



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

JOSÉ ANDRÉ GOMES DE ANDRADE

DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DOIS FATORES NA RESISTÊNCIA DO
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (CPV-ARI).

JOÃO PESSOA - PB

2023

JOSÉ ANDRÉ GOMES DE ANDRADE

DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DOIS FATORES NA RESISTÊNCIA DO
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (CPV-ARI).

Trabalho Final de Curso apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento ao pré-requisito para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^{ta}. Dra. Fabíola Dias da Silva Curbelo

João Pessoa - PB

2023

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A555d Andrade, José André Gomes de.

DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DOIS FATORES NA RESISTÊNCIA DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (CPV-ARI) / José André Gomes de Andrade. - João Pessoa, 2023.

47 f.

Orientação: Fabíola Dias da Silva Curbelo. TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Cimento. 2. Planejamento fatorial. 3. Blaine. 4. Perda ao fogo. 5. Resistência aos 28 dias. I. Curbelo, Fabíola Dias da Silva. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 66.01(043.2)

JOSÉ ANDRÉ GOMES DE ANDRADE

DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DOIS FATORES NA RESISTÊNCIA DO
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (CPV-ARI).

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba, pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Aprovado em 07 de junho de 2023

BANCA EXAMINADORA



Prof^ª Fabíola Dias S. Curbelo
Mat. 2453534

Prof^ª. Dr^ª. Fabíola Dias da Silva Curbelo

Orientadora – UFPB

Maria Eduarda Araújo Pessoa

Maria Eduarda Araújo Pessoa

Examinadora externa



Raphael Ribeiro da Silva

Examinador externo

DEDICATORIA

Dedico este trabalho a minha família e em especial aos meus pais, que sempre me apoiaram incondicionalmente em minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio, paciência e amor incondicional em todos os momentos.

Ao meu gestor, Vilmar Manoel, por todos os ensinamentos, paciência e suporte durante e após o estágio, contribuindo para o meu crescimento profissional.

A minha orientadora, Fabíola Dias da Silva Curbelo, pelo suporte, pelas correções e pelos valiosos ensinamentos em sala de aula, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e colegas do curso de Engenharia Química, pelos momentos compartilhados ao longo da graduação, que enriqueceram minha formação acadêmica.

Aos amigos do estágio e da graduação, pelo apoio e companheirismo constantes em todas as situações, tornando essa jornada mais leve e prazerosa.

Por fim, agradeço a todos os amigos e familiares por terem me dado força e motivação para nunca desistir dos meus objetivos, sendo pilares importantes no meu caminho até a conclusão deste curso.

RESUMO

No Brasil, o mercado de cimento é considerado um dos mais competitivos do mundo, com diversas empresas atuando no setor, como Votorantim Cimentos, Cimento Nacional, CSN Cimentos, entre outras. Com o objetivo de se destacarem no mercado, as indústrias estão cada vez mais buscando maneiras de melhorar a qualidade do cimento. Uma parte dessa busca envolve a determinação de parâmetros que influenciam na resistência aos 28 dias do cimento. Na indústria cimenteira, diversos parâmetros são analisados diariamente, incluindo o Blaine e a porcentagem de perda ao fogo. Para compreender os efeitos desses parâmetros na resistência, podem ser utilizadas algumas técnicas de planejamento, como o método de planejamento fatorial, recomendado para estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Os resultados mostram que o Blaine e a porcentagem de perda ao fogo são fatores extremamente importantes na variação da resistência à compressão aos 28 dias.

Palavras-chave: cimento, planejamento fatorial, Blaine, perda ao fogo e resistência aos 28 dias.

ABSTRACT

In Brazil, the cement market is considered one of the most competitive in the world, with several companies operating in the sector, such as Votorantim Cimentos, Cimento Nacional, CSN Cimentos, among others. In order to stand out in the market, industries are increasingly seeking ways to improve the quality of cement. Part of this pursuit involves determining parameters that influence the 28-day strength of the cement. In the cement industry, various parameters are analyzed on a daily basis, including Blaine and the percentage of fire loss. In order to understand the effects of these parameters on strength, some planning techniques can be used, such as factorial planning, recommended for studying the effects of two or more influencing variables. The results show that Blaine and the percentage of fire loss are extremely important factors in the variation of compressive strength at 28 days.

Keywords: cement, factorial design, Blaine, loss on ignition, and 28-day strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma de produção do cimento.....	15
Figura 2: Jazida de calcário	16
Figura 3: Alimentação de calcário no britador primário.....	17
Figura 4: Métodos de empilhamento de matéria-prima.....	18
Figura 5: Esteira dosadora	19
Figura 6: Esquema de funcionamento do moinho vertical de rolos	21
Figura 7: Silo de homogeneização de farinha	21
Figura 8: Funcionamento da torre de ciclones e processo de clínquerização.....	23
Figura 9: Forno rotativo.....	25
Figura 10: Resfriador de clínquer.....	26
Figura 11: Fluxograma da moagem de cimento	27
Figura 12: Diagrama de fases do clínquer	28
Figura 13: Permeabilímetro de Blaine.....	29
Figura 14: Forno mufla.....	30
Figura 15: Ensaio de resistência à compressão	30
Figura 16: Tabela de distribuição t-Student.....	37
Figura 17: Comportamento da resistência aos 28 dias variando a porcentagem de perda ao fogo e mantendo o Blaine constante	41
Figura 18: Comportamento da resistência aos 28 dias variando o Blaine e mantendo a porcentagem de perda ao fogo constante	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais reações do processo de sintetização do clínquer.....	24
Tabela 2: Reações de combustão durante o cozimento	24
Tabela 3: Dados das amostras de cimento utilizadas.....	33
Tabela 4: Representação dos fatores com sinais matemáticos	33
Tabela 5: Interação entre os dois fatores	34
Tabela 6: Média e desvio padrão dos valores de nível alto e baixo de porcentagem de perda ao fogo.....	35
Tabela 7: Média e desvio padrão dos valores de nível alto e baixo de Blaine	35
Tabela 8: Valores de t-Student calculados	36
Tabela 9: Média da resistência aos 28 dias para valores de nível alto e baixo de perda ao fogo	38
Tabela 10: Média da resistência aos 28 dias para valores de nível alto e baixo de Blaine.....	38
Tabela 11: Média da resistência aos 28 dias para valores de nível alto e baixo da interação entre os fatores.....	39
Tabela 12: Influência dos fatores na resistência a 28 dias.....	39
Tabela 13: Influência das interações dos fatores na resistência aos 28 dias.....	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1.OBJETIVO GERAL.....	13
2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.HISTÓRIA DO CIMENTO.....	14
3.2.PROCESSO PRODUTIVO	15
3.2.1.EXTRAÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA E BRITAGEM	16
3.2.2.PRÉ-HOMONEGEIZAÇÃO	17
3.2.3.MOAGEM DE CRU	18
3.2.4.CLINQUERIZAÇÃO.....	21
3.2.5.MOAGEM DE CIMENTO	26
3.3.MINERALOGIA DO CLINQUER E RESISTÊNCIA DO CIMENTO	27
3.4.ENSAIOS DE QUALIDADE DO CIMENTO PORTLAND	28
4. METODOLOGIA	31
4.1.DISTRIBUIÇÃO T-STUDENT	31
4.2.PLANEJAMENTO FATORIAL	31
5. RESULTADOS	35
5.1.PLANEJAMENTO FATORIAL E DISTRIBUIÇÃO T- STUDENT	35
6. CONCLUSÃO	43
7. REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

A história do cimento iniciou-se a mais de 5.000 anos, quando os antigos egípcios começaram a utilizar uma mistura de calcário e argila para construir as pirâmides de Gizé, mas somente em 1824, o químico britânico Joseph Aspdin patenteou o cimento Portland, que recebeu esse nome devido à sua semelhança com a pedra de Portland, na Inglaterra. A produção do cimento é realizada a partir da mistura de calcário, argila e alguns aditivos, que são moídos e depois queimados em altas temperaturas em um forno rotativo (BATTAGIN, 2009).

Hoje, o cimento é amplamente utilizado na construção de edifícios, pontes, estradas e outras infraestruturas. No Brasil, o mercado de cimento é considerado um dos mais competitivos do mundo, com diversas empresas atuando no setor, como a Votorantim Cimentos, Cimento Nacional, CSN Cimentos, etc. O mercado brasileiro tem sido impactado nos últimos anos pela crise econômica e pela queda na demanda, mas a expectativa é que haja uma recuperação gradual nos próximos anos, impulsionada pelo aumento dos investimentos em infraestrutura e pela retomada do setor imobiliário (SOUZA, 2022)

A competição no setor de cimento é intensa. As empresas competem em termos de preço, qualidade, inovação e eficiência para ganhar participação de mercado e maximizar seus lucros. A qualidade do cimento é de extrema importância, tendo em vista que afeta diretamente a segurança e durabilidade das estruturas em que é usado. Quando apresenta qualidade abaixo do padrão, pode levar a problemas como rachaduras, deformações e até mesmo colapsos estruturais.

A qualidade do cimento depende de muitos fatores como a matéria-prima utilizada, o processo produtivo, a formulação, a presença dos aditivos, etc. Dentre os diversos fatores existentes que podem afetar o desempenho do cimento, pode-se citar o Blaine e a perda ao fogo, ambos são especificados pela ABNT NBR 5733, como requisitos de qualidade para o cimento Portland (ABNT, 1991).

