



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOSÉ HUMBERTO GONÇALO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DO CIMENTO
PORTLAND CPV-ARI DE FÁBRICAS DA REGIÃO NORDESTE**

João Pessoa-PB

Maio/2019

JOSÉ HUMBERTO GONÇALO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DE CIMENTO
PORTLAND CPV-ARI DE FABRICAS DA REGIÃO NORDESTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia de Materiais, do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
da Paraíba, para apreciação da banca
examinadora como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Farias Leal

Co Orientador: Prof. Ph.D. Sandro M. Torres

João Pessoa-PB

Maio/2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586c Silva, Jose Humberto Goncalo da.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DO CIMENTO
PORTLAND CPV-ARI DE FÁBRICAS DA REGIÃO NORDESTE / Jose
Humberto Goncalo da Silva. - João Pessoa, 2019.

51 f. : il.

Orientação: Antônio Farias Leal.

Coorientação: Sandro Marden Torres.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Cimento Portland. 2. Refinamento Estrutural. 3.
Granulometria. I. Leal, Antônio Farias. II. Torres,
Sandro Marden. III. Título.

UFPB/BC

JOSÉ HUMBERTO GONÇALO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E MECÂNICA DE CIMENTO
PORTLAND CPV-ARI DE FABRICAS DA REGIÃO NORDESTE**

Data de defesa: 09 de maio de 2019.

Período: 2018.2

Resultado: APROVADO

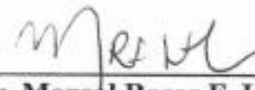
Trabalho de Conclusão de Curso Aprovado pela Banca Examinadora:



Prof. Dr. Antônio Farias Leal
DENM/CT/UFPB
Orientador



Prof. Ph.D. Sandro Marden Torres
DENM/CT/UFPB
1º Examinador



Prof. Dr. Marçal Rosas F. Lima Filho
DEER/CEAR/UFPB
2º Examinador



Prof. Msc. Carlos Mavíael de Carvalho
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, por ter me dado forças para continuar em todos os momentos difíceis pelos quais passei e por tudo o que foi conquistado até aqui.

Aos meus amados pais, Jaime Gonçalo da Silva e Jadeilda Maria da Silva, por todo o amor e exemplo de honestidade, sempre mostrando a importância da educação para o meu crescimento como ser humano.

Agradeço à minha esposa, Liliane Bezerra do Nascimento e aos meus filhos Jose Humberto Gonçalo da Silva Junior e Anne Francisca Gonçalo do Nascimento por serem os maiores incentivadores e as fontes inesgotáveis de apoio, amor e compreensão, pois compreenderam minha ausência em diversos momentos dessa longa jornada acadêmica.

Agradeço ao meu orientador Dr. Antônio Farias Leal por ter aceitado o convite para essa tarefa, pelas orientações e pelo tempo disponibilizado durante a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Dr. Tibério Andrade dos Passos, Dr. Ricardo Peixoto Suassuna Dutra e Ph.D. Sandro Marden Torres por toda orientação, disponibilidade, paciência, por todas as oportunidades que me deram desde o período da Monitoria da Disciplina de Desenho Técnico passando pelo PIVIC até o Estágio na Elizabeth Cimentos, por todos os conselhos que levarei para a vida.

Agradeço a Elizabeth Cimentos Ltda., na pessoa do Gerente Industrial Degmar Diniz e do Coordenador de Processo Vilmar Manoel da Silva, que abriram as portas para a realização desse estudo.

Agradeço a equipe do Laboratório de Controle de Qualidade da ECL, na pessoa do Coordenador José Aílton Sales dos Santos pelas oportunidades, orientação ao longo deste trabalho e por compartilhar seus conhecimentos e experiências a mim transmitidos.

Aos professores, Msc. Carlos Mavíael de Carvalho e Dr. Marçal Rosas F. Lima Filho por fazer parte da banca, contribuindo com sugestões para enriquecer este trabalho.

Aos meus amigos de graduação, Willian Monteiro, Clayne Manguiera, Humberto Dias e William Machado por todos os momentos de estudos, de diversão, alegria e sobretudo, por todo companheirismo, amizades criadas durante o curso e que levarei para o resto da vida.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMat), por toda contribuição dada ao longo do curso.

Agradeço a Igreja Batista Reformada, na pessoa do Pr. Luciano Paiva e aos Irmãos em Cristo Fabio Maia, Gustavo Felinto, Clodoaldo, e Diego, pelas correntes de oração, apoio moral e ensinamentos religiosos dispensados tanto a mim como a toda minha família.

RESUMO

Esse trabalho se trata de caracterizar e comparar sete amostras de Cimento Portland CPV-ARI, produzidos e comercializados em nossa região, que por si só, já seria de grande valor acadêmico e científico por trazer tais informações à luz do conhecimento. Quando esse estudo trata de uma das matérias primas mais importantes para a construção civil, tanto para moradias quanto para as indústrias e infraestrutura das cidades em qualquer parte do planeta, esse conhecimento torna-se ainda mais valioso. Avaliando as propriedades físicas, químicas e mecânicas, foram identificadas as variáveis com maior relevância no desempenho das amostras de Cimento Portland. Na elaboração desse trabalho foram utilizadas sete amostras de Cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI, que foram obtidas de cinco diferentes indústrias do polo cimenteiro da região nordeste. A relevância desse trabalho baseia-se nos resultados alcançados nas caracterizações químicas, físicas e mecânicas, obtidos mediante ensaios de Fluorescência de Raios-X, Granulometria à Laser, Finura, Blaine, Resistência à Compressão, Início e Fim de Pega, Perda ao Fogo e Resíduo Insolúvel, Difração de Raios-X e refinamento estrutural pelo método de Rietveld. Os resultados obtidos revelaram que das setes amostras estudadas todas elas cumprem os requisitos de qualidade, com exceção da Amostras A, no requisito de resistência a compressão a um dia de cura, atribuindo esse comportamento aos baixos valores de Área Específica e percentual de Aluminato Tricálcico. As Amostras (C1, C2, D, E1 e E2) apresentaram excelentes resultados de resistência inicial e final. Por fim, as Amostras E1 e E2 com melhores resultados de resistência a compressão inicial e final, respectivamente, atribuindo esses comportamentos a associação de melhores características químicas e um processo de moagem mais eficiente.

Palavras Chaves: Cimento Portland, Refinamento Estrutural, Granulometria.

ABSTRACT

This paper is about description and comparison of seven samples of Portland Cement CPV-ARI, produced and sold in our region, which by itself, would already be of great academic and scientific value for bringing such informations to the light of the knowledge. As this study comes about one of the most important raw material for civil construction, for both livinghood and industries and infrastructure of any city in the planet, this knowledge becomes even more valuable. Evaluating its physical, chemical and mechanical properties, it was identified the most relevant variables of the performance of the samples of Portland cement. At the study, it was used seven samples of high initial resistance Portland cement, CPV-ARI, which were obtained from five different industries of the cement pole of the northeast region. The relevance of this study is based on the results obtained at the chemical, physical and mechanical characterizations, which were obtained on essays, such as X-ray Fluorescence, Laser Granulometry, Fineness, Blaine, Compressive Strength, Start and End of the Setting Time, Fire Loss and Insoluble Residue, X-Ray Diffraction and Structural Refinement by the Rietveld Method. The results obtained revealed that of the seven samples studied, all of them meet the quality requirements, with the exception of Samples A, in the requirement of compressive strength at one day of cure, attributing this behavior to the low values of Specific Area and percentage of Triccalcium Aluminate. Samples (C1, C2, D, E1 and E2) showed excellent initial and final resistance results. Finally, Samples E1 and E2 with better initial and final compression strength results, respectively, attributing these behaviors to the association of better chemical characteristics and a more efficient milling process.

Keywords: Portland Cement, Structural Refinement, Granulometry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dados da indústria cimenteira no Nordeste (cimento.org, 2019).	14
Figura 2. Mercado Nacional do cimento (ABCP, 2019).....	20
Figura 3. Fluxograma da fabricação do cimento. (Autor).....	21
Figura 4. Fluxograma das caracterizações (Autor).	26
Figura 5. Peneirador Aerodinâmico Metal Cairo Modelo: PVE-I (Autor).	27
Figura 6. Permeabilímetro de Blaine - Semiautomático ACMEL modelo: BSA1 (Autor).	27
Figura 7. Granulômetro à Laser marca Cilas e modelo 1090 (Autor)	28
Figura 8. Aparelho de Vicat da marca Solotest (Autor).	29
Figura 9. Forno Tipo Mufla em 951°C (Autor).....	30
Figura 10. Acessório de Fusão das Pérolas para FRX (Autor).....	31
Figura 11. FRX marca Panalytical e modelo Axios Max (Autor).....	32
Figura 12. Difratorômetro de Raios-X marca Bruker modelo D2 Phaser (Autor).	33
Figura 13. Corpos de prova em tanque de cura.	34
Figura 14. Prensa hidráulica da Forney – F250 (Autor).	34
Figura 15. Gráfico das finuras em peneira #200 e #325 (Autor).....	35
Figura 16. Gráfico da Área específica (Blaine).	36
Figura 17. Resultados dos ensaios de Resíduo Insolúvel.	38
Figura 18. Resultados da Perda ao Fogo.	38
Figura 19. Gráfico DRX Amostra A.	40
Figura 20. Gráfico DRX Amostra B.	40

