indica a relação de agregado fino e total de agregado (restrições (5.9) e (5.21)), importante relação que, conforme afirma [33], influencia no comportamento do volume de vazios na mistura, pois em um primeiro estágio, o volume de vazios tende a diminuir com o aumento do percentual de agregados finos, ocupando o espaço do agregado grosseiro. No entanto, após atingir certo limite, os agregados finos começam a interferir na acomodação dos grãos mais grossos, aumentando o volume de vazios [34]. A argamassa (α) ilustra a diferença entre o concreto convencional (1, 2 e 3) e o bombeado (4), este último com sua faixa alterada diretamente no código com intervalo entre 0.53 e 0.6, para que o bombeamento de fato possa ocorrer.

Tabela 6.4: Resposta do modelo sem aditivo

	Ingredientes				Fatores	
	Conteúdo (Kg)					
Produto	Cimento	Água	Areia	Brita	FA/TA	Argamassa
1	25710	13970	54007	73585	0.42	0.52
2	5260	3185	12913	16776	0.43	0.52
3	4464	2979	12538	15695	0.44	0.52
4	3877	2106	9004	8587	0.51	0.6

A Tabela 6.5 indica o valor corrente, ou seja, valor fornecido pelo modelo dos principais parâmetros técnicos na otimalidade, como a resistência à compressão e a quantidade de cimento por volume de concreto. A quantidade de cimento por volume de mistura (Qc), referente às restrições (5.5) e (5.16), é um parâmetro que pode ser fornecido pelo cliente; nesta análise apresentada, adotou-se o consumo mínimo de $200\frac{Kg}{m^3}$. O parâmetro resistência à compressão, devido a um pequeno desvio do modelo linear obtido, foi adotada com uma folga (excesso) de 3% em seu valor nominal de projeto para que se tenha total garantia que a resistência mínima necessária seja realmente atendida na prática. Os *slumps* foram previamente definidos conforme valores constados na Tabela 6.8, ou seja, 100 mm para os produtos 1, 2 e 3 e 160 mm para o produto 4, para efeitos de comparação futura, visto que na abordagem aditivada estão produtos pertencentes ao portfólio da empresa abordada.

Tabela 6.5: Especificações resultantes

	Especificações Técnicas Correntes	
Produto	Resistência (MPa)	Qc (Kg/m^3)
1	30.9	367
2	25.75	329
3	20.6	297
4	30.9	388

A Tabela 6.6 apresenta os custos finais com matérias-primas para que as misturas possam ser reproduzidas.

Tabela 6.6: Custos de fabricação

Produto	Custo (R$)
1	13695
2	2911
3	2564
4	2015
Total	21185

6.2 Abordagem Aditivada

A solução do modelo, quando o aditivo polifuncional é incorporado à mistura em uma dosagem máxima de 0.5% do peso de cimento (valor nominal utilizado apenas para

efeitos de comparação com a abordagem não aditivada), é apresentada na Tabela 6.7. Ressalta-se que, apesar desta dosagem no modelo estar em 0.7%, aqui será utilizado a dosagem nominal recomendada em manual, deixando-se a maior dosagem para efeitos de comparação financeira com produtos comercializados pela empresa. Neste tópico compara-se apenas com uma mistura não aditivada, fazendo mais sentido a dosagem nominal.

Tabela 6.7: Resposta do modelo com aditivo

	Conteúdos (Kg)				(l)	Fatores	
	Ingredientes						
Produto	Cimento	Água	Areia	Brita	Aditivo	FA/TA	Argamassa
1	20155	10952	55023	81444	100	0.40	0.48
2	4180	2530	12933	18540	21	0.41	0.48
3	3586	2394	12403	17322	18	0.42	0.48
4	3728	2025	7500	9956	18.6	0.43	0.53

A Tabela 6.8 indica o valor corrente dos principais parâmetros técnicos na otimalidade, como a resistência à compressão, o *slump* e a quantidade de cimento por volume de concreto.

Tabela 6.8: Especificações resultantes(2)

	Especificações Técnicas Correntes		
Produto	Resistência (MPa)	Slump (mm)	Qc (Kg/m^3)
1	30.9	100	288
2	25.75	100	261
3	20.6	100	239
4	30.9	160	373

A Tabela 6.9 informa os custos dos produtos com a incorporação de aditivo na mistura. O custo do aditivo segundo valor fornecido pela empresa, é de $R\$/l$ 2.4.