Uma propriedade importante e usada como controle de qualidade do cimento é a sua resistência a compressão (BUSETTO, 2013). Com base nisso, é bastante enriquecedor realizar estudos internos acerca de fatores como, porcentagem de superfinos, estruturas cristalinas e parâmetros de controle normativo como Blaine e perda ao fogo. Diante disso, o referente estudo teve por objetivo determinar como duas dessas variáveis influenciam na resistência e na qualidade do cimento.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

Determinar a influência do Blaine e da perda ao fogo na resistência à compressão aos 28 dias do Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI).

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar uma revisão do funcionamento de uma fábrica de cimento;
- Analisar dados de Blaine e perda ao fogo de amostras do Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI);
- Determinar os parâmetros que influenciam na resistência do Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.HISTÓRIA DO CIMENTO

Há mais de 5.000 anos, os antigos egípcios começaram a utilizar uma mistura de calcário e argila para construir as pirâmides de Gizé, marcando o início da história do cimento. Posteriormente, as grandes obras gregas e romanas foram erguidas com o uso de solos de origem vulcânica, que possuíam propriedades de endurecimento quando em contato com a água (KAEFER, 1998).

Por volta de 1756, o engenheiro John Smeaton procurava por um aglomerante que endurecesse, mesmo em presença de água, para facilitar a reconstrução do Farol de Eddystone, na Inglaterra. Durante suas tentativas, ele descobriu que uma mistura calcinada de calcário e argila se tornava tão resistente quanto as pedras usadas nas construções, depois de seca. Trinta e três anos depois, em 1789, o engenheiro James Parker buscou a proporção ideal de calcário e argila para produzir o melhor cimento (CIMENTO ITAMBÉ, 2008).

Joseph Aspdin, um pedreiro, registrou uma patente em 1824 para a sua descoberta, a qual deu o nome de cimento Portland em homenagem à Portland Stone, uma pedra arenosa amplamente utilizada em construções na região de Portland, na Inglaterra. Em sua solicitação de patente, ele descreveu a moagem úmida de calcário com argila, até que se transformasse em um pó fino e impalpável. A mistura seca era, então, moldada em blocos e calcinada em fornos antes de ser moída em uma fina consistência, enquanto a água era evaporada pela exposição ao sol ou por meio de radiação de calor através de um cano com vapor (CIMENTO ITAMBÉ, 2008).

No Brasil, estudos para aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland ocorreram em 1888, quando Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica situada em Sorocaba-SP. A usina de Rodovalho lançou, em 1897, sua primeira produção – o cimento Santo Antônio, operando até 1904, quando interrompeu suas atividades. A usina voltou a operar em 1907, mas extinguiu-se definitivamente em 1918 (BATTAGIN, 2009).

Ao longo das primeiras décadas do século XX, outras empresas surgiram no Brasil, como a Companhia Brasileira de Cimento Portland Itaú, em Minas Gerais, e a Companhia Nacional de Cimento Portland, em Pernambuco. Essas empresas ajudaram a consolidar o mercado nacional de cimento e contribuíram para o desenvolvimento da infraestrutura do país.

Hoje, o mercado brasileiro de cimento é um dos mais competitivos do mundo, com diversas empresas atuando no setor e uma produção anual que ultrapassa os 50 milhões de toneladas. O cimento Portland continua sendo o tipo mais utilizado no país, sendo empregado na construção de edifícios, infraestrutura urbana, rodovias e outras obras de grande porte (SOUZA, 2022).

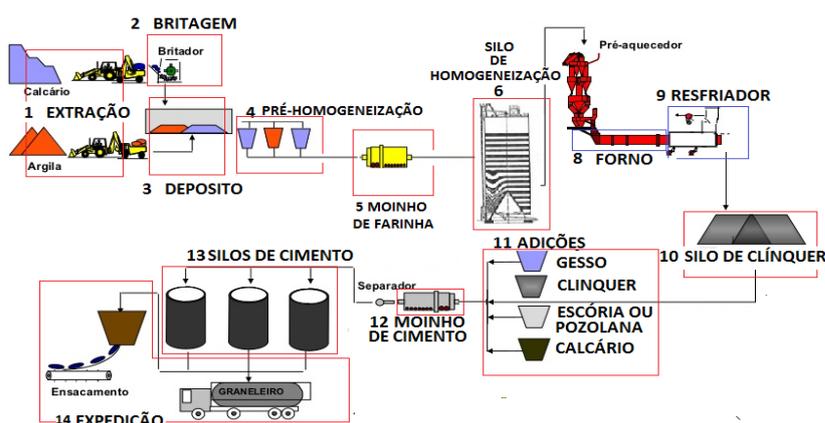
3.2.PROCESSO PRODUTIVO

Durante a produção do cimento Portland, as matérias-primas, incluindo calcário, argila, minério de ferro e pó de granito, passam por inúmeros estágios de transformações físico-químicas, até chegar ao estado final de cimento Portland. Esse processo envolve uma série de operações unitárias e controles rigorosos para manter a estabilidade do processo.

Durante a preparação do cimento Portland, além das matérias-primas historicamente utilizadas, são adicionadas outras substâncias com a finalidade de ajustar os parâmetros químicos da mistura moída e garantir que os mesmos estejam dentro das especificações exigidas pela NBR 11578, que é fundamental para assegurar a qualidade do produto final.

Na produção do cimento, várias etapas e operações unitárias são utilizadas para obtenção do produto final, como mostra a Figura 1. As etapas de fabricação são: extração da matéria-prima, britagem, pré-homogeneização, moagem de cru, clínquerização, moagem de cimento e expedição.

Figura 1: Fluxograma de produção do cimento.



Fonte: Magnavita e Bourguignon, 2009.

3.2.1 EXTRAÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA E BRITAGEM

Britagem é a etapa de fragmentação de minérios, que tem por objetivo reduzir o material vindo da mina até um tamanho que possa ser prosseguido para o beneficiamento. A britagem pode ser composta, também, por múltiplas etapas, primária, secundária e terciária, dependendo do material britado e para cada um desses estágios, podem ser usados diferentes britadores (VIEIRA e CANGUSSU, 2020).

Em uma mina de calcário (Figura 2), o processo inicia-se com a realização de estudos geológicos para avaliar a qualidade e a quantidade de material presente na jazida. A extração do calcário nas cavas ocorre através de detonação. Os locais onde serão extraídos são marcados, perfurados e preenchidos com o material explosivo. A intensidade das detonações depende do local onde será extraído o calcário e da quantidade de material que será obtido.

Figura 2: Jazida de calcário.



Fonte: Acervo pessoal.

O calcário obtido através da detonação possui uma granulometria muito elevada, o que o torna inviável de ser transportado diretamente para as moagens. Em decorrência disso, o calcário obtido é conduzido até o britador primário (Figura 3), onde o material será fragmentado. Em seguida, o material é transportado para o britador secundário, onde é reduzido ainda mais.

Figura 3: Alimentação de calcário no britar primário.



Fonte: Acervo pessoal.

Após o processo de britagem, o material resultante é transportado para a linha de produção, onde é combinado com outros materiais para produzir o cimento. A qualidade do calcário e do processo de britagem são essenciais para garantir que o cimento final tenha as características desejadas e seja de alta qualidade.

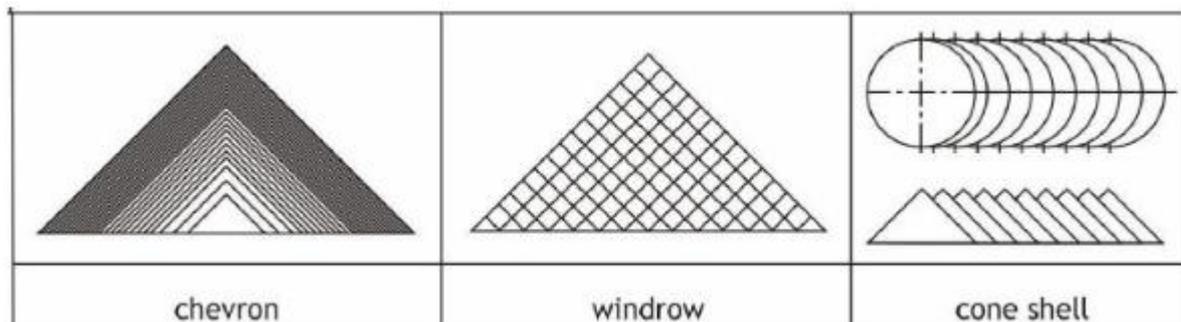
3.2.2 PRÉ-HOMOGENEIZAÇÃO

A pré-homogeneização é um processo importante na produção de cimento, que tem como objetivo garantir que as matérias-primas sejam misturadas de forma adequada antes de serem alimentadas no moinho de cru e, subsequentemente, no forno rotativo para a produção do clínquer.

Durante a pré-homogeneização, as matérias-primas são armazenadas em pilhas ao ar livre ou em silos e misturadas em proporções precisas, com o objetivo de obter uma composição química uniforme. Esse processo ajuda a garantir que o cimento produzido atenda às especificações técnicas e de qualidade necessárias.

Existem diversos métodos de empilhamento utilizados (Figura 4), cada um com suas peculiaridades. O objetivo principal do empilhamento das matérias-primas é homogeneizar e manter este material no mais elevado padrão de qualidade.

Figura 4: Métodos de empilhamento de matéria-prima.



Fonte: Guarany's, 2013.