Figura 21. Gráfico DRX Amostra C1.	41
Figura 22. Gráfico DRX Amostra C2.	41
Figura 23. Gráfico DRX Amostra D.	41
Figura 24. Gráfico DRX Amostra E1.	42
Figura 25. Gráfico DRX Amostra E2.	42
Figura 26. Resultados dos ensaios de Resistencia a Compressão.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados da Granulometria à Laser.	37
Tabela 2. Resultados dos tempos de Início e Fim de pega.	37
Tabela 3. Resultados da Composição Química por FRX.	39
Tabela 4. Resultados de Refinamento Extrutural (Topas).	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1 O CIMENTO.....	19
3.2 FABRICAÇÃO DO CIMENTO	20
3.2.1 Matérias primas, Britagem e Moagem do Cru.....	22
3.2.2 Clinquerização	22
3.2.3 Moagem do Cimento e expedição.....	24
3.3 CIMENTO PORTLAND CPV – ARI	24
4 METODOLOGIA	25
4.1 MATERIAIS	25
4.2 MÉTODOS	25
4.2.1 Determinação da finura por peneirador aerodinâmico	26
4.2.2 Determinação da área específica pelo método de Blaine	27
4.2.3 Análise da distribuição granulométrica (método a laser).....	28
4.2.4 Determinação dos tempos de pega.....	28
4.2.5 Determinação do resíduo insolúvel.....	29

4.2.6 Determinação da perda ao fogo	30
4.2.7 Caraterização por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX).....	31
4.2.8 Caraterização por Difração de Raios-X (DRX);	32
4.2.9 Refinamento Estrutural (método de Rietveld)	33
4.2.10 Determinação da resistência a compressão.....	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1 RESULTADOS	35
5.1.2 Finura por peneirador aerodinâmico	35
5.1.3 Área específica pelo método de Blaine	36
5.1.1 Análise da distribuição granulométrica (método a laser)	36
5.1.4 Determinação dos tempos de pega.....	37
5.1.5 Resíduo Insolúvel.....	37
5.1.6 Perda ao fogo	38
5.1.7 Caraterização por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX).....	39
5.1.8 Caraterização por Difração de Raios-X (DRX)	39
5.1.9 Refinamento Topas (método de Rietveld).....	42
5.1.10 Determinação da resistência a compressão.....	43
5.1 DISCUSSÃO.....	44
6 CONCLUSÃO	45
7 REFERÊNCIAS.....	46

A construção civil tem papel fundamental para atingir os objetivos globais do desenvolvimento sustentável, uma vez que o setor consome grande quantidade de recursos naturais. Além disso, gera grande quantidade de resíduos sólidos e gases poluentes, tanto na fase de extração das matérias-primas, como na fabricação, no transporte, no uso, na manutenção e no descarte. Dentre os materiais de construção normalmente empregados, o cimento Portland é utilizado de maneira expressiva na construção civil por suas inúmeras aplicações (CASTRO et al., 2017)

De uma maneira geral, o cimento Portland é obtido a partir da calcinação e clínquerização de uma mistura de calcário e argila em proporções adequadas, sendo a qualidade final do material dependente das matérias-primas utilizadas, das adições feitas posteriormente à calcinação e do grau de finura atingido pela moagem [10/3]. Os critérios para a decisão da utilização de um determinado material estão relacionados com a tipologia estrutural, a função, a localização e as considerações econômicas locais, dentre outros, após serem considerados os prós e os contras de cada alternativa possível (CASTRO, 2017)

Existem diversos tipos de Cimento Portland cuja sua classificação depende da composição química de suas matérias primas, resistência química, tipos de adições e seus percentuais, cor e desempenho mecânico. A escolha do Cimento Portland CPV-ARI para o presente trabalho deve-se ao fato dele receber percentuais baixos de aditivos, revelando dessa maneira propriedades herdadas quase que exclusivamente do seu principal componente, o clínquer.

As características químicas cujas interações, estão ligadas intrinsecamente às propriedades físicas e ao desempenho mecânico, desperta o interesse dos pesquisadores, sobretudo do Engenheiro de Materiais, em investigar de maneira integral e minuciosa com o objetivo de expandir o conhecimento acerca do Cimento Portland. À medida que tais conhecimentos forem expandidos, proporcionando uma orientação aos usuários de procedimentos e das aplicações mais adequadas aos materiais estudados no presente trabalho.

Pela sua importância, o Cimento Portland é um produto extremamente regulado por diversas normas técnicas. A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) juntamente à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) são as responsáveis pela regulação dessas normas. A ABNT NBR 16697 CIMENTO PORTLAND – REQUISITOS, define e classifica cada tipo de cimento pelas propriedades e aplicações normatizando uma série de características

igualmente relevantes, como finura, tempos de pega, composição química, resistência química, resistência mecânica, métodos de ensaio, materiais utilizados nos ensaios, entre outros.

No entanto, tais normas possuem a finalidade de garantir a qualidade mínima do cimento produzido no Brasil. O presente trabalho propõe outra visão, destacando tanto as paridades quanto as variações, em prol de sugerir possíveis alterações de processo em virtude de melhoramento de desempenho, bem como economia de recursos naturais ou financeiros durante a fabricação dos cimentos estudados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas, identificando as variáveis com maior relevância no desempenho de amostras de Cimento Portland, fabricadas por empresas da região nordeste.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Apresentar os resultados alcançados nas caracterizações, mediante os ensaios de FRX, Granulometria à Laser, Finura, Blaine, Resistência à Compressão, Início e Fim de Pega, Perda ao Fogo e Resíduo Insolúvel, DRX e refinamento estrutural pelo método de Rietveld.

Fazer o estudo de caracterização física química e mecânica frente as normas:

- Normas de caracterização Física:
 - ABNT NBR 16697 - Cimento Portland – Requisitos;
 - ABNT NBR 11579 - Determinação Do Índice De Finura Por Meio De Peneira 75 μ m (Nº 200);
 - ABNT NBR 12826 - Determinação Do Índice De Finura Por Meio De Peneirador Aerodinâmico;
 - ABNT NBR 16372 - Determinação Da Finura Pelo Método De Permeabilidade Do Ar (Método De Blaine).
- Normas de caracterização Químicas:
 - ABNT NBR NM 10 - Análise Química - Disposições Gerais;
 - ABNT NBR NM 15 - Determinação De Resíduo Insolúvel;
 - ABNT NBR NM 18 - Determinação De Perda Ao Fogo;
 - ABNT NBR 14656 - Análise Química Por Espectrometria De Raios X.

- Normas de caracterização Mecânicas:
 - ABNT NBR 7215 Determinação De Resistência À Compressão.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O CIMENTO

O Cimento Portland é um pó cinza produzido a partir do clínquer adicionado de Sulfato de cálcio em pequena proporção, de caráter hidráulico com propriedades aglomerantes, aglutinantes, que endurece em contato com a água tornando-se hidrofóbico. Na forma de concreto, torna-se uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra. Graças a essas características, o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água (MEHTA, 2008).

No Brasil, o cimento Portland começou a ser produzido na ilha de Tiriri, na Paraíba-PB, em uma usina, hoje desativada, pertencente à Companhia Brasileira de Cimento Portland e administrada pela Companhia Francesa de Cimento, por volta de 1892. A construção foi planejada pelo engenheiro Luís Felipe Alves, que estudou na França. A fábrica funcionou por aproximadamente 6 meses, até ser desativada por problemas de manutenção dos equipamentos e desentendimentos entre os investidores (LEAL et al., 2015).

Tem como ponto de partida para a resistência mecânica o início da perda de plasticidade, e como parâmetro convencionado internacionalmente se define a resistência mecânica como a compressão de corpos de prova após 28 dias do início da pega, podendo atingir mais de 50 Mpa. Apesar de não ser a resistência final, é a que define sua qualidade.

As vendas de cimento no Brasil registaram um total de 12,7 milhões de toneladas no primeiro trimestre de 2019, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), um aumento de 1,3% em relação ao mesmo trimestre do ano anterior. No mês de março, os resultados atingiram 4,1 milhões de toneladas, uma queda de 6,6% comparada com o mesmo mês de 2018, influenciado, principalmente, pela menor quantidade de dias úteis, 21,5 contra 23,5. Já nos últimos 12 meses (abril de 2018 a março de 2019), as vendas acumuladas atingiram 53 milhões de toneladas de cimento, uma redução de 0,1% em comparação com o mesmo período anterior (abril de 2017 a março de 2018) (ABCP, 2018). Como pode ser observado abaixo na figura 02.