Tabela 6.9: Custos de fabricação(2)

Produto	Custo (R$)
1	11830
2	2550
3	2271
4	1954
Total	18605

6.3 Análise de Resultados

A Tabela 6.10 abaixo ilustra um comparativo entre os valores de *slump* previstos e reais, medidos no centro de dosagem, visando atestar efetivamente o modelo de regressão proposto para este parâmetro.

Tabela 6.10: Parâmetro previsto pelo modelo x Parâmetro real

Produto	Slump Real	Slump Previsto
1	102	100
2	100	100
3	120	100
4	170	160

Fica evidente a eficácia do modelo proposto referente ao parâmetro *slump*, onde em todos os 4 produtos testados o valor real está dentro da faixa admissível. Tal fato já era previsível, devido ao resultado da regressão apresentado na Tabela 5.2, com R^2 próximo de 1 e o desvio padrão total igual a 14, estando sempre contido no desvio permitido de *slump* que é de 20mm.

A Tabela 6.7 quando confrontada com a Tabela 6.4 mostra que o uso do aditivo polifuncional reduziu a quantidade de água em todas as amostras, sendo as reduções de 21% para o produto 1, 20% para o produto 2, 19% para o produto 3 e 4% para o produto 4. Estas reduções, obviamente, permitem reduzir a quantidade de cimento na mesma proporção, reduzindo o custo final da mistura, como ilustrado comparativamente nas Tabelas 6.6 e 6.9. Apesar de ser o componente com maior custo na mistura, o uso de aditivos é muito compensador devido ao seu uso em pequenas proporções. Como mostrado na Tabela 6.7, o uso de 100 litros de aditivo conseguiu reduzir $5555Kg$ de cimento na preparação de $70m^3$ do produto 1, vindo desta relação o benefício monetário. As taxas de redução de água alcançadas estão bem coerentes com o fornecido pelo manual do aditivo, informando reduções compatíveis ao intervalo de 4 a 20%, dependendo do tipo de concreto e características da região para a dosagem recomendada de 0.5%.

6.3.1 Comparação com Abordagens da Literatura

Conforme comentado anteriormente, Lee *et al.* (2011) propuseram um algoritmo de busca harmônica (HS) para encontrar uma mistura otimizada na família dos concretos HPC, onde devido à natureza deste tipo de produto, um processo de otimização se torna muito mais complicado em relação aos concretos convencionais e toda literatura, até então, se baseava nos clássicos algoritmos genéticos (GA) e redes neurais (NN). Lee *et al.* (2011) concluíram que HS é uma idéia bastante promissora para este contexto e obtiveram respostas de *slump* e resistências com erros percentuais menores que 4% e os *mixers* obtidos em comparação aos algoritmos GA e NN tiveram melhores soluções quando confrontados experimentalmente. Indubitavelmente, seria bastante proveitoso para este trabalho realizar uma comparação completa do modelo proposto obtido nesta dissertação com os conjuntos obtidos por estas três outras estratégias; no entanto, a faixa de resistência analisada nas três vertentes possui o valor mínimo de 40.2MPa e máximo de 118.5MPa. Conforme observado na Figura 2.5, a resistência máxima que o cimento utilizado na empresa abordada atinge é de 45MPa, estando limitado portanto a ter apenas 1 instância de comparação entre estes outros trabalhos, porém de excelente valia já que aloca o modelo para ser testado em uma configuração de *slump* e resistência bem distinta dos padrões usuais no processo de produção da empresa. A Tabela 6.11 mostra os conjuntos obtidos como respostas para HPC, na resistência e

slump indicados, para os algoritmos HS (Lee at el; 2011), GA (Yang *et al*; 2003), NN (Lim *et al*; 2004) e também a resposta pelo modelo objetivo deste trabalho. Deve-se atentar ao fato que as respostas estão em unidades de volume, ou seja, $\frac{Kg}{m^3}$.

