



FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PÓ DE PEDRA (RIOLITO) EM
SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BETÃO

Salomão Samuel Nharre

Supervisores:

Dr. Henrique Filimone (FE – UEM)

Eng^a. Filda Langa (LEM, IP)

Maputo, Novembro de 2023



FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

ANÁLISE DE INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PÓ DE PEDRA (RIOLITO) EM
SUBSTITUIÇÃO DA AREIA NATURAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BETÃO

Salomão Samuel Nharre

Supervisores:

Dr. Henrique Filimone (FE – UEM)

Eng^a. Filda Langa (LEM, IP)

Maputo, Novembro de 2023

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho com muito amor e carinho á aqueles cuja presença constante dá me forças pra enfrentar qualquer obstáculo e caminhar rumo aos meus sonhos e objectivos pessoais e profissionais, meus pais **Samuel Joaquim Nharre** e **Marcela Lucas Chitof** e meus irmãos **Lídia**, **Samuel** e **Dercia**.*

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, endereço o meu agradecimento à Deus, por cada episódio vivido dentro e fora da academia que contribuiu para a minha formação, pelas pessoas que estiveram ao meu redor e por ter permitido que eu chegasse a este momento.

À minha família, em especial aos meus pais Samuel Joaquim Nharre e Marcela Lucas Chitofó, pelo acompanhamento em cada instante do meu percurso académico e ter acreditado em mim.

Ao Dr. Henrique Filimone por ter aceite me auxiliar e acompanhar neste trabalho, tendo disponibilizado o seu precioso tempo para me ensinar e ajudar com paciência e longanimidade.

À Engenheira Filda Langa por ter me ensinado e acompanhado em todas actividades do estágio profissional, lhe agradeço por sua paciência, disponibilidade e carinho.

À todos colaboradores do LEM, IP, que me receberam e trataram com respeito e carinho.

Enfim, a todos que de maneira directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero: Muito Obrigado.

RESUMO

O presente trabalho abordou a metodologia usada no estudo da composição do betão com a substituição parcial e total da areia natural por pó de pedra.

É notável que as pesquisas, relacionadas com o pó de pedra, para o desenvolvimento do betão, são constantes, pois é um material fundamental para a construção civil. O pó de pedra é um material que surge como uma alternativa sustentável na fabricação de betões.

O pó de pedra é o material rejeitado na britagem de pedreira e seu diâmetro máximo é inferior a 4,8 mm. Com base em curvas granulométrica deste tipo de material, pode-se classificar como sendo uma areia grossa britada. Actualmente, o pó de pedra é usado como matéria-prima para produção de blocos de betão.

Neste trabalho, avaliou-se as propriedades mecânicas do betão com diferentes percentagens de pó de pedra.

Para concretização deste objectivo produziram-se três tipos de betões: um de referência contendo areia natural grossa e brita, betão com adição de areia e pó de pedra, juntamente com a areia grossa natural e a brita, e o terceiro, e betão com a substituição total da areia grossa por areia grossa britada.

PALAVRA CHAVE: Betão, areia britada, resistência mecânica por compressão

ABSTRACT

The present work makes a study of the substitution of the existent natural sand in the concrete for an alternative material: the stone Dust.

It is notable that research related to stone dust for the development of concrete is constant, as it is a fundamental material for civil construction. Stone dust is a material that appears as a sustainable alternative in the manufacture of concrete.

Stone dust is the material rejected in quarry crushing and its maximum diameter is less than 4.8 mm. Based on granulometric curves of this type of material, it can be classified as coarse crushed sand. Currently, stone dust is used as a raw material for the production of concrete blocks.

In this work, the mechanical properties of concrete were evaluated with different percentages of stone dust.

To achieve this objective, three types of concrete were produced: a reference containing coarse natural sand and gravel, concrete with the addition of sand and stone dust, together with coarse natural sand and gravel, and the third, concrete with the total replacement of coarse sand with coarse crushed sand. It is considered that the main objective of this research was fully achieved, as the feasibility of the mechanical resistance of concrete with the total and partial replacement of sand with stone dust was proven.

KEYWORD: Concrete, crushed sand, mechanical strength by compression

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTO	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURA	v
ÍNDICE DE TABELAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
SIGLAS.....	viii
SUMÁRIO.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. JUSTIFICATIVA	1
1.3. OBJECTIVOS.....	2
1.3.1. Geral.....	2
1.3.2. Específicos.....	2
1.4. METODOLOGIA.....	2
1.5. INSTITUIÇÃO DE ESTÁGIO	3
1.5.1. Laboratório de Engenharia de Moçambique, Instituto Público	3
1.5.2. Missão	3
1.5.3. Visão.....	3
1.5.4. Valores.....	3
1.5.5. Estrutura Orgânica	4
1.5.6. Áreas de actuação do estudante	5
1.5.7. Sector de estágio	5

2	MATERIAS DE CONSTRUÇÃO	7
2.1.	Agregados	7
2.1.1.	Classificação	7
2.2.	Cimento	8
2.3.	Água	8
2.4.	Betão	8
2.5.	Pó de pedra	8
2.6.	A utilização do pó de pedra como agregado	9
2.7.	Campanhas experimentais existentes	9
2.7.1.	Campanha de Mansur.	9
2.7.2.	Campanha de Khatib	10
2.7.3.	Campanha de Torgal e Jalali	11
2.8.	Conclusões das campanhas	12
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS INERTES	15
3.1.1.	Análise granulométrica	15
3.1.2.	Ensaio de absorção de água	17
3.1.3.	Ensaio de baridade	20
3.1.4.	Ensaio de desgaste (Los Angeles)	21
3.1.5.	Ensaio de esmagamento	24
3.1.6.	Ensaio para Determinação do grau de humidade e da densidade pelo Método de Picnómetro	26
3.1.7.	Ensaio de determinação de reactividade potencial	27
3.2.	ESTUDO DE COMPOSIÇÃO DO BETÃO	30
3.2.1.	Estimativa de índice de vazios(I_v)	30
3.2.2.	Água de amassadura (A)	31