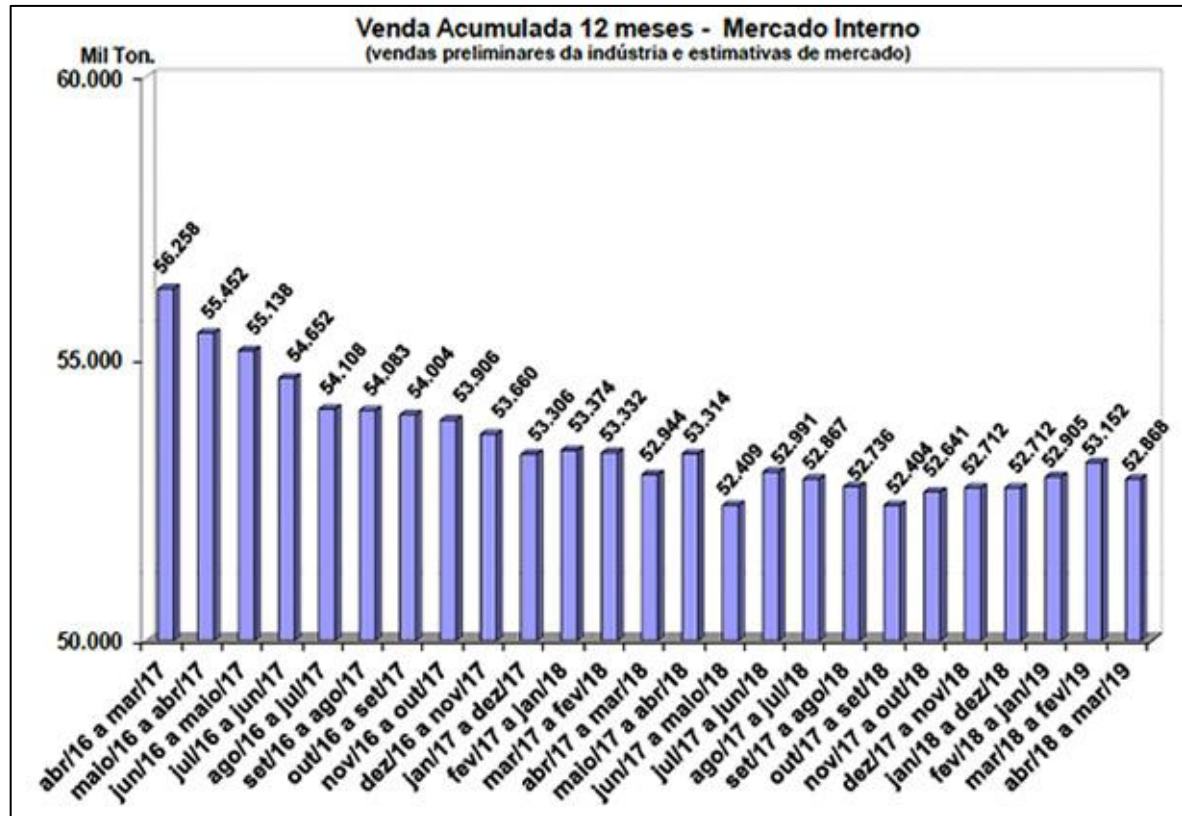


Figura 2. Mercado Nacional do cimento (ABCP, 2019).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio do Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB-18) promove estudos e estabelece a normatização, classificando os tipos, categorias e composição do cimento produzido no Brasil. No ano passado foram reunidos todos os tipos de cimento em uma única norma de especificação, a ABNT NBR 16697. Em que pese a possibilidade de se ajustar, por meio de dosagens adequadas, esses diversos tipos de cimento às mais diversas aplicações, a análise de suas características e propriedades mostra que certos tipos são mais apropriados para determinadas aplicações (ABCP, 2018).

3.2 FABRICAÇÃO DO CIMENTO

A fabricação de qualquer cimento Portland passa pelo mesmo processo produtivo, com pequenas alterações de acordo com sua clarificação. Tais etapas podem ser condensadas e

descritas como: a extração e britagem primaria da matérias-primas, pré-homogeneização e moagem de cru, clinquerização, moagem e expedição do cimento. Na figura 03 abaixo apresenta-se todo o caminho percorrido da extração até a expedição seja a granel ou o cimento ensacado.

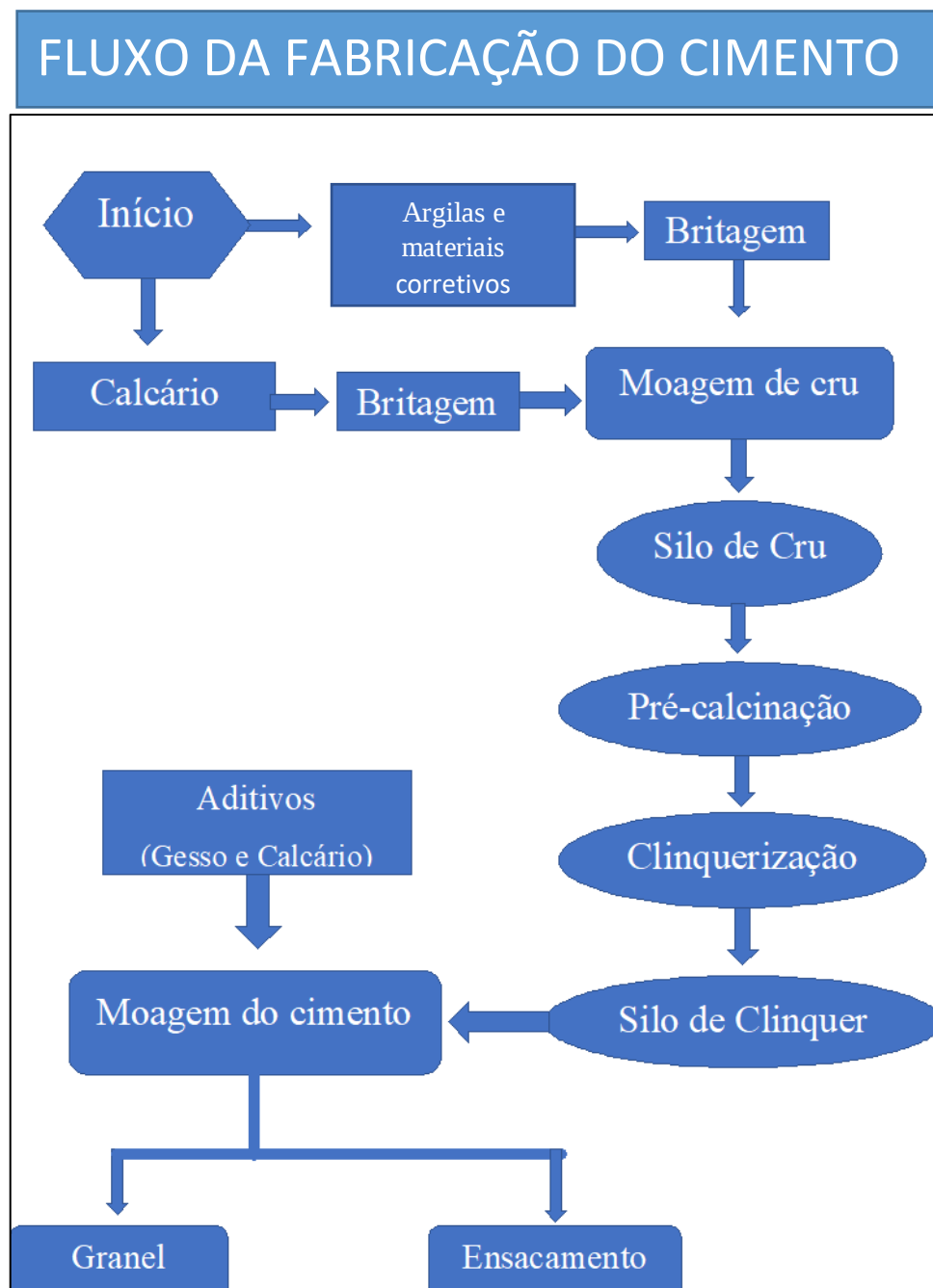


Figura 3. Fluxograma da fabricação do cimento. (Autor)

3.2.1 Matérias primas, Britagem e Moagem do Cru

A principal matéria prima do cimento é o Calcário (CaCO_3), a segunda matéria prima é argila, que se dividem por composição química em três, silicosa, aluminosa e ferruginosa, fontes de (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), essas por sua vez quando em proporções calculadas ao passarem pelo moinho de cru, tornando-se um material pulverulento denominado de farinha ou cru, que é armazenado no silo de cru. Para a determinação da melhor mistura a partir dos resultados de análise de FRX e aliadas as equações de determinação do fator de saturação de calcário FSC, modulo de sílica MS e modulo de alumina MA (ZAKON, 1989). Equação abaixo.

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

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

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

O controle do FSC está ligado ao percentual de calcário necessário para a obtenção dos percentuais adequados de C_3S e C_2S responsáveis pela resistência final do cimento. Em seguida deve-se ajustar o MS, quando alto pode provocar desgaste excessivo dos refratários do forno, quando baixo é responsável pelo aumento da colagem nas paredes do forno túnel. Já o MA atua como regulador da geração de C_3A e C_4AF , responsáveis pela resistências iniciais e químicas do cimento, respectivamente.

3.2.2 Clinquerização

É o processo de transformar a farinha ou cru em clínquer, para isso a farinha é previamente aquecida quando passar pelos 4 estágios da torre de ciclones, em seguida a farinha já aquecida e descarbonatada passara pelo calcinador, equipamento com finalidade redutora e onde é consumida mais de 50% do combustível e atingindo temperatura aproximada de 900°C ,

veremos abaixo a equação da reação. Passado pelo calcinador a farinha quente não é mais cru, entrando agora no ciclone do 5º estágio para realizar a separação e eliminação dos gases de CO₂ (ZAKON, 1989). Demonstrado na equação (4) abaixo.



Agora a farinha decarbonatada entrará no forno túnel onde terá um tempo de residência aproximado de 15 min e atingindo temperaturas de 1350 a 1500°C na saída do forno onde se faz necessário um resfriamento brusco para que as reações não sejam desfeitas e se obtenha a maior quantidade de C₃S possível. Durante esse processo a farinha se transformará por meio do processo chamado de sinterização na rocha sintética denominada de clínquer.

Sendo o clínquer resultado de uma mistura heterogênea processada e cinderizada a 1450°C, gerando diversos composto de óxidos de calcário e sílica, alumina e óxido de ferro. O clínquer é o constituinte principal do cimento e responsável direto por suas propriedades de resistência química e física, intrinsecamente ligadas à sua composição química. A composição química se divide nas fases de Alita (3CaO.SiO₂ ou C₃S), Belita (2CaO.SiO₂ ou C₂S), Aluminato Tricálcico (3CaO. Al₂O₃ ou C₃A), e Ferro Aluminato Tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ ou C₄AF), com suas quantidades variando entre 45 a 65%, 15 a 30%, 6 a 12% e 6 a 8%, respectivamente, para o cimento Portland comum (TAYLOR, 1990).

O método mais usado até hoje para se avaliar as quantidades do clínquer produzido é pelas equações de Bogue que mostram as estimativas para o C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF (TAYLOR, 1990). conforme equações abaixo.

$$C_3S = 4,07CaO + 7,6SiO_2 + 1,43Fe_2O_3 - 6,71Al_2O_3 \quad (5)$$

$$C_2S = 8,6SiO_2 + 1,08Fe_2O_3 + 5,08Al_2O_3 - 3,07CaO \quad (6)$$

$$C_3A = 2,65Al_2O_3 - 1,69Fe_2O_3 \quad (7)$$

$$C_4AF = 3,04Fe_2O_3 \quad (8)$$

3.2.3 Moagem do Cimento e expedição

O clínquer se torna cimento após ser finamente moído juntamente com a gipsita e seus aditivos, conforme for o tipo desejado, utiliza-se para isso esteiras dosadoras na alimentação dos, geralmente utilizados moinhos de bolas equipados de duas câmaras onde são carregadas com bolas de aço de diferentes diâmetros para a maior eficiência do equipamento.