Tabela 6.11: Resultados mix pelos programas HS, NN, GA e Modelo Proposto

Estratégia	Entradas		Saídas			
	Resistência (MPa)	Slump (mm)	Aglomerante	Água	FA/TA	Aditivo
HS	40.2	245	376.8	176.7	0.474	4.38
NN	40.2	245	370.3	167	0.458	3.98
GA	40.2	245	412.2	172.3	0.448	3.74
Modelo Proposto	40.2	245	423.3	182.6	0.4	4.4

O nome aglomerante foi dado pois a resposta fornecida para os concretos HPC utilizam-se de elementos adicionais como fly ash e sílica fumê que são elementos aglomerantes e se misturam em uma relação com o cimento propriamente dito, formando a pasta cimentícia nesta família, ao contrário do concreto convencional que possui o cimento como único elemento. O resultado comparativo demonstra uma boa resposta do modelo proposto, sendo esta fornecida em um tempo próximo a 1 segundo. Uma parte percentual da pequena diferença obtida ainda deve-se à distinção entre os componentes utilizados, principalmente o cimento e o aditivo, que no caso deste trabalho possui o efeito plastificante e os utilizados pelos autores citados são aditivos super plastificantes, com ainda maior poder de redução de água e maior dosagem de aceitação. Para que a comparação fosse mais coerente, foi adequado o percentual de aditivo utilizado à média dos outros três trabalhos, ficando próximo de 1% em relação ao peso de cimento. Este valor foi utilizado simplesmente para efeito comparativo, sendo totalmente infactível e inapropriável sua utilização nesta dosagem, por motivos já citados.

Yeh (2007), através da utilização de seu módulo CAD, gerou 25 saídas de misturas de concreto, sendo 4 apresentadas neste trabalho, de acordo com a Tabela 6.12 e logo a seguir, na Tabela 6.13, o mesmo conjunto com as respostas oferecidas pelo modelo deste trabalho.

Tabela 6.12: Resultados módulo CAD

Entradas		Saídas			
Resistência (MPa)	Slump (mm)	Aglomerante	Água	Areia	Brita
25	200	380.8	234.1	795.4	821
25	250	427.1	231.6	788.6	780.4
32.5	250	452.9	217.6	799.1	798
40	150	436	178.8	889	830

Tabela 6.13: Resultados Modelo Proposto

Entradas		Saídas			
Resistência (MPa)	Slump (mm)	Aglomerante	Água	Areia	Brita
25	200	354.4	217.7	880.8	823.5
25	250	404.1	248.3	787.8	794.6
32.5	250	460	241	749	806
40	150	402.4	174.5	905.9	872.2

O modelo proposto, na maioria dos casos, fornece uma resposta com menor quantidade de aglomerante comparado ao modelo treinado por rede neural. No entanto, deve-se atentar que as misturas encontradas por Yeh (2007) possuem em sua formação cimentícea uma mescla de substâncias que formam o aglomerante final e não apenas o cimento. Este conjunto de substâncias incorporadas fazem com que o custo final deste conjunto encontrado pelo algoritmo da ferramenta CAD, mesmo que em quantidades unitárias superiores ao modelo aqui apresentado, se torna um pouco menor que o custo atribuído à mistura do modelo linear. Ademais, mesmo diante de cenários totalmente distintos de condições ambiente, granulometria de agregados, características de cimento e aditivo, conseguiu-se de certa forma uma boa replicação da solução encontrada pelo modelo aqui apresentado em relação ao modelo proposto por Yeh (2007). Verificou-se uma restrição presente em seu modelo, devido à característica do concreto a ser utilizado, que impôs uma inclusão no modelo linear para efeitos de comparação, que diz respeito à variação da quantidade de água em relação aos materiais sólidos, ou o mesmo H presente na equação (5.2), estando no intervalo de 8 a 12%.

6.3.2 Verificação das Leis Universais da Engenharia de Concreto

A seguir, será feita uma análise com várias das soluções encontradas pelo modelo linear proposto e sua validação contrastando com as três leis universais da tecnologia de concreto: Abrams, Lyse e Molinari.

Através de simulação, foram obtidos valores de agregados (na solução de mistura ótima) para diferentes tipos de abatimento e em diferentes valores de relação água/cimento, que acarreta em diferentes valores de resistência e os dados obtidos foram dispostos conforme a Tabela 6.14.