No processo Chevron, o material é empilhado em movimento linear, da esquerda para direita, sobre a linha central da pilha. Esse procedimento ocasiona a segregação do material, fazendo com que as partículas mais finas sejam concentradas na parte central da pilha, enquanto as partículas mais grossas localizam-se na superfície e no fundo da pilha.

O método Windrow envolve o empilhamento sucessivo de cordões elementares ao lado e sobre os anteriormente construídos, na direção longitudinal da pilha. Esse método previne a segregação e assegura ainda mais a distribuição uniforme de partículas finas e grossas por toda a pilha (OLIVEIRA, 2016).

O terceiro método mais comum é o Cone Shell, geralmente utilizado em situações em que a homogeneização não é necessária, ou seja, a pilha é formada pelo depósito do material em um único cone com posição fixa. Quando o cone está cheio, ele é movido para uma nova posição e um novo cone é formado (OLIVEIRA, 2016).

3.2.3 MOAGEM DE CRU

A produção de farinha assimila o processo de secagem e moagem das matérias-primas (argila, calcário e corretivos) em seu estado original, adequadamente dosadas e alimentadas ao moinho. O propósito da moagem de cru é preparar uma mistura homogênea, com composição química e granulometria uniforme, a fim de assegurar a máxima combinação das reações no processo de calcinação e clínquerização (DINIZ, 2019).

Durante o processo de moagem, é fundamental controlar a dosagem das matérias-primas no moinho de cru, como numa esteira dosadora (Figura 5), a fim de garantir a produção de farinha com composição e módulos químicos conhecidos e devidamente ajustados. Essa dosagem deve ser continuamente corrigida de acordo com os padrões previamente definidos.

Figura 5: Esteira dosadora.



Fonte: Acervo pessoal.

Para assegurar a qualidade do clínquer e, conseqüentemente, do cimento produzido, é imprescindível controlar rigorosamente a composição e os módulos químicos da farinha. As relações entre os teores de óxidos de cálcio, sílica, ferro e alumínio têm um impacto significativo na queima desses elementos. Para controlar essas relações, são utilizados os módulos de controle da mistura, sendo os mais comuns o Fator de Saturação de Cal (FSC), o Módulo de Sílica (MS) e o Módulo de Alumina (MA) (DINIZ, 2019).

O Fator de Saturação de Cal (FSC) é calculado a partir da razão entre a quantidade (%) de óxido de cálcio presente no cru e no clínquer e os demais compostos que reagem (conforme a equação 1). Na produção de cimento Portland, o FSC (%) da farinha deve ser mantido dentro de uma faixa entre 90% e 100%. Um FSC desregulado pode causar dificuldades na queima, maior consumo de combustível e um alto teor de cal não reagido.

$$FSC = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (1)$$

O Módulo de Sílica (MS) é calculado a partir da razão entre a quantidade (%) de silicato e materiais fundentes, que são os óxidos de ferro e alumínio (conforme a equação 2). Na produção de cimento Portland, é recomendado que o MS esteja dentro de uma faixa entre 1,7 a 3,1. Um alto teor de MS pode dificultar a queima e desgastar o refratário do forno, enquanto um MS muito baixo pode favorecer o aumento da fase líquida e a formação de colagens.

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

O Módulo de Alumina (MA) é calculado a partir da razão entre a quantidade (%) de óxido de alumínio e óxido de ferro (conforme a equação 3). No Brasil, é recomendado que o MA varie entre 1,2 a 3,2. Um baixo teor de MA pode diminuir a viscosidade da fase líquida e melhorar a granulação do clínquer.

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

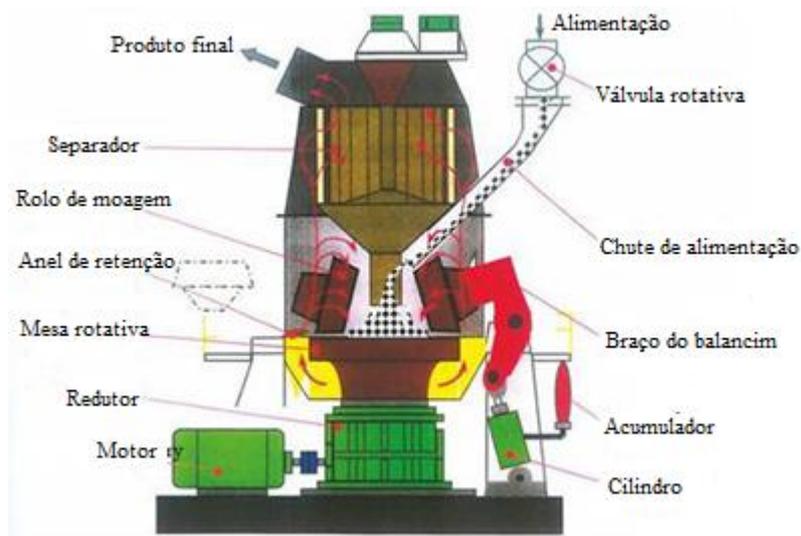
Para garantir a estabilidade e a adequação do sistema de moagem, é necessário considerar vários fatores que atendam aos requisitos de secagem e moagem das matérias-primas. Isso inclui as características mineralógicas dos materiais, o teor de umidade e a granulação dos materiais alimentados. Em geral, os parâmetros a serem avaliados variam de acordo com as características de cada material.

Para atender aos requisitos do produto e garantir a adequação do processo às diferentes características de cada material, os circuitos de moagem podem ser divididos em relação ao processo (úmido ou seco) e ao tipo de moinho (vertical, de rolos, de bolas e tubular de bolas), podendo ser circuito aberto ou fechado (DINIZ, 2019).

O moinho vertical de rolos (Figura 6) é amplamente empregado na produção de farinha crua. A alimentação do material é feita através de correias transportadoras, que o levam até a calha de alimentação do moinho. Ao atingir a mesa rotativa, o material é afastado para as extremidades por forças centrípetas, onde ocorre a compressão por meio de rolos, reduzindo o tamanho das partículas até que se tornem grãos finos.

A base do moinho é alimentada com gases quentes que têm a função de secar e transportar o material comprimido até o separador. O separador é uma "gaiola" rotativa responsável por separar os grãos finos dos grossos. Os grãos finos saem pela parte superior do moinho, enquanto os grossos retornam à mesa para passarem novamente pelo processo de compressão.

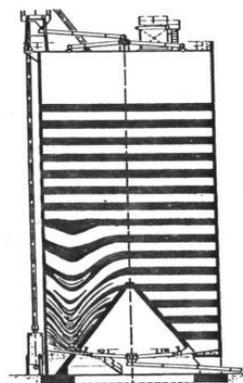
Figura 6: Esquema de funcionamento do moinho vertical de rolos.



Fonte: CHAENG (Great Wall Machinery) vertical mill slag powder processing.

Depois de a farinha ser moída, o material é direcionado para o silo de homogeneização, representado na Figura 7, que através da sua geometria cônica próxima à saída do material, faz com que as camadas de material se misturem proporcionando a homogeneização. O silo é equipado com dispositivos de enchimento e esvaziamento, bem como sensores de nível para monitorar a quantidade de farinha armazenada. Além disso, é importante que o silo esteja equipado com um sistema de ventilação adequado para evitar a formação de umidade, o que pode prejudicar a qualidade da farinha.

Figura 7: Silo de homogeneização da farinha.



Fonte: <http://www.geocities.ws/dmatias/trabalhos/cimento>.

3.2.4 CLINQUERIZAÇÃO

Existem três tipos distintos de processo de clinkerização via seca, cada um com sua própria técnica construtiva. São eles:

1. Processo via seca sem sistema de pré-aquecimento por suspensão;
2. Processo via seca com sistema de pré-aquecimento por suspensão com quatro estágios de ciclones;
3. Processo via seca dotado com sistema de pré-aquecimento em suspensão com quatro a seis estágios de ciclones, além do sistema de pré-calcinação integrado à torre de ciclones.

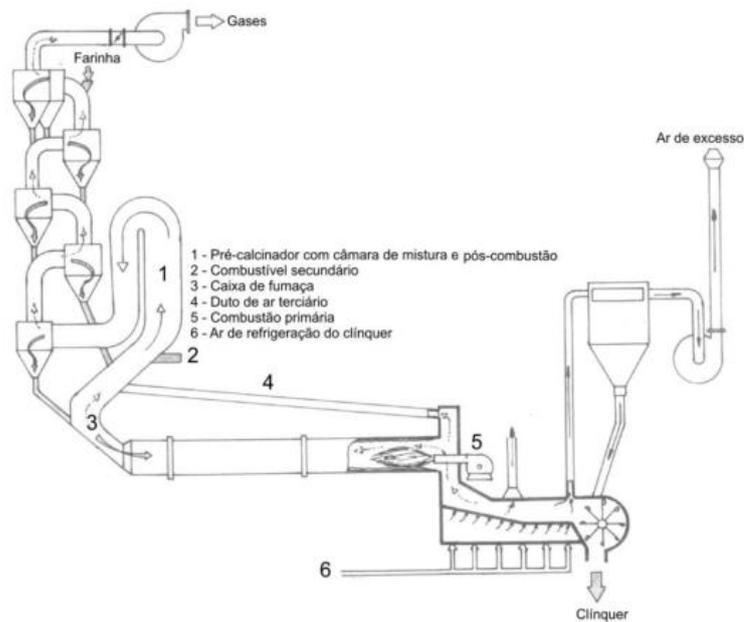
Cada um desses processos apresenta características específicas e são aplicados em diferentes situações, dependendo das condições da matéria-prima, do tipo de cimento a ser produzido, da capacidade da planta, entre outros fatores (FARENZENA, 1995).