3.3 CIMENTO PORTLAND CPV – ARI

Escolheu-se para o presente estudo o Cimento Portland CPV ARI por conter o maior teor de clínquer dentre os cimentos disponíveis e, assim, consistir em um cimento “mais puro” em termos de adições minerais, além de apresentar uma moagem mais fina que o torna mais reativo (CASTRO et al., 2017). Já Cadore (2008) diz que, fornece maior teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ após a Hidratação, devido a maior quantidade de C_3S (silicato Tricálcico) em sua composição, e por conter maior quantidade de clínquer e consequentemente menor teor de adições em sua composição.

Também pode ser observado que o cimento CPV ARI possui menor teor de adições do que o CP II-F 32, ou seja, é mais puro e possui mais clínquer. Provavelmente por isso, o CP V ARI necessite de maior quantidade de água para dispersar os grãos e garantir a adequada reação de hidratação (MEDEIROS-JUNIOR et al., 2014). Esse tipo de cimento deve ser utilizado preferencialmente quando a aplicação exigir da característica predominante que é uma resistência inicial alta, por ser constituído por 95% de clínquer, o cimento CPV-ARI pode ser considerado como um dos tipos de cimento de maior custo ambiental e energético (REZENDE et al., 2012).

4 METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS

Na elaboração deste trabalho foram utilizadas sete amostras de Cimento Portland de alta resistência inicial, CPV-ARI, que correspondem a cinco diferentes indústrias do polo cimenteiro da região nordeste. Tais amostras foram codificadas como amostras (A, B, C1, C2, D, E1 e E2), para as amostras de mesmo fornecedor foi acrescentado às letras que representam as indústrias, números que representam lotes distintos.

4.2 MÉTODOS

As técnicas de caracterizações físico/químico, mecânica e micro estruturais que pretendemos fazer nesse presente trabalho serão:

- Determinação da finura por peneirador aerodinâmico;
- Determinação da área específica pelo método de Blaine;
- Análise da distribuição granulométrica (método à laser);
- Determinação dos tempos de pega;
- Determinação do resíduo insolúvel;
- Determinação da perda ao fogo;
- Caracterização por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX);
- Caracterização por Difração de Raios-X (DRX);
- Refinamento Topas (método de Rietveld);
- Determinação da resistência a compressão.

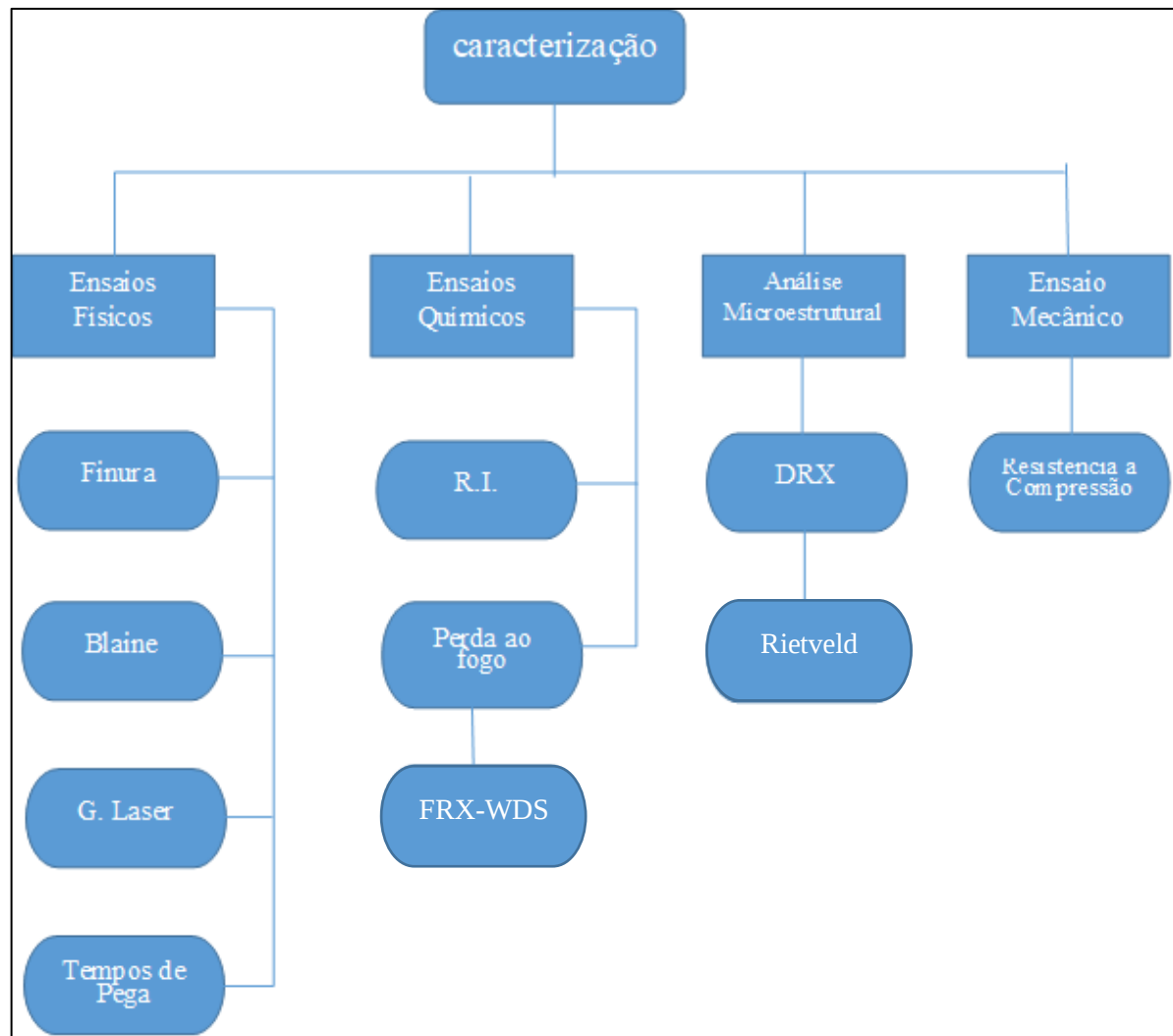


Figura 4. Fluxograma das caracterizações (Autor).

4.2.1 Determinação da finura por peneirador aerodinâmico

Nesse ensaio foi utilizado o peneirador aerodinâmico Metal Cairo Modelo: PVE-I conforme figura 05, seguindo as especificações das ABNT NBR 12826 / 11579. Foram realizados os ensaios por meio das peneiras:

- 75 μ m (n°200) usando 20g de cada amostra a pressão em 200mm de coluna da água por 3min;
- 45 μ m (n°325) usando 10g de cada amostra a pressão em 200mm de coluna da água por 5min.

Para os ensaios foram coletadas as massas retidas e em seguida pesadas obtendo-se assim os resultados de duas amostras de Cimento Portland CPV – ARI.



Figura 5. Peneirador Aerodinâmico Metal Cairo Modelo: PVE-I (Autor).

4.2.2 Determinação da área específica pelo método de Blaine

A superfície específica é definida em função da passagem de uma camada de ar por um volume definido de material. O ensaio foi realizado pela norma ABNT NBR 16372 Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine) e o equipamento utilizado foi o Permeabilímetro de Blaine - Semiautomático ACMEL modelo: BSA1 conforme figura 06. Esse ensaio foi realizado para todas as amostras de Cimento Portland CPV – ARI.



Figura 6. Permeabilímetro de Blaine - Semiautomático ACMEL modelo: BSA1 (Autor).

4.2.3 Análise da distribuição granulométrica (método a laser)

Esses instrumentos objetivam a função de distribuição do espalhamento radial da luz das partículas. Nesse método uma suspensão de partículas passa através de um feixe de laser, e o espalhamento radial da luz é capturado por fotodetectores localizado perpendicular ao eixo ótico. Um modelo apropriado é usado para processar a distribuição de espalhamento de luz e obter a distribuição do tamanho das partículas. Esse método é aplicado quando se tem uma larga faixa de tamanhos em meios variados. É possível obter informações a partir desses instrumentos numa faixa de tamanhos que variam de 0,1 a 500 μ m / 100 classes. Os modelos de espalhamento que são empregados no processamento dos dados assumem a esfericidade da partícula [apud pinto].

O equipamento utilizado foi o granulometria à laser marca Cilas e modelo 1090 apresentada na figura x abaixo, o método escolhido foi o via a seco para evitar as reações de hidratação do material durante o ensaio, conforme figura 07.



Figura 7. Granulômetro à Laser marca Cilas e modelo 1090 (Autor)

4.2.4 Determinação dos tempos de pega

Nessa etapa de caracterização são obtidos os tempos de início e fim de pega que indicam o final do tempo de trabalhabilidade e a solidificação da pasta de cimento, respectivamente. Para esse ensaio segue-se a ABNT NBR 16607, enquanto para o preparo da pasta de

consistência normal segue a ABNT NBR 16606. A figura 08 mostra o aparelho de Vicat da marca Solotest usado no ensaio.



Figura 8. Aparelho de Vicat da marca Solotest (Autor).