Observa-se que m é a relação total de agregados / cimento e utilizando-se da clássica notação 1 : m, utilizada no método IPT/EPUSP, conforme definido e discutido no Capítulo 2, e para que a abordagem a seguir seja melhor compreendida, será tomado a instância do produto 2 da Tabela 6.7 como exemplo, onde a resposta fornecida daria um valor $m = \frac{totaldeagregados}{cimento} = \frac{12933 + 18540}{4180} = 7,53$, sendo $Qc = 261\frac{Kg}{m^3}$ (ver Tabela 6.8) para o produto considerado (com *slump* de 100 mm e resistência de 25.75 MPa). A mesma ideia lógica foi realizada para vários tipos distintos de especificações técnicas e seus resultados apresentados, já convertidos para o padrão de traço do tipo 1 (cimento) : m (proporção de agregados em relação ao cimento), conforme mostra a Tabela 6.14 para diferentes valores de *slump* em faixas de resistência pré-definidas.

Tabela 6.14: Soluções modelo linear: a/c x m

Resistência (MPa)	m (abatimento 150mm)	m (abatimento 100mm)	m (abatimento 80mm)
20	7,27	9,4	10,4
25	6,7	8,67	9,72
30	6,09	7,93	8,9
35	5,47	7,2	8,08

A Tabela 6.15 fornece o consumo de cimento para cada valor de traço m, obtido na tabela anterior via simulação.

Tabela 6.15: Soluções modelo linear: m x Consumo

m	Consumo Cimento (Kg/m^3)
7,27	263,1
9,4	216,4
10,4	200
6,7	284,3
8,67	233,9
9,72	213,7
6,09	310
7,93	254,4
8,9	232,4

A Figura 6.1 ilustra o quadrante Lei de Lyse e a Figura 6.2 indica o quadrante Lei de Molinari, com os dados tabelados, conforme apresentado no Capítulo 2. Como era esperado, toda simulação apresentada está de acordo com o modelo genérico das três leis universais, representado pela Figura 2.6. A lei de Abrams está satisfeita pela própria curva de cimento utilizada. Conforme observa-se claramente o traço m (agregados) varia de maneira proporcional à relação água-cimento, ou seja, mantido a consistência do concreto, um aumento de resistência mecânica (menor relação a/c) faz com que o uso da quantidade de agregados diminua na mesma proporção e vice-versa, estando totalmente de acordo com a Lei de Lyse e finalmente, qualquer variação do traço m implica em uma variação exponencial para o consumo de cimento a ser utilizado na mistura, conforme denotado pela Lei de Molinari.