Atualmente, o sistema mais comum utilizado na indústria de cimento é composto por uma torre de pré-aquecimento em suspensão simples, equipada com cinco estágios de ciclones e pré-calcinador, como mostrado na Figura 8. O processo de clinquerização é dividido em zonas: zona de desidratação, zona de descarbonatação, zona de queima ou clinquerização e zona de resfriamento. Cada uma dessas zonas ocorre em faixas de temperatura distintas e tem diferentes finalidades.

A farinha crua é introduzida no topo do sistema de pré-aquecedores, no duto de ascensão superior, entre o primeiro e o segundo estágios, e pré-aquecida em contracorrente aos gases quentes durante seu percurso de descida até a entrada do forno, passando por cada etapa de ciclones (Figura 8). Os ciclones são separadores que têm como função separar misturas gás-sólido.

Os gases quentes provenientes do forno entram no estágio interno dos ciclones e são aspirados ascendente através de uma série de dutos de troca térmica, conhecidos como dutos de ascensão de gases.

Figura 8: Funcionamento da torre de ciclones e processo de clinquerização.



Fonte: Farenzena, 1995.

A principal função do pré-calcinador, localizado no ponto 1 da Figura 8, é distribuir a energia térmica necessária para o processo de calcinação e clinquerização em dois pontos distintos, permitindo a descarbonatação dos materiais crus em cerca de 80-95%.

Ao manter a carga térmica na zona de queima em níveis iguais, é possível aumentar significativamente a produção, aumentando também o grau de enchimento do forno. Em geral, cerca de 60-65% do combustível é queimado no pré-calcinador (ponto 2), utilizando-se o ar terciário proveniente do resfriador de clínquer (ponto 4) para a queima (DINIZ, 2019).

As Tabelas 1 e 2 apresentam as principais reações que ocorrem a cada intervalo de temperatura da torre até o final do forno, destacando os compostos do clínquer formados durante o processo de sinterização.

Tabela 1: Principais reações do processo de sinterização do clínquer.

TEMPERATURA (°C)	REAÇÃO
100-200	Liberação de água livre
500-700	Desidroxilação dos argilominerais; Transformação do quartzo- α em quartzo- β .
700-900	Decomposição dos carbonatos, com liberação de CO_2 ; As primeiras reações de estado sólido ocorrem, conduzindo à formação de aluminatos e ferro aluminatos cálcicos [$C_1_2A_7$ e $C_2(AF)$] e início de formação da belita ($2CaO + SiO_2 \rightarrow Ca_2SiO_4$);
900-1200	Conversão de ferro aluminatos e aluminatos em C_4AF e C_3A ; Formação da belita, a partir da sílica remanescente e dos cristais de cal livre.
1200-1350	Cristalização das primeiras alitas ($\sim 1200^\circ C$); A partir de $\sim 1280^\circ C$, inicia-se a formação de fase líquida a partir dos aluminatos e ferro aluminatos cálcicos.
Acima de 1350	Desenvolvimento dos cristais de alita.

Fonte: CENTURIONE, 1993.

Tabela 2: Reações de combustão durante o cozimento.

$CaCO_3(s) \xrightarrow{900^\circ C} CaO(s) + CO_2(g)$	Descarbonatação do $CaCO_3$
$MgCO_3(s) \rightarrow MgO(s) + CO_2(g)$	Descarbonatação do $MgCO_3$
$2CaO(s) + SiO_2(s) \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2(s)$	Formação da Belita (C_2S)
$3CaO(s) + SiO_2(s) \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2(s)$	Formação da Alita (C_3S)
$3CaO(s) + Al_2O_3(s) \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3(s)$	Formação do Aluminato (C_3A)
$4CaO(s) + Al_2O_3(s) + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3(s)$	Formação da Ferrita (C_4AF)

Fonte: CENTURIONE, 1993.

O equipamento responsável pela clinquerização é um forno rotativo (Figura 9). A farinha, que já passou pelo processo de descarbonatação no pré-calcinador, inicia, então, a

clinkerização. O deslocamento da farinha no interior do forno se dá pela rotação, combinada com a inclinação do forno. Quanto mais rápido se alcançar a temperatura de cozedura, entre 1200 °C e 1450 °C, maior a probabilidade de se obter um clínquer de qualidade.

Figura 9: Forno rotativo.

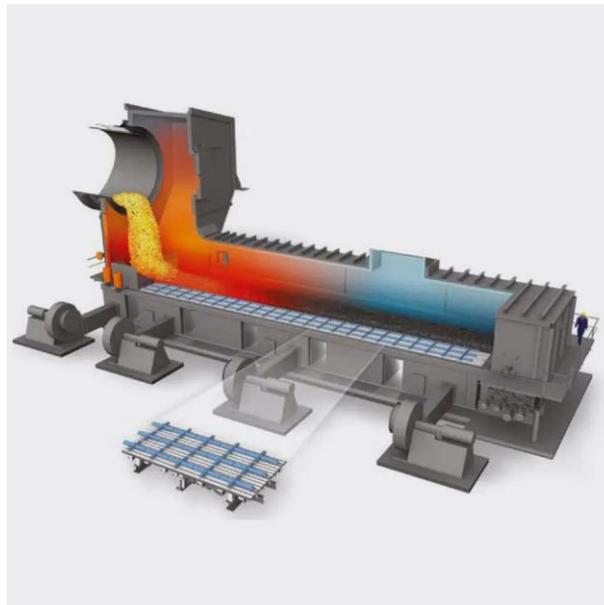


Fonte: Acervo pessoal.

Os combustíveis utilizados em fornos rotativos de cimento podem ser de origem fóssil, como o carvão mineral, o coque de petróleo e o gás natural, ou de origem renovável, como a biomassa e o resíduo sólido urbano (RSU). O uso de combustíveis renováveis tem se tornado cada vez mais comum na indústria de cimento, como forma de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade.

Após o processo de cozedura, o material passa por um sistema de resfriamento, mostrado na Figura 10, que tem por objetivo reduzir a temperatura do clínquer assegurando uma boa qualidade do produto. O resfriador pendular possui uma zona inicial com uma suave inclinação, uma zona de transporte do clínquer com grelhas móveis e fixas e, por fim, um britador para ajustar a granulometria do clínquer resfriado.

Figura 10: Resfriador de clínquer.



Fonte: Diniz, 2019.

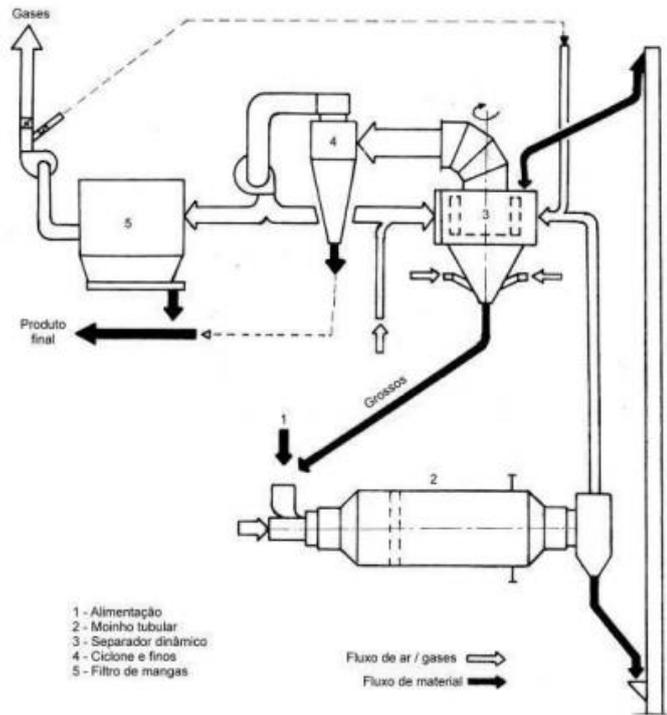
O arrefecedor e o forno formam um conjunto interdependente no processo de clínquerização, com o objetivo de aumentar a produtividade e qualidade do produto. Enquanto o arrefecedor busca reduzir a temperatura do clínquer após a saída do forno, o forno deve garantir uma descarga uniforme do material, bem como granulometria e temperatura constantes na zona de cozedura.

3.2.5 MOAGEM DE CIMENTO

A moagem de cimento é a etapa final do processo produtivo do cimento, onde o clínquer, juntamente com gesso e adições, é reduzido a um pó fino, conhecido como cimento. A moagem ocorre em moinhos de bolas, que podem ser verticais ou horizontais, e consiste em submeter o material a diversas forças, como compressão, fricção e impacto, com o objetivo de reduzir o tamanho das partículas.

Os materiais são primeiramente dosados por balanças e conduzidos para o interior do moinho (Figura 11). Na primeira câmara do moinho, o material é submetido a corpos moedores maiores, resultando em uma redução significativa na granulometria. Em seguida, o material é transferido para a segunda câmara, onde é refinado por meio de atrito, resultando em um cimento mais fino. Após a moagem, o cimento é encaminhado para o separador, que, por meio do controle de sua rotação, é capaz de classificar a finura e distribuir o cimento de acordo com as especificações necessárias (DINIZ,2019). Esse processo, geralmente, é constituído por um moinho de bolas de duas câmaras, seguido de um separador a ar dinâmico, em circuito fechado.