4.2.5 Determinação do resíduo insolúvel

Para realizar este ensaio seguiu-se a ABNT NBR NM 15, para cimentos sem adição de pozolanas, pesa-se 1g da amostra de cimento e transfere-se para um béquer de 250ml. Nele adiciona-se 25ml de água fria e homogeneiza-se com um bastão de vidro. Após homogeneizado, faz-se um ataque com 5ml de ácido clorídrico concentrado e aquece-se o conteúdo. Após o começo da ebulição, adiciona-se mais 25ml de água quente e espera-se até o conteúdo entrar em ebulição novamente.

Após a ebulição, filtra-se a solução utilizando funil e papel de filtro faixa branca. Com ajuda de uma pissêta, lava-se o béquer 4 vezes com água quente e o papel de filtro mais 4 vezes com água quente. Após a filtração, transfere-se o papel de filtro para um béquer contendo 100ml de solução de hidróxido de sódio a 1%, e com a ajuda de um bastão de vidro, macera-se o papel de filtro. Adiciona-se 3 gotas do indicador vermelho de metila e aquece-se o conteúdo.

Após novo começo de ebulição, adiciona-se ácido clorídrico concentrado até que ocorra mudança de cor de amarelo para rosa. Transfere-se então o conteúdo para o funil com filtro faixa branca. Após a transferência, lava-se o béquer 8 vezes com água quente e o papel de filtro mais 8 vezes. Após o término da filtragem, transfere-se o conteúdo para um cadinho de porcelana previamente tarado e seca-o na chapa aquecedora.

Após seco, queima-se lentamente o papel o papel de filtro com auxílio do bico de Bunsen, sem inflamar, até restar apenas cinzas no cadinho. Após a queima, transfere-se o conteúdo para o forno mufla a 950°C por 30 minutos. Esfria-se o conteúdo e pesa-se a massa do material calcinado. Determina-se o percentual de resíduo insolúvel através da equação (9):

$$\%RI = \frac{m_{\text{Calcinada}} - m_{\text{Cadinho}}}{m_{\text{amostra}}} \quad (9)$$

4.2.6 Determinação da perda ao fogo

Nesta análise seguiu-se a ABNT NBR NM 18, determinando-se o percentual de material calcinado em forno mufla entre 900 e 1000°C, a perda ao fogo é de suma importância para comparar teores adicionados de material carbonático, bem como para a correção da composição química do cimento, já que boa parte do material analisado por fluorescência de raios-x é fundido a altas temperaturas havendo perda de material e consequente desvio nos resultados da leitura caso não leve este fator de correção em consideração, conforme figura 09.



Figura 9. Forno Tipo Mufla em 951°C (Autor).

4.2.7 Caracterização por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX)

Nesta análise, compara-se uma amostra de composição desconhecida com diversas curvas de calibração. Para o cimento, existem curvas para os seguintes componentes: dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), trióxido de enxofre (SO_3), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O) e anidrido fosfórico (P_2O_5).

A preparação da amostra consiste em pesar aproximadamente 0,02g de iodeto de amônia, 6g de Tetraborato de Lítio e 1,5g da amostra de cimento. Após a pesagem, transfere-se o conteúdo para cadinhos de platina (95%) e ouro branco (5%), que serão aquecidos pela máquina de fusão. Têm-se como resultado da fusão dos reagentes com o cimento um material vítreo, que é chamado de pérola. Após o resfriamento desta, identifica-se de acordo com o número ou nome do ensaio realizado, conforme figura 10.



Figura 10. Acessório de Fusão das Pérolas para FRX (Autor).

Transfere-se a pérola para o equipamento de Raios-X (Figura 11), onde identifica-se a amostra, insere-se a data e o resultado da perda ao fogo para o cimento fundido. A perda ao fogo corrige a composição da amostra já que, no processo de fusão, parte do material é calcinado. O equipamento foi da Panalytical e modelo Axios Max do Laboratório de Controle de Qualidade da Elizabeth Cimentos Ltda.



Figura 11. FRX marca Panalytical e modelo Axios Max (Autor)

4.2.8 Caracterização por Difração de Raios-X (DRX);

Cada uma das amostra de Cimento Portland CPV-ARI foi macerada em almofariz, até que 100% das partículas pudessem passar pela peneira ABNT nº400 (38 μ), em seguida cerca de 1g foi dissolvido em álcool isopropílico e devidamente acondicionado em porta amostra *Low background* de modo que enquanto o solvente evapora as partículas são uniformemente depositadas na superfície do porta amostras formando uma camada fina plana e homogênea. O equipamento utilizado é da marca Bruker modelo D2 Phaser (figura 12,) calibrado com os seguintes parâmetros:

- Radiação Cu (30 kV, 10mA), filtro Ni
- Varredura contínua de 5 a 70 ° 2Theta,
- Largura do passo 0,01 °
- Tempo de contagem 1,00seg por etapa
- Tempo total de verificação em cerca de 120 min.



Figura 12. Difratorômetro de Raios-X marca Bruker modelo D2 Phaser (Autor).

4.2.9 Refinamento Estrutural (método de Rietveld)

Para o refinamento das estruturas cristalográficas complexas do Cimento Portland CPV – ARI decidiu-se pelo método de Rietveld onde foi utilizado o programa Topas e definidos os parâmetros de refinamento descritos a seguir:

- Linha de base (*Background*);
- Fator de escala;
- Parâmetros de cela;
- Deslocamento;
- Fator de estrutura.

4.2.10 Determinação da resistência a compressão

Os ensaios de resistência a compressão seguiram as normas da ABNT NBR 7215, onde foram preparados 16 corpos de prova cilíndricos para cada uma das amostra, medindo 50mm de diâmetro e 100mm de altura que serão divididos em 4 grupos de 4 corpos de prova sendo

ensaiados cada grupo com 1 dia de cura (R1), 3 dias de cura (R3), 7 dias de cura (R7) e 28 dias de cura (R28). Os resultados dos ensaios apresentados representam as médias das resistências a compressão de cada grupo de corpos de prova para cada amostra de Cimento Portland CPV-ARI, nas figuras abaixo veremos os corpos no tanque de cura e imagem da prensa hidráulica da Forney – F250 utilizada nos ensaios, conforme figuras 13 e 14.



Figura 13. Corpos de prova em tanque de cura.



Figura 14. Prensa hidráulica da Forney – F250 (Autor).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS

5.1.2 Finura por peneirador aerodinâmico

As empresas produtoras de cimento devem cumprir a ABNT NBR 11579, a figura 15 mostra, como parâmetro de qualidade na finura, norma essa que estabelece 6% como valor máximo de massa retida na peneira 75µm para o Cimento Portland CPV – ARI. Os resultados mostraram que, exceto a amostra B com 1,5% retido em 75µm e 2,5% retido em 45µm, todas as amostras obtiveram finura inferior a 0,3% retido em 75µm e 1,4 retido em 45µm. Vale salientar que as amostras E1 e E2 obtiveram resultados de iguais de 0,1% em 75µm e 0,3% e 0,4% em 45µm.

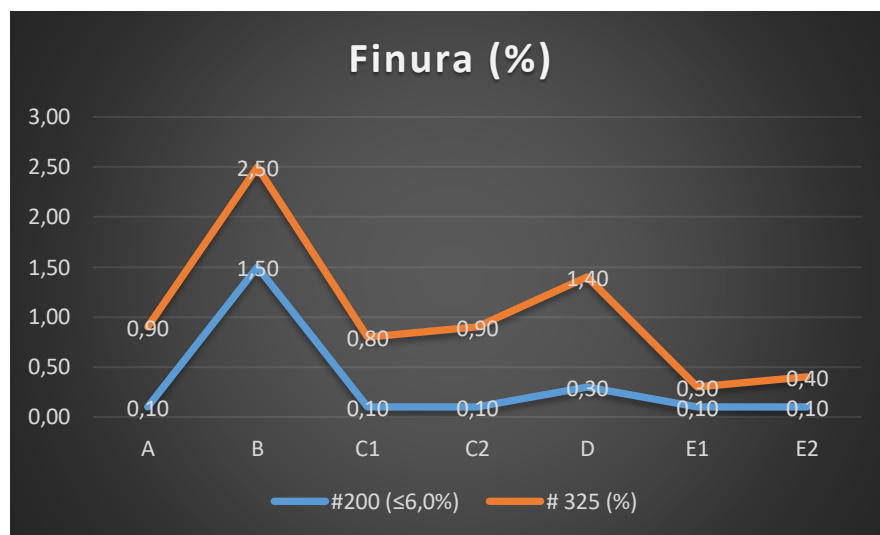


Figura 15. Gráfico das finuras em peneira #200 e #325 (Autor).

Como o processo de moagem possui contribuição direta no processo de hidratação, infere dizer que todas as amostras cumprem os requisitos da ABNT NBR 11579, sendo que a amostra B apresenta uma finura mais grosseira comparada com as demais amostras.

5.1.3 Área específica pelo método de Blaine

O resultado desse ensaio na figura 16, mensura a área específica em (cm^2/g) de cada amostra analisada, resultados importantes no auxílio ao entendimento de comportamentos relacionados à reatividade do Cimento Portland.

Com base nos dados obtidos pode-se avaliar que o fabricante das amostras C1 e C2 possuem um processo de moagem cujo resultado é a produção do cimento com áreas específicas de $5600\text{cm}^2/\text{g}$ e $5540\text{cm}^2/\text{g}$, resultados cerca de $1000\text{cm}^2/\text{g}$ a mais de área em relação aos demais fabricantes. Esses resultados, associados a outros parâmetros, podem se refletir, por exemplo, em menores tempos de pega, maior calor de hidratação, maior resistência final.