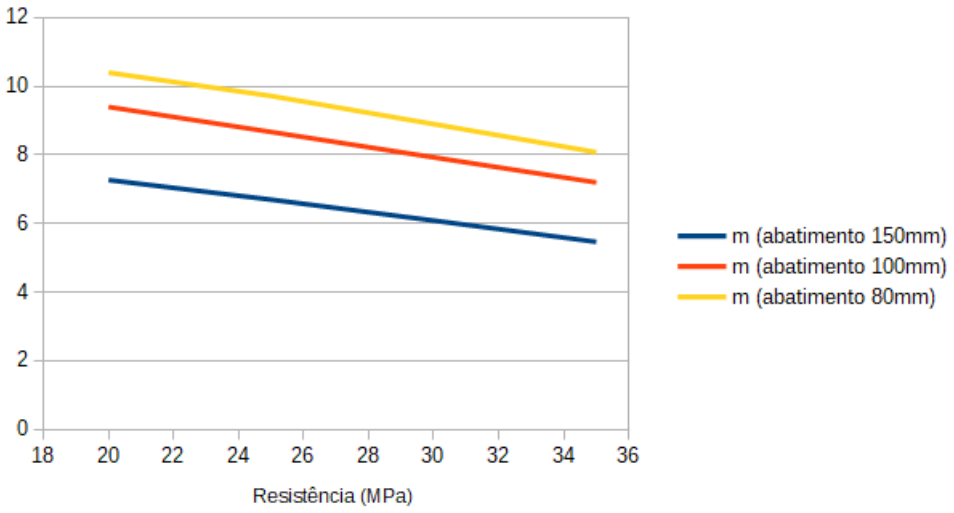

Figura 6.1: a/c x m - Fonte: Próprio autor

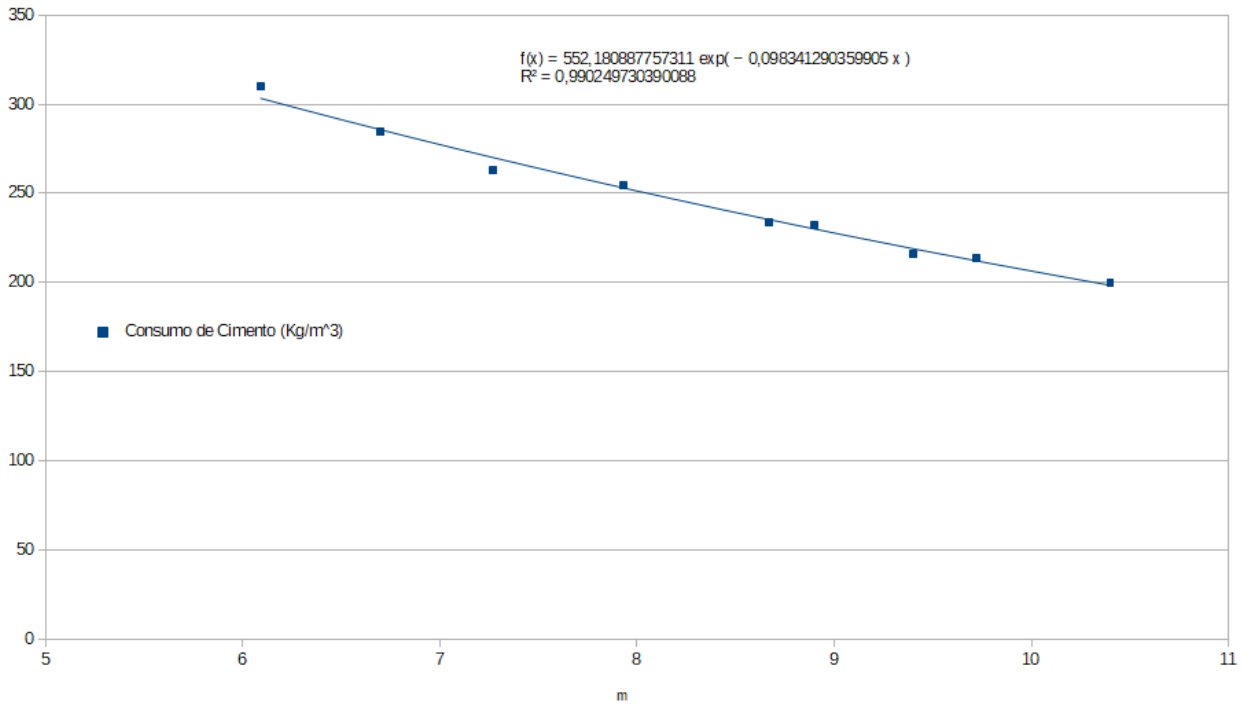

Figura 6.2: m x Consumo_Cimento - Fonte: Próprio autor

Diante do exposto, chega-se a um diagrama de dosagem específico para a indústria objeto deste estudo, sob a forma genérica ilustrada na Figura 2.6.

6.3.3 Análise Financeira

Para uma análise financeira do quão rentável seria a utilização do modelo proposto, foi fornecido pela empresa abordada a demanda volumétrica (m^3) produzida durante os meses de novembro, outubro e setembro, conforme as Tabelas 6.16, 6.17 e 6.18 respectivamente; além disso, os traços unitários (definido como a proporção de ingredientes

para 1 m^3 de concreto), utilizados para atender tal demanda podem ser visualizados na Tabela 6.19. A distinção entre as resistências mecânicas de cada produto aparecem na nomenclatura fck_N, de tal forma que N seja a resistência mínima a ser atingida. Nesta etapa agora faz-se uso da restrição (5.20).