Figura 11: Fluxograma da moagem de cimento



Fonte: II Curso de Formação Moinho de bolas – CIMPOR TEC. Edição 02.2-Fev-2007.

Após o processo de classificação no separador, o material é transportado até os ciclones, onde ocorre a separação do produto acabado dos gases presentes no circuito. Esse material segue para armazenamento nos silos de cimento.

Os diferentes tipos de cimento Portland diferenciam-se por meio de sua composição e aplicação. O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) possui em sua composição um teor de clínquer + gesso, geralmente em torno de 95%. Já os cimentos compostos com filler (CPII F32 e CPII F40) possuem um teor de clínquer + gesso entre 90 e 94%. Para ambos os cimentos citados, a adição utilizada é o calcário britado.

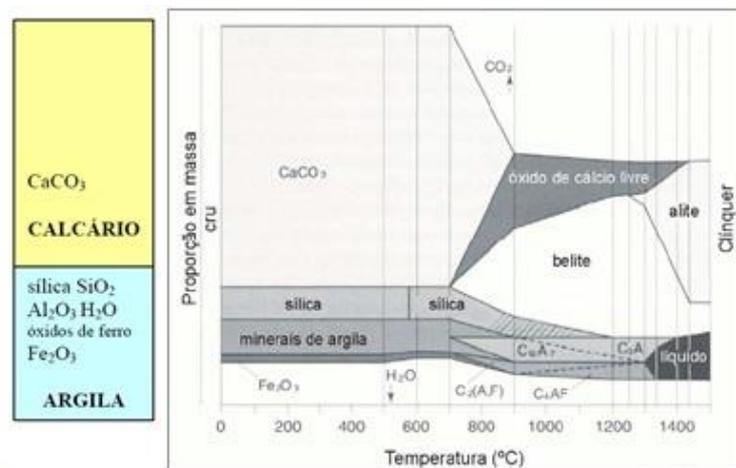
3.3 MINERALOGIA DO CLINQUER E RESISTÊNCIA DO CIMENTO

O cimento é um pó hidráulico inorgânico que, em contato com a água, passa por um processo de pega, reação e cristalização adquirindo resistência. A pega é obtida pela adição de água que promove a plasticidade do material. A resistência inicial é alcançada após a perda de plasticidade, e aos 28 dias, o cimento adquire resistência que pode chegar a pressões superiores a 50 MPa (NEVILLE, 2016). A resistência obtida após 28 dias é um indicador da qualidade do cimento, embora não seja definitiva.

O cimento é constituído principalmente por clínquer, gipsita e aditivos. Diferentes tipos de cimento são produzidos adicionando-se clínquer, gesso (fonte de sulfato de cálcio hidratado) e aditivos em proporções variadas.

A composição do clínquer (Figura 12) e o tamanho das partículas tem papel fundamental na resistência final do cimento. Em relação à composição, a quantidade dos cristais de Alita ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ou C_3S), Belita ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ou C_2S), Aluminato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A), e Ferro Aluminato Tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF) em proporções apropriadas levam ao aumento da resistência. Por sua vez, sabe-se que quanto menores as partículas do clínquer, maior resistência inicial e final do cimento.

Figura 12: Diagrama de fases do clínquer.



Fonte: <https://engenharia-civil-virtual.blogspot.com/2013/07/cimento.html>

3.4 ENSAIOS DE QUALIDADE DO CIMENTO PORTLAND

Um laboratório de qualidade de cimento é um ambiente especializado onde são realizados ensaios e testes para avaliar a qualidade do cimento. Esses ensaios são importantes para garantir que o cimento atenda às especificações técnicas necessárias para sua utilização em diversas aplicações, como na construção de edifícios, pontes, estradas e outras obras civis.

De acordo com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017, que estabelece requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, um laboratório de qualidade deve seguir os princípios de gestão da qualidade e garantia da qualidade, além de contar com equipamentos, instrumentos e métodos de ensaio adequados para a realização dos ensaios.

Os ensaios realizados nos laboratórios de qualidade de cimento geram resultados que servem para verificar se o cimento atende às especificações técnicas exigidas para sua utilização

em diversas aplicações. Caso sejam detectadas irregularidades, ações corretivas podem ser tomadas para assegurar que o cimento cumpra com os requisitos de qualidade e desempenho indispensáveis para sua aplicação em obras civis.

Alguns dos ensaios mais comuns incluem:

- Blaine: O método de Blaine, baseado na permeabilidade ao ar, é utilizado para determinar área superficial específica do cimento, em comparação com uma amostra de referência. A norma técnica brasileira que define o método de ensaio de permeabilidade ao ar para determinação da superfície específica pelo método de Blaine em cimento Portland é a NBR NM 76:2015. Essa medida é importante para avaliar a uniformidade do processo de moagem de uma fábrica (SILVA, MAGALHÃES E SOUZA, 2017).

No entanto, é importante ressaltar que esse método tem limitações na determinação das propriedades do cimento em uso, especialmente em relação a cimentos com materiais ultrafinos. Além disso, a finura do cimento pode ser determinada pela observação do tempo que o ar leva para fluir através de uma camada compactada de cimento, em condições normalizadas, sendo que a superfície específica do cimento é proporcional a esse tempo.

Figura 13: Permeabilímetro de Blaine.



Fonte: <https://solotest.com.br/novo/produtos/permeabilmetro-de-blaine---semi-autom-/4.257.220>

- Perda ao fogo: O ensaio de perda ao fogo é um método utilizado para determinar a quantidade de materiais orgânicos, voláteis e de carbonato de cálcio presentes no cimento Portland. O ensaio de determinação de perda ao fogo exprime a diminuição de massa do cimento após aquecimento em mufla (Figura 14) à 950°C (PRANDO e HALASZ, 2013). A diferença de massa entre a amostra antes e depois da calcinação é usada para calcular a perda de massa, que é um indicador da quantidade de materiais orgânicos, voláteis e de carbonato de cálcio presentes no cimento. O ensaio é

padronizado pela NBR NM 76:2015, que estabelece as condições de preparo da amostra, a temperatura e o tempo de calcinação, e os cálculos para a determinação da perda de massa.

Figura 14 - Forno mufla.



Fonte: Acervo pessoal.

- Resistência à compressão: A NBR NM 67:2019 é a norma técnica brasileira que estabelece o método de ensaio para determinação da resistência à compressão do cimento Portland. Para obter o valor da resistência do concreto, são realizados ensaios de rompimento de corpos de prova submetidos à compressão (Figura 15), seguindo as especificações de dimensões, formas, tipo e tempo de cura e forma de moldagem padronizados. A resistência característica à compressão do concreto é obtida tomando como referência a idade de 28 dias (ALVES, 2017).

Figura 15: Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Acervo pessoal.

4 METODOLOGIA

4.1. DISTRIBUIÇÃO T-STUDENT

O Teste t de Student é um procedimento estatístico paramétrico que tem como objetivo verificar se existe uma diferença estatisticamente significativa entre as médias de duas amostras independentes.

A distribuição t-Student (t) é definida pela quantidade:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{(s/\sqrt{n})} \text{ equação (4)}$$

Em que: \bar{x} é a média amostral, μ é a média populacional, s é o desvio padrão amostral e n é o tamanho da amostra. A distribuição t-Student é caracterizada pelo número de graus de liberdade, que é igual ao tamanho da amostra menos um. Esse valor t calculado deve ser comparado a uma distribuição t tabelada, que depende do grau de liberdade e do nível de significância escolhido.

O Teste t de Student é fundamentado em duas hipóteses: a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1). A H_0 pressupõe que as médias de duas amostras são iguais, enquanto a H_1 sugere que elas são diferentes. Caso o valor t calculado seja superior ao valor crítico presente na distribuição t (tabelado), a H_0 é rejeitada e se conclui que há uma diferença estatisticamente significativa entre as médias das duas amostras.

4.2 PLANEJAMENTO FATORIAL

Definir uma sequência de coletas de dados experimentais é essencial para planejar experimentos com o objetivo de alcançar determinados resultados. Entre os diversos métodos de planejamento experimental descritos na literatura, como a regressão múltipla e planejamento de superfície resposta, o planejamento fatorial é amplamente recomendado para estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Nesse método, todas as possíveis combinações dos níveis de cada variável são investigadas em cada tentativa ou réplica do experimento, afim de examinar como as variáveis se agrupam, justificando teoricamente como as variáveis se relacionam com os fatores. (MATOS e RODRIGUES, 2019).

Para compreender adequadamente os princípios do planejamento fatorial, é imprescindível possuir um bom domínio de conceitos fundamentais, são eles:

- Fator: cada variável do sistema em estudo.
- Nível: condições de operação dos fatores de controle investigadas nos experimentos,

geralmente são identificados por nível baixo (-) e nível alto (+).

Geralmente, o planejamento fatorial é simbolizado por " b^k ", em que "k" indica a quantidade de fatores envolvidos e "b" representa o número de níveis selecionados para cada um desses fatores. O caso mais simples de planejamento fatorial é aquele em que cada fator k está presente em apenas dois níveis.

No planejamento fatorial, os níveis são frequentemente codificados utilizando os símbolos (+) e (-), indicando os limites máximo e mínimo estudados. Essa codificação arbitrária não afeta a condução dos experimentos ou a interpretação dos resultados. Além disso, essa convenção possibilita a representação das variáveis em matrizes de planejamento e o cálculo da influência dessas variáveis e suas interações no sistema (CUNICO, 2008).