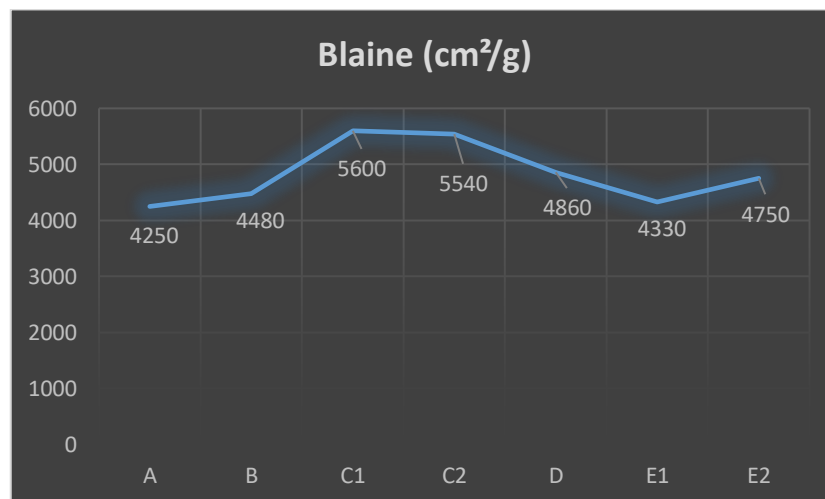


Figura 16. Gráfico da Área específica (Blaine).

5.1.1 Análise da distribuição granulométrica (método a laser)

Os dados obtidos pela Granulometria à Laser mostraram-se coerentes aos obtidos no ensaio de Blaine quando analisados os valores de Diâmetro Médio das partículas. A medida em que o Blaine aumenta o Diâmetro Médio das partículas aumenta quase na mesma intensidade, conforme visto na tabela 01 abaixo.

Tabela 1. Resultados da Granulometria à Laser.

Amostra	A	B	C1	C2	D	E1	E2
Diâmetro a 10% (μm)	0,47	0,67	0,60	0,50	0,65	0,62	0,26
Diâmetro a 50% (μm)	4,31	4,83	3,83	4,25	4,14	4,89	5,19
Diâmetro a 90% (μm)	25,98	25,33	17,35	18,38	20,14	22,04	25,30
Diâmetro Médio (μm)	9,05	9,20	6,85	7,44	7,60	8,49	9,23

5.1.4 Determinação dos tempos de pega

Os resultados dos tempos de pega são importantes informações aos usuários do produto pois indicam o tempo de trabalhabilidade do cimento a partir do início de sua hidratação. Considerando que a natureza do material estudado é um cimento de alta resistência inicial, sugere-se que os tempos de pega sejam baixos. Todas as amostras obtiveram resultados para do intervalo entre o início e o fim da pega entre 45 e 65min, contudo as amostras B (IP 4:10; FP 5:00) e E2 (IP 3:30; 4:15) podem ser considerados tempos de pega excessivos, podendo prejudicar o manuseio do produto durante sua aplicação conforme tabela 02.

Tabela 2. Resultados dos tempos de Início e Fim de pega.

CIMENTOS CPV-ARI / Tempos de pega							
Amostra	A	B	C1	C2	D	E1	E2
I. P. (h:min)	02:10	04:10	01:55	01:45	02:15	02:50	03:30
F. P.(h:min)	03:15	05:00	02:45	02:45	03:15	03:45	04:15

5.1.5 Resíduo Insolúvel

Os resultados mostrados na figura 17, indicam que todas as Amostras cumprem os requisitos ($\leq 3,5\%$) de resíduo conforme a ABNT NBR16697. Como os valores de R.I. tanto do calcário como da gipsita são muito superiores aos do clínquer pode-se sugerir, dentre as amostras, quais delas possuem maior ou menor percentual de adições.

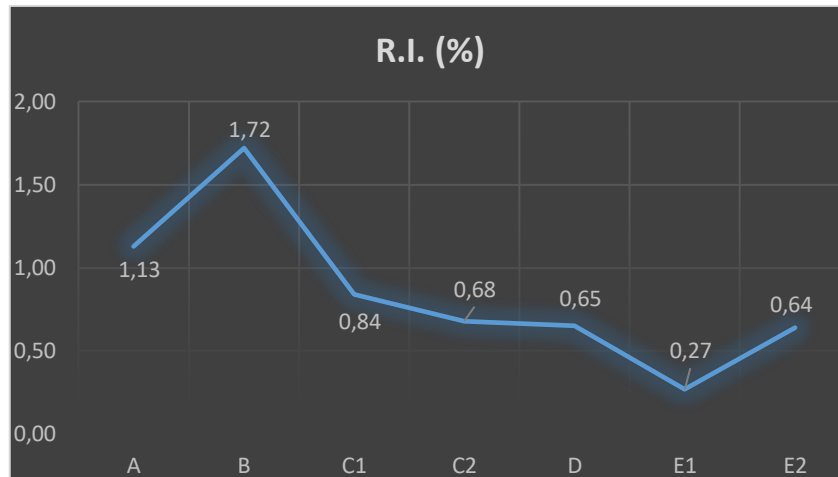


Figura 17. Resultados dos ensaios de Resíduo Insolúvel.

5.1.6 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo é utilizado tanto para corrigir a composição química das amostras fundidas para análise de FRX quanto como um dos parâmetros para estimar quantidades de adições nos cimentos estudados, considerando as variações de P.F. das adições de gipsita e calcário em relação ao clínquer. Os resultados indicam que o fabricante das amostras E1 e E2 utiliza teores de gipsita e calcário inferior aos demais fabricantes estudados conforme a figura 18.

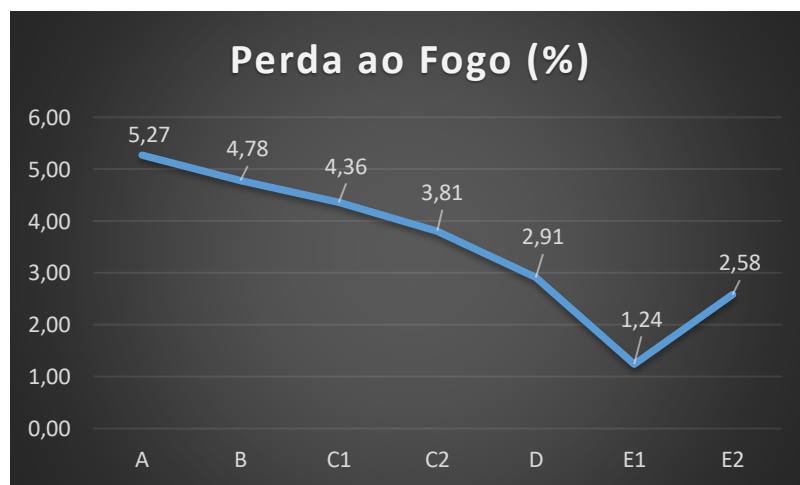


Figura 18. Resultados da Perda ao Fogo.

5.1.7 Caracterização por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX)

Com relação a composição química toda as amostras apresentaram percentuais de MgO e SO₃ conforme as normas estabelecem enquanto os demais teores de óxidos apresentam se coerentes com variações decorrentes da diversidade de matérias primas utilizadas no processo de cada um dos fabricantes estudados. Destacando os resultados das amostras E1 e E2, lotes diferentes do mesmo fabricante, apresentando aumento de MgO (0,44%) e SO₃ (0,71%) e a amostra C2 aumentou em relação a C1 apenas o MgO (0,84%), conforme tabela 03.

Tabela 3. Resultados da Composição Química por FRX.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR FRX							
Óxidos	A	B	C1	C2	D	E1	E2
SiO₂ (%)	19,04	17,61	17,14	17,56	18,47	19,38	18,92
Al₂O₃ (%)	4,63	4,15	4,11	4,04	4,67	4,96	4,36
Fe₂O₃ (%)	4,01	2,85	2,32	2,39	2,96	2,78	2,59
CaO (%)	62,30	59,78	60,64	60,05	62,55	63,81	62,39
MgO (≤6,5%)	1,10	5,72	5,47	6,31	2,54	1,97	2,41
SO₃ (≤4,5%)	2,52	3,56	4,44	4,32	3,66	3,35	4,06
Na₂O (%)	0,02	0,28	0,07	0,10	0,13	0,20	0,16
K₂O (%)	0,75	1,02	0,89	0,85	1,33	1,19	1,08
P₂O₅ (%)	0,0	0,02	0,34	0,36	0,50	0,89	0,78

5.1.8 Caracterização por Difração de Raios-X (DRX)

As análises difratográficas geraram resultados conforme o esperado, não havendo variações na identificação das fases cristalinas em todas as amostras conforme descritas abaixo.

- Alita C₃S (M1);
- Alita C₃S (M3);
- Belita C₂S;
- Aluminato Tricálcico C₃A
- Ferrita C₄AF;
- Periclásio

- Bassanita
- Gipsita

No entanto o que difere os resultados do difratograma foram as intensidades das fases, com isso, apresentando variações entre os tamanhos dos picos quando comparadas as amostras, conforme pode ser visto nas figuras 19 a 25 abaixo.

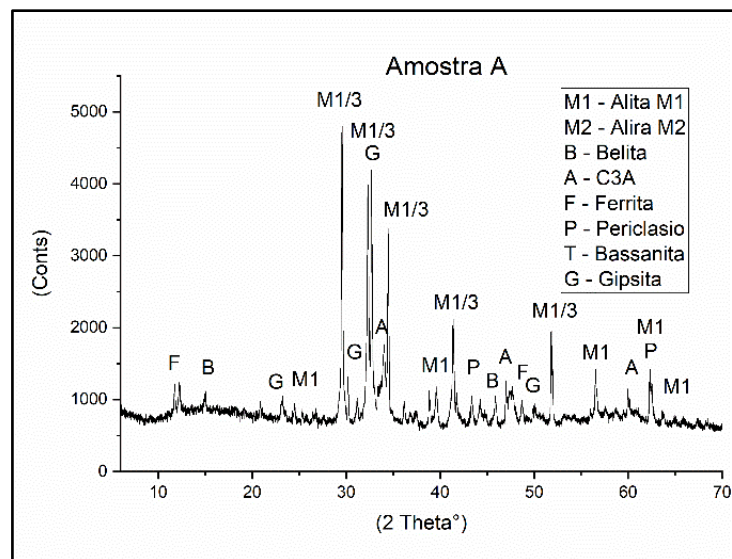


Figura 19. Gráfico DRX Amostra A.