Tabela 6.16: Volume vendido em novembro

Produto	Slump	Tipo	Demanda
fck_20	100+-20	Convencional	158
fck_25	100+-20	Convencional	30
fck_20	100+-20	Bombeado	144
fck_25	100+-20	Bombeado	352
fck_30	160+-20	Bombeado	953

Tabela 6.17: Volume vendido em outubro

Produto	Slump	Tipo	Demanda
fck_20	100+-20	Convencional	268
fck_25	100+-20	Convencional	354
fck_20	100+-20	Bombeado	8
fck_25	100+-20	Bombeado	464
fck_30	160+-20	Bombeado	1115

Tabela 6.18: Volume vendido em setembro

Produto	Slump	Tipo	Demanda
fck_20	100+-20	Bombeado	321
fck_25	100+-20	Bombeado	650
fck_30	160+-20	Bombeado	910

Tabela 6.19: Custos por traços de concreto

Produto	Conteúdo_Ingrediente (Kg/m^3)					Custo R$/m^3
	Cimento	Água	Areia	Brita	Aditivo	
fck 20_C	240	166	890	1065	1.68	155
fck 25_C	260	160	890	1065	1.85	163
fck 20_B	245	169	960	965	1,72	156.2
fck 25_B	265	164	940	965	1,86	163.5
fck 30_B	350	189	860	945	2,5	194.5

Os resultados fornecidos utilizando o modelo proposto podem ser observados na Tabela 6.20.

Tabela 6.20: Custos por traços de concreto CPLEX

Produto	Conteúdo_Ingrediente (Kg/m^3)					Custo R$/m^3
	Cimento	Água	Areia	Brita	Aditivo	
fck 20_C	218.4	145.8	863	1171	1.53	148.7
fck 25_C	236.7	143.3	849.3	1176	1.66	155.7
fck 20_B	226.7	151.3	954.3	1047	1.59	151
fck 25_B	245.8	148.8	940.4	1052	1.72	158.3
fck 30_B	334	182	813.3	1017	2,34	188.7

Analisando-se a demanda produtiva, tem-se que os custos de produção com matéria prima para formação da mistura final foram de $R\$294.783,30$, $R\$393.223,10$ e $R\$333.410,20$ para os meses de novembro, outubro e setembro, respectivamente, totalizando $R\$1.021.416,60$ (um milhão vinte e um mil quatrocentos e dezesseis reais e 60 centavos) para o período considerando, enquanto que os custos para atender a demanda com traços fornecidos pelo modelo proposto foram de $R\$285.505,60$, $R\$380.070,40$ e $R\$323.149,20$, totalizando $R\$988.725,2$ (novecentos e oitenta e oito mil setecentos e vinte e cinco reais e vinte centavos) ocasionando uma economia de $R\$32.691,4$ em três meses de produção ou ainda uma média de 3.2% ao mês. Atenta-se ao fato que foi usado uma folga de 3% no parâmetro de resistência considerado, aumentando o custo final da mistura devido a uma maior necessidade de cimento.

Outro fator bastante relevante é a economia de tempo e dinheiro no quesito redosagem, que sempre geram bastante desperdício através do método iterativo de busca de um composto admissível conforme citado no Capítulo 2. Ademais, devido a possíveis erros humanos durante a execução do método e a obtenção de uma curva de dosagem, uma carga completa pode ser devolvida causando enormes prejuízos. Com o modelo proposto, todo e qualquer tipo de produto pode ter seu resultado ótimo obtido em um segundo com uma excelente redução nos tempos e gastos com pré testes.

7 Conclusões e Propostas Futuras

Neste trabalho, foi desenvolvido um método para otimização da mistura de concreto utilizando-se de uma abordagem pertinente à otimização linear, em um cenário multi produto. Verificou-se, com base em comparações literárias e observações laboratoriais, que o método utilizado obteve êxito em todas as suas abordagens, gerando misturas com o menor custo possível e satisfazendo principalmente as especificações de projeto no fator *slump* e resistência à compressão, além de outros como fator de argamassa e consumo mínimo de cimento.