Neste trabalho, utilizou-se o método de planejamento fatorial de dois fatores para determinar a influência do Blaine e da perda ao fogo no cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Para isso, foram utilizados dados de ensaios laboratoriais de uma fábrica de cimento localizada na Paraíba.

Os testes de planejamento fatorial requerem a definição dos valores a serem considerados como alto e baixo nível. Para essa finalidade, foram utilizados os limites superiores e inferiores estabelecidos pela fábrica de cimento que forneceu os dados estudados, resultando nas seguintes conclusões:

- As amostras, representadas em amarelo (Tabela 3), são aquelas que possuem nível alto valor de Blaine e perda ao fogo. Com base nos parâmetros de limites superior e inferior adotados pela fábrica, definiu-se que uma porcentagem de perda ao fogo acima de 6,4 é considerada nível alto, enquanto para o Blaine são consideradas nível alto aquelas que possuem valor superior a 5800 cm^2/g .
- As amostras, representadas em rosa (Tabela 3), são aquelas que possuem um nível baixo de valor de Blaine e perda ao fogo. Com base nos parâmetros de limites superior e inferior adotados pela fábrica, definiu-se que uma porcentagem de perda ao fogo abaixo de 5,9 e um Blaine abaixo de 5600 cm^2/g são considerados baixos valores.

Tabela 3: Dados das amostras de cimento utilizadas.

Nº AMOSTRA	Perda ao fogo (%)	Blaine (cm ² /g)	R1 (Mpa)	R3 (Mpa)	R7 (Mpa)	R28 (Mpa)
6285	5,62	5510	24,7	34,4	40,4	47,4
6358	5,48	5520	24,1	35,6	40,4	48,5
7214	6,5	5510	24,4	35,9	39,6	45,2
7381	6,42	5510	24,4	36	40,7	47,7
6290	5,83	5840	23,9	37,1	41,1	48,8
7239	5,72	5810	25,4	37,7	42,4	48,5
7130	6,45	5830	25	35,3	41,1	49
7436	6,49	5830	27,2	35,9	41	46,2

Pela Tabela 3, observa-se que os dados foram obtidos em duplicata, ou seja, foram coletadas duas amostras para ambos os fatores com valores de nível baixo (amostras 6285 e 6358), duas para ambos os fatores com valores de nível alto (amostras 7130 e 7436), duas amostras para nível alto de porcentagem de perda ao fogo e nível baixo de Blaine (amostras 7214 e 7381) e duas amostras para nível baixo de porcentagem de perda ao fogo e nível alto de Blaine (amostras 6290 e 7239), a fim de aumentar a precisão dos resultados.

Para analisar a influência dos fatores na resistência aos 28 dias, foi necessária a realização de um planejamento fatorial cruzado, que nada mais é do que a interação entre os dois fatores estudados. Nesta etapa, é necessário definir que os valores de nível baixo serão aqueles representados pelo sinal negativo "-", enquanto aqueles que possuem valor de nível alto serão representados pelo sinal positivo "+" (Tabela 4).

Tabela 4: Representação dos fatores com sinais matemáticos.

Nº AMOSTRA	Perda ao fogo (%)	Blaine (cm ² /g)	R28 (Mpa)	Perda ao fogo (%)	Blaine (cm ² /g)
6285	5,62	5510	47,4	-	-
6358	5,48	5520	48,5	-	-
7214	6,5	5510	45,2	+	-
7381	6,42	5510	47,7	+	-
6290	5,83	5840	48,8	-	+
7239	5,72	5810	48,5	-	+
7130	6,45	5830	49	+	+
7436	6,49	5830	46,2	+	+

A interação entre os fatores de porcentagem de perda ao fogo e Blaine são realizadas de acordo com as operações matemáticas, em que:

- Sinais iguais: quando tem-se dois valores com o mesmo sinal e realiza-se uma operação entre eles, o resultado será outro valor com o sinal positivo (+).
- Sinais diferentes: quando tem-se dois valores com sinais diferentes e realiza-se uma operação entre eles, o resultado terá o sinal negativo (-).

Tabela 5: Interação entre os dois fatores.

Nº AMOSTRA	Perda ao fogo	Blaine	Interação	R28 (Mpa)
6285	-	-	+	47,4
6358	-	-	+	48,5
7214	+	-	-	45,2
7381	+	-	-	47,7
6290	-	+	-	48,8
7239	-	+	-	48,5
7130	+	+	+	49
7436	+	+	+	46,2

5 RESULTADOS

5.1. PLANEJAMENTO FATORIAL E DISTRIBUIÇÃO T-STUDENT

Para validar se os dados apresentados na Tabela 3 são estatisticamente similares, foram realizados testes de distribuição t-Student. A hipótese nula (H_0) pressupõe que as médias das amostras são similares, enquanto a hipótese alternativa (H_1) sugere que elas são diferentes. Se o valor t calculado for superior ao valor presente na distribuição t (tabelado), H_0 é rejeitada.

Tabela 6: Média e desvio padrão dos valores de nível alto e baixo de porcentagem de perda ao fogo.

Nº AMOSTRA	Perda ao fogo (%)
6285	5,62
6358	5,48
6290	5,83
7239	5,72
Média	5,66
Desvio padrão	0,15
7214	6,5
7381	6,42
7130	6,45
7436	6,49
Média	6,47
Desvio padrão	0,04

Tabela 7: Média e desvio padrão dos valores de nível alto e baixo de Blaine.

Nº AMOSTRA	Blaine (cm ² /g)
6285	5510
6358	5520
7214	5510
7381	5510
Média	5512,5
Desvio padrão	5
6290	5840
7239	5810
7130	5830
7436	5830
Média	5827,5
Desvio padrão	12,58

Seguindo o procedimento adotado para cálculo da distribuição de t-Student, é necessário definir a média populacional dos fatores de nível alto e baixo. Para a porcentagem de perda ao fogo, a média populacional das amostras foi de 5,50% para valores de nível baixo e 6,50% para valores de nível alto. Para o Blaine, a média populacional foi de 5510 cm²/g para valores de nível baixo e 5810 cm²/g para valores de nível alto.

Para calcular o t-Student, utiliza-se a equação (4):

$$|t| = \frac{x - \mu}{(s/\sqrt{n})}$$

Tabela 8: Valores de t-Student calculados.

Fator	Nível	t-Student Calculado
Perda ao fogo	Alto	1,5
Perda ao fogo	Baixo	2,13
Blaine	Alto	2,78
Blaine	Baixo	1

Devido à variabilidade de dados presentes em uma fábrica de cimento, para reduzir o risco de cometer um erro do tipo I, ou seja, rejeitar erroneamente uma hipótese nula verdadeira, neste trabalho, foi adotado um nível de significância de 0,025. Seguindo a suposição de que a distribuição de referência é normal e a variância da população é estimada por s², a estatística t seguirá uma distribuição com v = n - 1 graus de liberdade (BERTHOUEX, 2002). Foram utilizadas 4 amostras com valores de nível alto e 4 amostras como valores de nível baixo para ambos os fatores analisados, sendo assim, o grau de liberdade do espaço amostral para cada nível de ambos os fatores é 3.

Figura 16: Tabela de distribuição t-Student.

n	t _{0,55}	t _{0,60}	t _{0,70}	t _{0,80}	t _{0,90}	t _{0,95}	t _{0,975}	t _{0,99}	t _{0,995}
1	0,1584	0,3249	0,7265	1,3764	3,0777	6,3138	12,7062	31,8205	63,6567
2	0,1421	0,2887	0,6172	1,0607	1,8856	2,9200	4,3027	6,9646	9,9248
3	0,1366	0,2767	0,5844	0,9785	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8409
4	0,1338	0,2707	0,5686	0,9410	1,5332	2,1318	2,7764	3,7469	4,6041
5	0,1322	0,2672	0,5594	0,9195	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321
6	0,1311	0,2648	0,5534	0,9057	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074
7	0,1303	0,2632	0,5491	0,8960	1,4149	1,8946	2,3646	2,9980	3,4995
8	0,1297	0,2619	0,5459	0,8889	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554
9	0,1293	0,2610	0,5435	0,8834	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498
10	0,1289	0,2602	0,5415	0,8791	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693
11	0,1286	0,2596	0,5399	0,8755	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058
12	0,1283	0,2590	0,5386	0,8726	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545
13	0,1281	0,2586	0,5375	0,8702	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123
14	0,1280	0,2582	0,5366	0,8681	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768
15	0,1278	0,2579	0,5357	0,8662	1,3406	1,7531	2,1314	2,6025	2,9467
16	0,1277	0,2576	0,5350	0,8647	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208
17	0,1276	0,2573	0,5344	0,8633	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982
18	0,1274	0,2571	0,5338	0,8620	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784
19	0,1274	0,2569	0,5333	0,8610	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609
20	0,1273	0,2567	0,5329	0,8600	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453
21	0,1272	0,2566	0,5325	0,8591	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314
22	0,1271	0,2564	0,5321	0,8583	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188
23	0,1271	0,2563	0,5317	0,8575	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073
24	0,1270	0,2562	0,5314	0,8569	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7969
25	0,1269	0,2561	0,5312	0,8562	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874
26	0,1269	0,2560	0,5309	0,8557	1,3150	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787
27	0,1268	0,2559	0,5306	0,8551	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707
28	0,1268	0,2558	0,5304	0,8546	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633
29	0,1268	0,2557	0,5302	0,8542	1,3114	1,6991	2,0452	2,4620	2,7564
30	0,1267	0,2556	0,5300	0,8538	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,7500
40	0,1265	0,2550	0,5286	0,8507	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045
50	0,1263	0,2547	0,5278	0,8489	1,2987	1,6759	2,0086	2,4033	2,6778
60	0,1262	0,2545	0,5272	0,8477	1,2958	1,6706	2,0003	2,3901	2,6603
80	0,1261	0,2542	0,5265	0,8461	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387
100	0,1260	0,2540	0,5261	0,8452	1,2901	1,6602	1,9840	2,3642	2,6259
120	0,1259	0,2539	0,5258	0,8446	1,2886	1,6577	1,9799	2,3578	2,6174
∞	0,126	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	1,960	2,327	2,576

Fonte: <https://www.slideshare.net/baalkara/tabla-t-student-12054690>

De acordo com a Figura 16, o valor t-Student tabelado para um nível de significância de 0,025 e 3 graus de liberdade é de 3,1824. Os valores “t” calculados (Tabela 8) para os fatores de nível alto e baixo são inferior ao valor crítico presente na distribuição t (tabelado), ou seja, a hipótese nula (H_0), que pressupõe que as médias das amostras são similares, é válida.