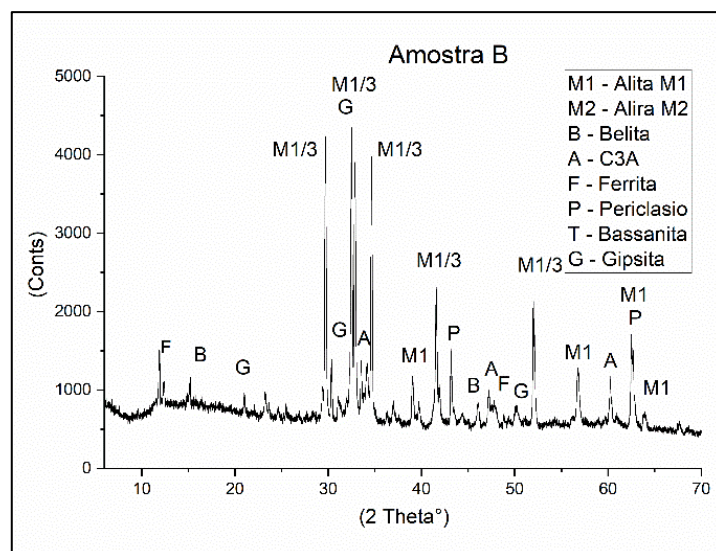


Figura 20. Gráfico DRX Amostra B.

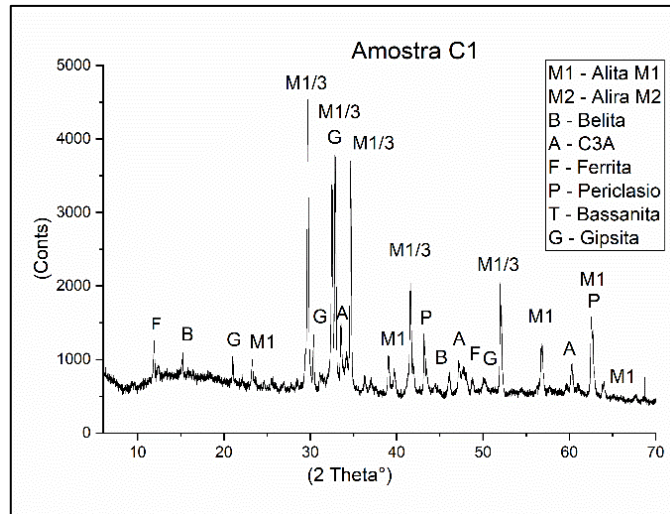


Figura 21. Gráfico DRX AmostraC1.

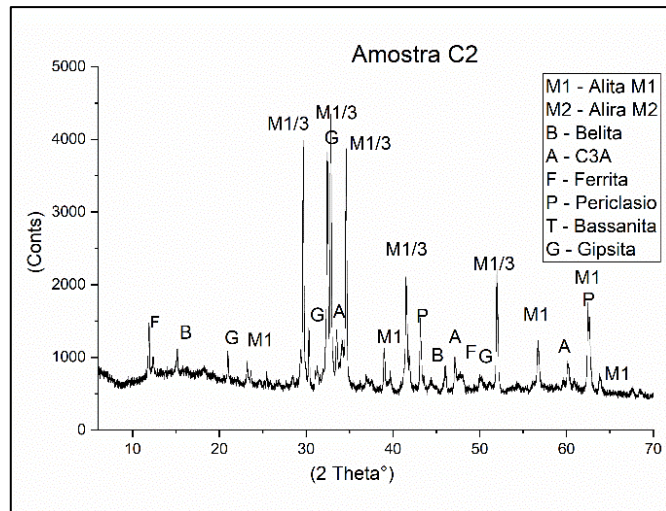


Figura 22. Gráfico DRX Amostra C2.

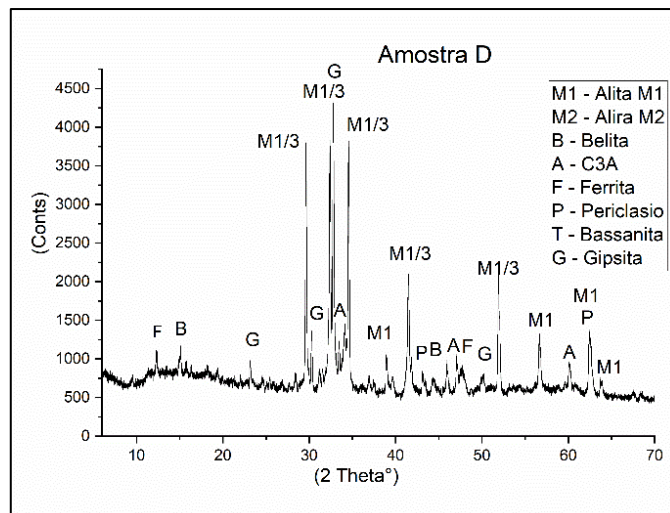


Figura 23. Gráfico DRX Amostra D.

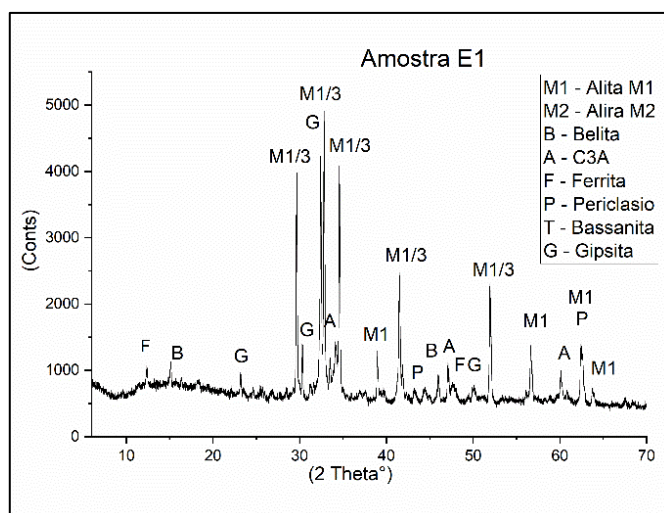


Figura 24. Gráfico DRX Amostra E1.

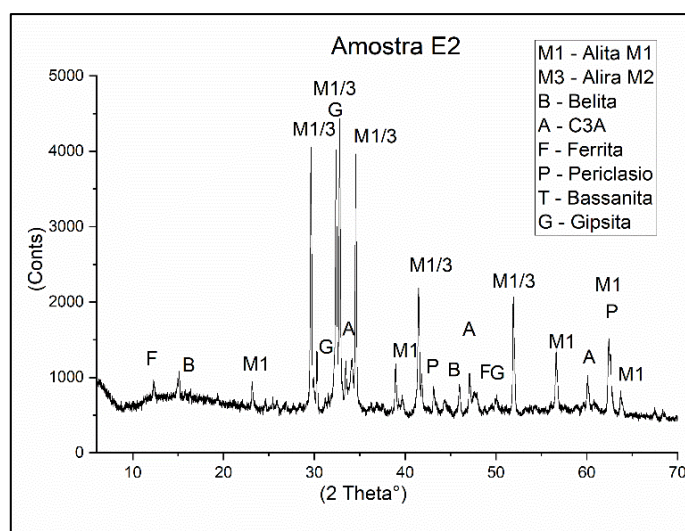


Figura 25. Gráfico DRX Amostra E2.

5.1.9 Refinamento Topas (método de Rietveld)

Com o advento de ferramentas computacionais mais modernas, foi possível além de identificar as fases cristalinas, estimar com considerado grau de precisão os percentuais de cada uma das fases cristalinas encontradas nas amostras de cimento Portland CPV – ARI analisado no presente trabalho. Utilizando a ferramenta computacional Topas e realizando o refinamento pelo método de Rietveld, obteve-se resultados mais completos como os percentuais demonstrados na tabela 04 abaixo.

Tabela 4. Resultados de Refinamento Estrutural (Topas).

Fases Crist.	A	B	C1	C2	D	E1	E2
M1	39,55	42,44	46,58	43,11	45,15	59,29	57,21
M3	11,85	22,24	21,67	16,39	17,19	5,35	11,97
C2S	20,69	10,35	5,16	14,94	18,29	16,54	11,01
C3A	3,54	3,34	5,75	4,23	4,17	3,96	4,31
C4AF	14,46	9,32	6,81	7,92	10,74	10,70	8,97
BASSANITA	4,74	3,10	3,74	2,07	2,76	3,11	3,51
GESSO	4,67	4,44	5,21	5,48	0,47	0,24	1,13
PERICLÁSIO	0,50	4,77	5,08	5,86	1,23	0,81	1,89
M1/M3	3,34	1,91	2,15	2,63	2,63	11,08	4,78
C3S+C2S	72,09	75,03	73,41	74,44	80,63	81,18	80,19
GESSO TOTAL	9,41	7,54	8,95	7,55	3,23	3,35	4,64

5.1.10 Determinação da resistência a compressão

O ensaio de resistência a compressão é o principal parâmetro utilizado para a definição do desempenho dos cimentos em geral. Nesse estudo foi possível uma comparação direta entre as resistências a compressão das amostras de Cimento Portland CPV – ARI de 5 fabricantes da região nordeste.

Conforme pode ser visto na figura 26 abaixo, todas as amostras obtiveram resultados conforme o esperado, exceto a “Amostra A” onde obteve o resultado de 11,8Mpa para o ensaio de 1 dia de cura (R1), ficando fora da conformidade segundo a ABNT NBR 16697 que define como parâmetros mínimos de resistência:

- $\geq 14\text{Mpa}$ a 1 dia de cura;
- $\geq 24\text{Mpa}$ a 3 dias de cura;
- $\geq 34\text{Mpa}$ a 7 dias de cura;
- Não há parâmetro para 28 dias de cura.