O modelo apresenta como vantagens o fato de prever os valores correntes para qualquer parâmetro, dentro de uma faixa aceitável, antes mesmo de se iniciar testes empíricos e laboratoriais e também, para a empresa, poder trabalhar com um software em *Excel*, visto que o solver interno do software é adaptado para otimização linear, possuindo o benefício de ser extremamente simples, rápido e eficiente, características essenciais para os objetivos da empresa considerada. Com isso, a mesma pode se desfazer da realização dos testes de dosagem e redosagem que consomem tempo e valor monetário e obviamente fornecem um composto final com um gap de otimalidade considerável, como os que estavam sendo utilizados anteriormente.

O modelo linear mostrou-se altamente aceitável para as faixas utilizadas no dia a dia da empresa, principalmente na adição de aditivo químico, em que através de uma análise e amostragem estatística consegue-se obter uma relação linear confiável do parâmetro *slump* com os ingredientes. Mesmo utilizando-se de abordagem exclusivamente linear, a resposta fornecida pelo modelo é totalmente compatível com os regimentos das leis de Abrams, Lyse e Molinari.

O trabalho também demonstrou as diferenças e vantagens econômicas no uso de aditivos comparativamente ao concreto sem nenhum aditivo incorporado. Em alguns casos, observou-se que a redução do consumo de cimento chegou a mais de 20% para o mesmo tipo de concreto.

Observando-se as vendas da empresa em um trimestre, chegou-se à conclusão que o uso do modelo aqui apresentado forneceu uma economia de mais de 3% ao mês em comparação ao traço que a empresa vinha utilizando. Apesar do objetivo principal ser a criação de uma ferramenta capaz de passar confiança ao engenheiro responsável, evitando-se redosagens, testes laboratoriais para obtenção de um novo traço e problemas na obra, a utilização do modelo conseguiu obter uma economia mensal superior a dez mil reais. Consegue-se também, em um intervalo de tempo próximo a um se-

gundo, obter o consumo de cada ingrediente para qualquer horizonte de planejamento, possibilitando assim efetuar um planejamento de insumos em um tempo bem anterior à execução da mistura propriamente dita e como consequência reduzir estoque dos ingredientes.

Como propostas futuras pretende-se aprimorar a ferramenta desenvolvida e elaborar uma versão para o Solver de Excel, de tal maneira que a empresa possa utilizar e usufruir dos benefícios da mesma. Além disso observou-se que a empresa citada sofre com um problema logístico, em que algumas vezes alguns caminhões ficam parados aguardando todo o tempo para a finalização do processo de carregamento, gerando filas para abastecimento e consequentemente atrasos no início da obra subsequente. Este problema acaba gerando um efeito cascata, pois com a mudança de um caminhão misturador para outro, quase via de regra, mudam-se as especificações do produto e o processo deve ser recomeçado da etapa inicial de pesagem dos agregados, visto que não se aproveita o produto anteriormente utilizado. Ademais, a ferramenta desenvolvida neste trabalho pode ser utilizada como base para outras empresas de concreto em uma abordagem multi período, visando controlar estoques de matéria prima e produto final (Neste caso específico, a empresa deve atuar com blocos de concreto e não com o mesmo em estado fresco, visto que não há como estocar nesta situação, que é o caso da empresa abordada).

Referências

[1] P. K. Mehta and P. J. Monteiro, *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2 ed., 2014.

[2] W. D. Callister Junior and D. G. Rethwisch, *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 8 ed., 2012.

[3] R. Rixom and N. Mailvaganam, *Chemical admixtures for concrete*. Crc Press, 3 ed., 1999.

[4] F. PEDROSO, "Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo," *Revista Concreto & Construções. Ano XXXVII*, no. 53, 2009.

[5] J. A. R. d. Lima, *Avaliação das conseqüências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas.* PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2010.

[6] "Aditivos: a química a favor da qualidade e da produtividade." `http://sinaprocim.org.br/portal/wp-content/uploads/2015/10/produtos-de-cimento-02.pdf`, 2015.

[7] P. K. Mehta, P. J. Monteiro, and A. Carmona Filho, *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 1994.

[8] H. M. T. Lopes, *Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2019.

[9] P. Helene and B. Tutikian, *Dosagem dos concretos de cimento Portland*. São Paulo: Geraldo Cechella Isaia, ed. Concreto: Ciência e Tecnologia, IBRACON, 1 ed., 2011. cap. 12.

[10] A. M. Neville, *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini, 2 ed., 1997.