Para estabelecer a influência dos fatores na resistência aos 28 dias, é realizado o cálculo da média das resistências obtidas nessa idade. Nesta etapa, são calculadas as médias das resistências obtidas aos 28 dias para valores de níveis alto e baixo (+ e -) separadamente, tanto

para os fatores de Blaine e porcentagem de perda ao fogo, quanto para a interação entre os dois fatores.

Tabela 9: Média da resistência aos 28 dias para valores de nível alto e baixo de porcentagem de perda ao fogo.

Nº AMOSTRA	Perda ao fogo	R28 (Mpa)
7214	+	45,2
7381	+	47,7
7130	+	49
7436	+	46,2
Média		47,03
6285	-	47,4
6358	-	48,5
6290	-	48,8
7239	-	48,5
Média		48,3

Tabela 10: Média da resistência aos 28 dias para valores de nível alto e baixo de Blaine.

Nº AMOSTRA	Blaine	R28 (Mpa)
6290	+	48,8
7239	+	48,5
7130	+	49
7436	+	46,2
Média		48,13
6285	-	47,4
6358	-	48,5
7214	-	45,2
7381	-	47,7
Média		47,2

Tabela 11: Média da resistência aos 28 dias para valores de nível alto e baixo da interação entre os fatores.

Nº AMOSTRA	Interação	R28 (Mpa)
6285	+	47,4
6358	+	48,5
7130	+	49
7436	+	46,2
Média		47,8
7214	-	45,2
7381	-	47,7
6290	-	48,8
7239	-	48,5
Média		47,6

Após o cálculo das médias de resistência aos 28 dias para os níveis dos dois fatores, é realizada a subtração das médias obtidas entre os níveis alto e baixo. Dessa forma, é possível determinar a influência dos fatores na resistência aos 28 dias do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI).

Tabela 12: Influência dos fatores na resistência aos 28 dias.

R28 Mpa			
	Perda ao fogo	Blaine	Interação
+	47,03	48,13	47,78
-	48,3	47,2	47,55
Subtração	-1,27	0,92	0,23

De acordo com os valores calculados, níveis elevados de porcentagem de perda ao fogo influenciam negativamente na resistência do cimento, resultando em uma perda de -1,27 MPa de resistência. Por outro lado, os níveis elevados de Blaine influenciam positivamente, gerando um ganho de 0,92 MPa de resistência. Quando ambos os fatores são considerados em conjunto, por meio da interação, é possível observar que, os níveis elevados têm uma influência positiva, gerando um ganho de 0,23 MPa de resistência aos 28 dias.

NEVILLE, A.M. (2016), assegura: a maior finura do cimento Portland de alta resistência inicial, aumenta significativamente a resistência entre 10 e 20 horas, persistindo o aumento até

os 28 dias. Já a perda ao fogo, refere-se a uma extensão do processo de calcinação, avaliando a quantidade de cálcio que não foi decomposta termicamente durante a reação (SOARES, 2007), impedindo assim a formação de uma maior quantidade de produtos de hidratação, resultando em uma resistência final reduzida do cimento.

Para analisar a influência dos fatores na resistência aos 28 dias de forma gráfica, é necessário definir as médias das resistências e dos fatores seguindo uma sequência lógica.

Tabela 13: Influência das interações dos fatores na resistência aos 28 dias.

	A	B	R28
	PF	BLAINE	
A1' / B1'	5,55	5515	47,95
A1' / B2	6,46	5510	46,45
A2 / B1'	5,78	5825	48,65
A2 / B2	6,47	5830	47,60

- A1⁻ representa a média dos valores de baixo nível de porcentagem de perda ao fogo quando o Blaine também possui valores de baixo nível;
- A1⁺ representa a média dos valores de alto nível de porcentagem de perda ao fogo quando o Blaine apresenta valores de baixo nível;
- A2⁻ representa a média dos valores de baixo nível de porcentagem de perda ao fogo quando o Blaine apresenta valores de alto nível;
- A2⁺ representa a média dos valores de alto nível de porcentagem de perda ao fogo quando o Blaine apresenta valor de alto nível;
- B1⁻ representa a média dos valores de baixo nível de Blaine quando a porcentagem de perda ao fogo apresenta baixo nível;
- B1⁺ representa a média dos valores de alto nível de Blaine quando a porcentagem de perda ao fogo apresenta baixo nível;
- B2⁻ representa a média dos valores de baixo nível de Blaine quando a porcentagem de perda ao fogo apresenta alto nível;
- B2⁺ representa a média dos valores de alto nível de Blaine quando a porcentagem de perda ao fogo apresenta alto nível.

• A média da resistência é calculada seguindo o padrão de A e B estabelecido pela Tabela 13."

Com base nos dados das médias dos fatores e das resistências apresentados na Tabela 13, é possível analisar o comportamento da resistência aos 28 dias dos cimentos Portland de alta resistência inicial em relação aos fatores estabelecidos.

Figura 17: Comportamento da resistência aos 28 dias variando a porcentagem de perda ao fogo e mantendo Blaine constante.

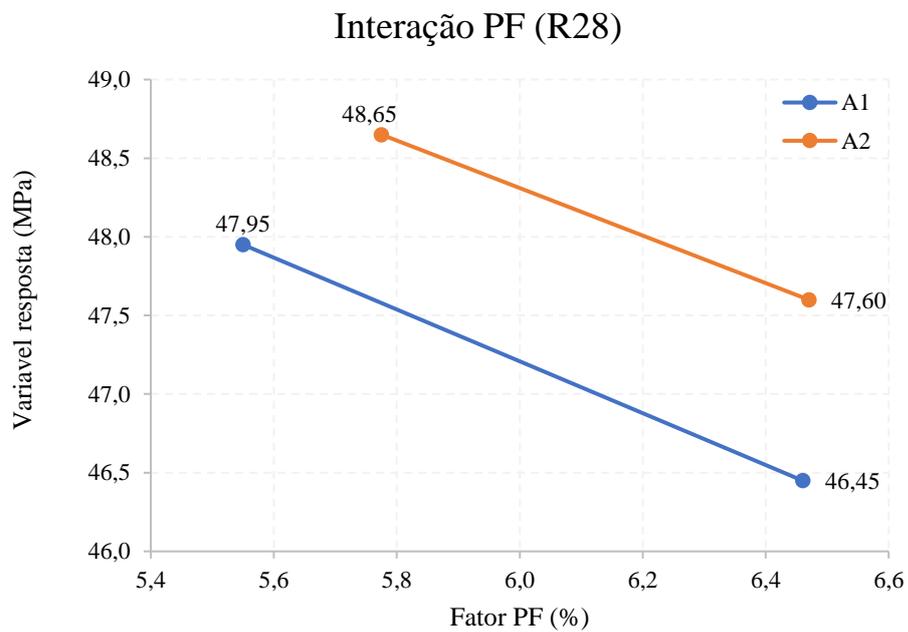
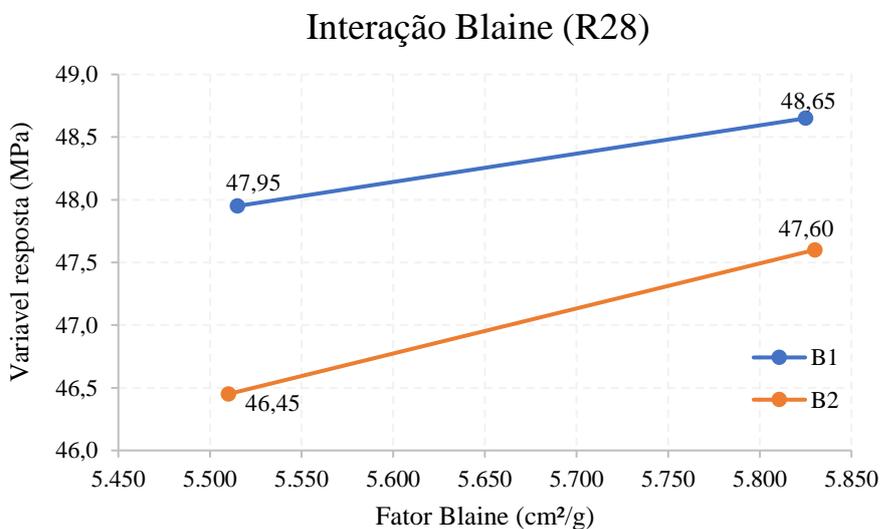


Figura 18: Comportamento da resistência aos 28 dias variando o Blaine e mantendo a porcentagem de perda ao fogo constante



Pelas Figuras 17 e 18, é possível reafirmar o que foi estabelecido na Tabela 12. O aumento do valor de Blaine eleva o valor da resistência aos 28 dias em 0,7 MPa para as amostras B1 e 1,15 Mpa para as amostras B2. Enquanto o aumento da porcentagem de perda ao fogo gera uma redução na resistência aos 28 dias de 1,5 para as amostras A1 e 1,05 para as amostras A2.