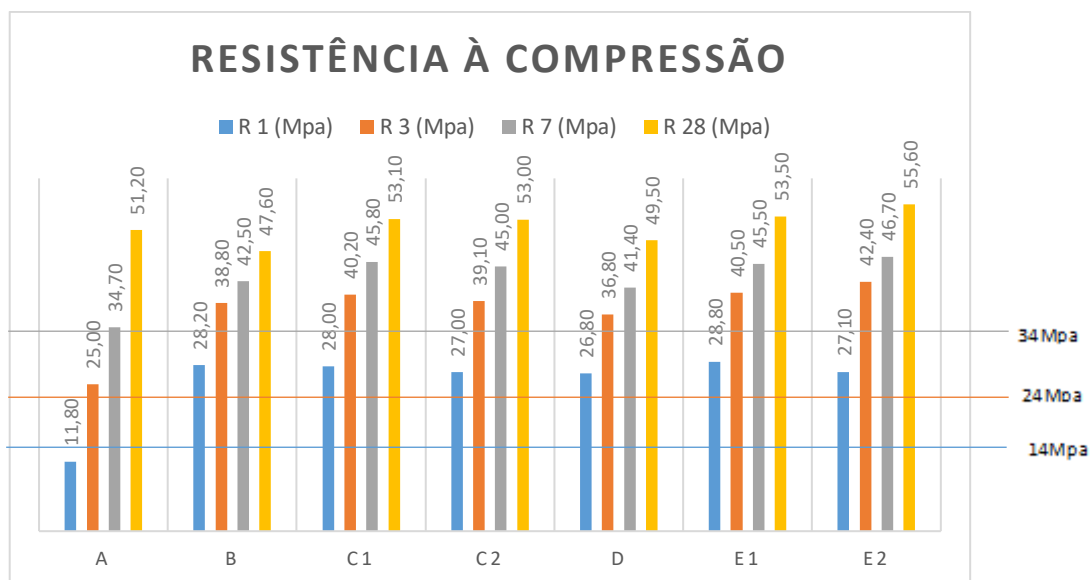


Figura 26. Resultados dos ensaios de Resistencia a Compressão.

5.1 DISCUSSÃO

Do ponto de vista das características físicas, os resultados encontrados nos ensaios de Finura, Blaine e Granulometria à Laser, quando analisados em conjunto, mostrou que as fabricas tendem a produzir cimento Ari com finura significativamente inferior à norma, tendência essa com objetivo de atingir áreas específicas maiores e consequentemente uma reatividade do Cimento Portland CPV – ARI maiores, principalmente quando comparadas as resistências à 1 dia e 3 dias, atentando também aos resultados de tempos de pega contribuindo para a indicação de aplicabilidade, como por exemplo os cimentos C1 e C2 para uso em pré moldados.

Partindo para as caracterizações química de perda ao fogo, R.I. e FRX, DRX e o refinamento (Rietveld) pôde-se estimar que as amostras D, E1 e E2 possuem menores teores de adições de gipsita e calcário. Destaca-se também que, quanto maiores os percentuais das fases polimórficas da Alita, M1 e M3, associada a fase C_2S maior foi a resistência final, complementando com os percentuais encontrados de SO_3 nas amostras C1e C2, E1 e E2 que indicam uma contribuição positiva também para a resistência final.

6 CONCLUSÃO

Com os objetivos propostos, os dados experimentais obtidos e a discussão dos resultados alcançada, algumas conclusões podem ser formuladas:

- Todos os cimentos estudados cumprem os requisitos de qualidade com descritos na NBR 16697 para um Cimento Portland CPV – ARI, com a exceção da Amostra A para resistência a um dia de cura;
- A amostras A apesar de baixa resistência a 1 dia de cura, enquadrrou-se na norma a partir da resistência a 3 dias, atribui a esse comportamento a associação de baixos teores das fases (C_3S e C_3A), Moagem inadequada e altos teores de C_2S e Aditivos (gipsita e calcário);
- O valor elevado de R.I. na Amostra B sugere que tenha havido contaminação por argilas ou pozolanas durante a moagem;
- Mesmo com Áreas Específicas mais altas, as Amostras C1 e C2 não se destacaram em termos de resistência inicial, porém obteve excelentes resultados de resistência final.
- As Amostras E1 e E2, atingiram os melhores resultados de resistência inicial e final, respectivamente. Atribui a esse comportamento elevados teores das fases (C_3S e C_2S) com ênfase no polimorfo M1 da Alita, baixos teores de aditivos com otimização do percentual de SO_3 , e um processo de moagem que aumenta a Área específica sem reduzir o tamanho médio dos grãos.
- Por fim o autor recomenda novos estudos para os demais tipos de cimentos, com uso de técnicas complementares não abordadas, como por exemplo: Cal Livre, Calor de Hidratação, cujos resultados seriam de opulenta contribuição à comunidade acadêmica.

7 REFERÊNCIAS

ABCP. A versatilidade do cimento brasileiro. Disponível em: <<https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro/>>. Acesso em: 18 out. 2018.

BARBOSA, Antônio Vinícius Holanda et al. Propriedades do Cimento Portland e sua Utilização na Odontologia: Revisão de Literatura. **Pesquisa Brasileira em Odontopediatria e Clínica Integrada**, Universidade Federal da Paraíba (UFPB) - Paraíba, v. 7, n. 1, p.89-94, jan./abr. 2007.

CADORE, William Widmar. STUDY OF CARBONATION OF THE COVERCRETE LAYER OF PROTOTYPES OF CONCRETE WITH HIGH ADDITIONS CONTENTS AND LIME HYDRATED. 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

CAMPBELL, Donald H. **Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker**. 2. ed. Dodgeville, Usa: Portland Cement Association, 1999. 214 p.

CASTRO, Alessandra Lorenzetti de. **Aplicação dos conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 334 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CASTRO, A. L. et al. Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [s.l.], v. 63, n. 365, p.65-76, mar. 2017. FapUNIFESP (SciELO).

CENTURIONE, Sérgio Luiz. Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland. São Paulo, 1993.

CIMENTO.ORG. **Cimento no Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://cimento.org/cimento-no-brasil/>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

COSTA, Eugênio Bastos da et al. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p.75-86, abr./jun. 2013.

CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2005, São Pedro. **Hidratação do cimento CP V ARI-RS: influência da água nas reações de hidratação**. São Pedro, 2005. 12 p.

DALLACORT, Rivanildo et al. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p.511-518, 2002.

FRACALOSSI, Romulo Augusto Rigon. **Aditivos à base de policarboxilatos: influência nos tempos de pega e na manutenção do abatimento em pastas de cimento Portland**. 2011. 70 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Tese de Doutorado**. 2009. 237 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

LEAL, Antônio Farias et al. TIRIRI, THE FIRST CEMENT INDUSTRY IN SOUTH AMERICA. In: ENCONTRO DA SBPMAT, 13., 2015, João Pessoa - Pb. **Anais....** São Paulo: Sbpmat, 2015. p. 75 - 77.

LOQUES, Rafael. **Avaliação do ciclo de vida simplificada do cimento Portland**. 2013. 62 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. et al. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista Alconpat**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.116-128, 30 maio 2014. Revista ALCONPAT.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008. 21 p.

MILANI, Ana P. S.; FREIRE, Wesley J. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE MISTURAS DE SOLO, CIMENTO E CASCA DE ARROZ. **Eng. Agric. Jaboticabal**, Campinas, v. 26, n. 1, p.1-10, jan/abr 2006.

NBR 16697 (2019), Cimento Portland Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR NM 19 (2012), Cimento Portland Análises Químicas. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR 7215 (2019) - Determinação De Resistência À Compressão. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR 14656 (2001) - Análise Química Por Espectrometria De Raios X. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR NM 18 (2012) - Determinação De Perda Ao Fogo. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR NM 15 (2019) - Determinação De Resíduo Insolúvel. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR NM 10 (2012) - Análise Química - Disposições Gerais. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR 11579 (2012) - Determinação Do Índice De Finura Por Meio De Peneira 75 μ M (Nº 200). Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR 12826 (2014) - Determinação Do Índice De Finura Por Meio De Peneirador Aerodinâmico. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR 16372 (2015) - Determinação Da Finura Pelo Método De Permeabilidade Do Ar (Método De Blaine). Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, Brasil.

ORTIZ-OROPEZA, Ramiro Marcelo. **Avaliação microscópica da resposta do tecido subcutâneo de ratos à implantação do Endo-CPM-Sealer e do Clínquer do cimento Portland cinza puro e acrescido com sulfato de cálcio a 2% e 5%.** 2007. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mestrado em Odontologia, Universidade de São Paulo, Bauru, 2007.

PINTO, Jorge Daniel Araújo. **Formulação e caracterização de misturas cimentícias secas para poços de petróleo on shore.** 2015. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2015.

REZENDE, Maria Luiza de Souza et al. José Wallace Barbosa do Nascimento: Gelmires de Araújo Neves. **Ambiente Construído**, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p.135-146, jul. 2012.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** San Diego: Academic Press Limited, 1990.

TENÓRIO, Jorge Alberto Soares et al. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland - Parte I: Alita Pura. **Rem: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 56, n. 2, p.87-90, abr./jun. 2003.

Torres, S. M., Sharp, J. H., Swamy, R. N., Lynsdale, C. J., & Huntley, S. A. (2003). Long term durability of Portland-limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack. *Cement and Concrete Composites*, 25(8), 947–954.

ZAKON, Abraham. **Cálculo de Farinhas para Clínquer de Cimento Portland Comum Usando Microcomputador.** Departamento de Processos Inorgânicos. UFRJ. 1989.

ZAMPIERI, Valdir Aparecido. **Cimento Portland Aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico.** 1993. 251 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.