[11] L. A. FALCÃO BAUER *et al.*, "Materiais de construção," *Livros Técnicos e científicos Editora S/A-1985*, 1994.

[12] V. C. Campiteli, "Concreto de cimento portland: um método de dosagem," *Revista UM*, no. 20, 2004.

[13] A. J. BOGGIO, "Estudo comparativo de métodos de dosagem de concreto de cimento portland. 2000. 182 f," *Monografia (Pós-graduação)–Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre*, 2000.

[14] J. Vasconcellos, "Fundamentos da dosagem racional dos concretos," *Palestra proferida do Ibracon em 30/11/1977, em São Paulo*, 1977.

[15] D. R. d. Silva, *Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade.* PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.

[16] B. M. Toralles, Á. F. do Couto, G. S. F. Nogueira, G. F. B. Sandoval, G. P. Alves, I. C. de Souza, and R. S. Paulino, "Estudo comparativo de diferentes métodos de dosagem de concretos convencionais," *REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA*, vol. 10, no. 1, pp. áginas–184, 2018.

[17] G. C. Isaia *et al.*, "Concreto: ensino, pesquisa e realizações," *São Paulo: IBRACON*, vol. 2, 2005.

[18] "Aditivos para concreto." `http://www.abesc.org.br/pdf/manual.pdf`, 2007.

[19] C. T. Hartmann and P. R. Helene, "Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento portland," Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

[20] S. Ahmad and S. Alghamdi, "A statistical approach to optimizing concrete mixture design," *TheScientificWorldJournal*, vol. 2014, 2014.

[21] M. Shariq, J. Prasad, and A. Ahuja, "Optimization of concrete mix proportioning," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, no. 7, pp. 22–28, 2012.

[22] S. Ahmad, "Optimum concrete mixture design using locally available ingredients," vol. 32, 2007.

[23] R. Saboya, E. Tozzo, S. Cotrim, E. Galdamez, and G. C. Lapasini Leal, "Optimization of aggregate mixture to paver production using linear programming," *DYNA*, vol. 84, pp. 42–48, 2017.

[24] J.-H. Lee, Y.-S. Yoon, and J. Kim, "A new heuristic algorithm for mix design of high-performance concrete," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 16, 2012.

[25] I.-C. Yeh, "Computer-aided design for optimum concrete mixtures," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 193–202, 2007.

[26] K. Sobolev, "The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, pp. 901–907, 2004.

[27] A. Lotfy, K. Hossain, and M. Lachemi, "Lightweight self-consolidating concrete with expanded shale aggregates: Modelling and optimization," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 9, 2015.

[28] M. Moini, "The optimization of aggregate blends for sustainable low cement concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 93, p. 627–634, 2015.

[29] C. EFFTING, "Propriedades do concreto fresco e endurecido," *Joinville: Udesc*, vol. 59, 2014.

[30] P. Manuel and D. Dal Molin, "Influência do tipo de agregado graúdo na dosagem de concretos convencionais," *SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO O BETÃO NAS ESTRUTURAS*, pp. 9–16, 2005.

[31] B. F. Tutikian, "Método para dosagem de concretos auto-adensáveis," Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

[32] C. Corrêa, "Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento portland tipo cpiii-40," in *Anais do 52 Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, Ceará, Brasil*, 2010.

[33] F. De Larrard, *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. CRC Press, 1999.

[34] P. M. Rodolpho, "Estudo do comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada," Master's thesis, Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, 2007.

[35] M. DeRousseau, J. Kasprzyk, and W. Srubar III, "Computational design optimization of concrete mixtures: A review," *Cement and Concrete Research*, vol. 109, pp. 42–53, 2018.

[36] T. Roshavelov, "Prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning," *Cement and Concrete Research - CEM CONCR RES*, vol. 35, pp. 831–835, 2005.

[37] C. Okere, "Simplex-based concrete mix design," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 5, pp. 46–55, 2013.

[38] I. Yeh, "Modeling slump flow of concrete using second-order regressions and artificial neural networks," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, pp. 474–480, 2007.

[39] G. d. R. Gonçalves, "Análise da influência da água de amassamento contaminada por elementos químicos oriundos de mineração de carvão nas propriedades do concreto," 2017.