A porcentagem de perda ao fogo, que indica a quantidade de massa decomposta da amostra, representa um dos principais requisitos regulatórios na fabricação de cimento. Através deste estudo, fica evidente que menores porcentagens de perda ao fogo resultam em um ganho significativo de resistência após 28 dias.

O índice de Blaine está relacionado à área superficial específica do cimento, sendo que materiais mais finos possuem valores de Blaine mais elevados. Com base nas análises apresentadas neste trabalho, é possível concluir que materiais mais finos (com maior valor de Blaine) terão uma resistência maior após 28 dias.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos e avaliados fornecem evidências claras sobre a influência direta da porcentagem de perda ao fogo e do índice de finura Blaine na resistência do cimento após 28 dias. Essas descobertas destacam a importância de dedicar atenção e esforço à produção de cimento com excelência.

Através do trabalho, é possível observar uma relação direta entre a porcentagem de perda ao fogo e a resistência à compressão aos 28 dias. Aumentos na porcentagem de perda ao fogo resultam em uma diminuição da resistência nesse período. Além disso, é evidente que as variações no índice de Blaine influenciam a resistência aos 28 dias. Observa-se que um aumento no índice de Blaine leva a um ganho significativo na resistência do cimento.

Essas descobertas têm implicações práticas significativas na indústria do cimento. Elas indicam a importância de controlar e otimizar os processos de clínquerização e moagem durante a produção de cimento, a fim de alcançar parâmetros ideais de porcentagem de perda ao fogo e de Blaine. Essa otimização resulta em produtos de maior qualidade, agregando valor de mercado e confiabilidade ao cimento fabricado.

Portanto, para garantir um bom desempenho e atender aos requisitos de resistência após 28 dias, é crucial estabelecer uma faixa ideal de Blaine e porcentagem de perda ao fogo. Esses parâmetros de qualidade são essenciais para maximizar a resistência do cimento, oferecendo resultados consistentes e confiáveis.

7 REFERENCIAS

ALVES, Rogério. RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND: CORRELAÇÃO DE ENSAIO À COMPRESSÃO AXIAL COM ESCLEROMETRIA. Orientador: Rafael Mascolo. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2017. Disponível em: <https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/811a2bfd-f8c1-40d7-9592-b43866252d4e/content>. Acesso em: 9 maio 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR ISO/IEC 17025:2017 - Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. Disponível em: https://www.exactusmetrologia.com.br/sites/default/files/3-nbr_iso_iec_17025-2017_versao_exclusiva_treinamento.pdf. Acessado em: 09 maio 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/94222595/ABNT-NBR-5733-1991-Cimento-Portland-de-alta-resistencia#>. Acessado em: 27/05/2023.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. UMA BREVE HISTÓRIA DO CIMENTO PORTLAND. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2009 Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/60334209/Uma_breve_historia_do_cimento_Portland_220190819-4724-r6lwgf-libre.pdf?1566231587=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUma_breve_historia_do_cimento_Portland.pdf&Expires=1685217623&Signature=UniLaV28EWnbYQUEULjiHOnxybMg41xmfF1Eu1-7lGzQV3KPXKhI~28gXEoUIO4c46aEiD4cTBJBfNhXzNegXaPeyLUavcdfF2JymWcVaNbV44b-Uv7VWM5LhQ8XveEBk2420rfGlfG3eVKo8VL42tyIp7LNAbX-Q99xNRLj749~AnGverGL1retfz-US5zs~Zi5CmUou0XYwpVai2NJ~kt2XM8wWyLC--Aftt7J4WKo6VnMVq91L63BlYREoRMCJvANng00tzMKH2kZ2dmW4UBNEA5PSgKtRIVB6fHVAAHpgc0wQILOxkzxo8qaf~sgzExJG4SLEVZqcsbX6iT6zQ_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 3 nov. 2022.

BERTHOUEX, Paul Mac; BROWN, Linfield C.. Statistics for Environmental Engineers. 2ª Boca Raton London New York Washington, D.c: Lewis Publishers, 2002. 10-13 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=png6zsomkVQC&printsec=frontcover&hl=pt->

[BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](#). Acessado em: 29 maio 2023.

BUSETTO, Rafael Tozzo. Resistência a compressão do concreto: análise da variabilidade em corpos de prova moldados em obra situada em Porto Alegre. Orientador: Angela Borges Masuero. Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/96340/000914941.pdf?sequence=1#:~:text=Uma%20propriedade%20importante%20e%20usada%20como%20controle%20de,na%20redu%C3%A7%C3%A3o%20de%20uma%20poss%C3%ADvel%20variabilidade%20do%20concreto>. Acesso em: 27 maio 2023.

CENTURIONE, Sérgio Luiz. Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-28082015_150715/publico/Centurione_Mestrado.pdf. Acesso em: 08 nov.2022.

Cimento Itambé. ORIGEM DO CIMENTO. 2008. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/origem-do-cimento/>. Acesso em: 3 nov. 2022.

CUNICO, M. W. M. *et al.* PLANEJAMENTO FATORIAL: UMA FERRAMENTA ESTATÍSTICA VALIOSA PARA A DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS EXPERIMENTAIS EMPREGADOS NA PESQUISA CIENTÍFICA. *Visão Acadêmica*, Curitiba, v. 9, n. 1, 2008. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/academica/article/view/14635/9823>. Acesso em: 10 maio 2023.

FARENZENA, Hélio. Fabricação do cimento Portland, Aspectos Gerais, Edição Cimentec, 1995.

GUARANY S , C. A. L. B. *et al.* PRINCIPAIS MÉTODOS DE ESTOCAGEM DE MINÉRIO DE FERRO: UMA ABORDAGEM TEÓRICA. *Perspectivas Online*, [s. l.], v. 3, ed. 06, 4 set. 2013. Disponível em: https://ojs3.perspectivasonline.com.br/exatas_e_engenharia/article/view/8/4. Acesso em: 9 jun. 2023.

KAEFER, Luís Fernando. A Evolução do Concreto Armado. 1, São Paulo, p. 1, 23 dez. 1998. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/28213/TCC-%20Maria%20Eduarda%202022.%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 maio 2023.

MATOS, Daniel Abud Seabra; RODRIGUES, Erica Castilho. Análise fatorial. 1. ed. Brasília - DF: ENAP - Escola Nacional de Administração Pública, 2019. 74 p. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4790/1/Livro%20An%C3%A1lise%20Fatorial.pdf>. Acesso em: 27 maio 2023.

MAGNAVITA, Alexander; BOURGUIGNON, Daiane. Processo de Produção de Cimento. FAESA, Engenharia de Produção, 2009.

NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, POLLYANI CRISTINA. ESTUDO DO CONTROLE DE FORMAÇÃO E RETOMADA DE PILHAS DE MINÉRIO. Orientador: Maurício Guimarães Bergerman. 2016. Monografia (Pós-graduação em Tratamento de Minérios) - UFG, CATALÃO-GO. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/Pollyani_Cristina_de_Oliveira.pdf. Acesso em: 6 maio 2023.

PRANDO, Lorenzo Pratti; HALASZ, Marcos Roberto Teixeira. ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CIMENTOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA: Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 2796, 1 jul. 2013. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/engenharias/ANALISE%20DE%20PARAMETROS%20FISICO%20QUIMICOS%20CORRIGIDO.pdf>. Acesso em: 9 maio 2023.

SILVA, Guilherme Jorge Brigolini; MAGALHÃES, Mariana; SOUZA, Fernando da Silva. PROTOCOLO RECICLOS #9: MÉTODO DE BLAINE. Laboratório de materiais de construção civil, Universidade federal de Ouro Preto, 2017. Disponível em: https://reciclos.ufop.br/sites/default/files/reciclos/files/protocolo_reciclos_9.pdf?m=1565903304. Acesso em: 9 maio 2023.

SOARES, Bruno Daniel. Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica.

Orientador: Humberto Molinar Henrique. 2007. Dissertação de mestrado (Mestre em engenharia química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2007. Disponível em: <https://clyde.dr.ufu.br/bitstream/123456789/15127/1/Parte%201.pdf>. Acesso em: 29 maio 2023.

SOUZA , Maria Eduarda Pereira. A INDUSTRIA DO CIMENTO NO BRASIL. Orientador: Thiago Simonato Mozer. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Química Tecnológica.) - Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, 2022. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/28213/TCC-%20Maria%20Eduarda%202022.%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 maio 2023.

VIEIRA, Isabella Martions de Souza; CANGUSSU, Vitor Moreira. Processo de cominuição na mineração. LATRAM, 16 nov. 2020. Disponível em: <https://latram.ufop.br/2020/11/16/processo-de-cominuicao-na-mineracao/>. Acesso em: 7 nov. 2022.