3.2.3.	Dosagem de cimento (C)	31
3.2.4.	Volume das partículas do cimento (V_c).....	32
3.2.5.	Percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume total dos sólidos.(%C).....	32
3.2.6.	Curva de referência de Faury	33
3.2.7.	Determinação das percentagens dos componentes sólidos e verificação do ajustamento da curva dos inertes a curva de referencia.....	34
3.2.8.	Massa de cada componente sólido.....	34
3.3.	ENSAIO DE BETÃO EM ESTADO FRESCO	35
3.3.1.	Ensaio de abaixamento	35
3.4.	ENSAIO DE BETÃO EM ESTADO ENDURECIDO.....	36
3.4.1.	Ensaio de resistência à compressão	36
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DA FASE EXPERIMENTAL	38
4.1.	INTRODUÇÃO	38
4.2.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	39
4.2.1.	Ensaio de granulometria	39
4.2.2.	Massa Específica e Absorção da Água	43
4.2.3.	Baridade	44
4.2.4.	Ensaio de desgaste	46
4.2.5.	Ensaio de esmagamento	46
4.2.6.	Ensaio de determinação de densidade pelo método de picnómetro.....	47
4.2.7.	Ensaio de determinação de reactividade potencial.....	48
4.3.	ENSAIO DE BETÃO EM ESTADO FRESCO	49
4.3.1.	Ensaio de Abaixamento (cone de Abrams).....	49
4.4.	ENSAIO DE BETÃO EM ESTADO ENDURECIDO.....	50
4.4.1.	Ensaio de resistência à compressão	50

5. CONCLUSÕES E RECOMENDACOES	54
5.1. Conclusões.....	54
5.2. Recomendações.....	55
6. BIBLIOGRAFIA	56
ANEXO	58

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Logótipo da instituição LEM, IP.	3
Figura 2. Organograma do LEM, IP.....	4
Figura 3. Fluxograma da metodologia empregada no estudo.	13
Figura 4. Equipamentos usados no ensaio de granulometria.....	16
Figura 5. Materiais e equipamentos usados no ensaio de absorção de água.	18
Figura 6. Materiais e equipamento usados no ensaio de baridade.	20
Figura 7. Materiais e equipamentos usados no ensaio de desgaste.	22
Figura 8. Materiais e equipamentos usados no ensaio de esmagamento.....	24
Figura 9. Materiais e equipamentos usados no ensaio.	26
Figura 10. Equipamento e execução do ensaio.....	35
Figura 11. Prensa Hidráulica e Balanço.	37
Figura 12 .Curva granulométrica da areia.	40
Figura 13. Curva granulométrica de pó de pedra.	41
Figura 14. Curva granulométrica da brita.	42
Figura 15. Resultados do ensaio de compressão simples aos 7 dias de idade.....	51
Figura 16. Resultados do ensaio de compressão simples aos 28 dias de idade.....	53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de granulometria	22
Tabela 2. Carga abrasiva.	23
Tabela 3. Pontos da curva de referência de Faury	33
Tabela 4. Percentagem inicial	34
Tabela 5. Composição final	34
Tabela 6. Análise granulométrica da areia grossa.....	39
Tabela 7. Análise granulométrica de pó de pedra.	41
Tabela 8. Análise granulométrica da brita.	42
Tabela 9. Resultados obtidos no ensaio.....	43
Tabela 10. Resultado obtido da absorção de água da brita.	43
Tabela 11. Os resultados obtidos através do ensaio de massa específica da brita.	44
Tabela 12. Resultados encontrados através do ensaio de baridade da areia.	44
Tabela 13. Resultados encontrados através do ensaio de baridade de pó de pedra.	45
Tabela 14. Resultados encontrados através do ensaio de baridade de brita.	45
Tabela 15. Resultados encontrados através do ensaio de desgaste da brita.	46
Tabela 16. Resultados encontrados através do ensaio de esmagamento da brita.	46
Tabela 17. Resultados encontrados através do ensaio pelo método de picnómetro da areia.	47
Tabela 18. Resultados encontrados através do ensaio pelo método de picnómetro do pó de pedra.	48
Tabela 19. Resultados encontrados através do ensaio de determinação de reactividade potencial	48
Tabela 20. Resultados encontrados através do ensaio de abaixamento.	49
Tabela 21. Resultados dos ensaios de compressão simples aos 7 dias.....	50
Tabela 22. Resultados dos ensaios de compressão simples aos 28 dias.....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

F	Força; Carga de rotura
N	Newton; Esforço axial
MPa	Megapascal; Tensão de rotura
Kg/m ³	Quilograma por metro cubico
H ₂ O	Água
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
g/cm ³	Gramas por metro cubico
f_c	Valor de tensão de rotura do betão à compressão
h	Horas
g	Gramas
Kg	Quilogramas
N/mm ²	Newton por milímetro quadrado
g/cm ³	Gramas por centímetro cubico
µm	Micrómetro
l	Litros
Ø	Diâmetro
D _{max}	Diâmetro máximo do inerte
E.Br	Ensaio em branco (Testemunha)
di	Diâmetro mínimo do inerte

SIGLAS

LEM, IP	Laboratório de Engenharia de Moçambique, Instituto Público
ISO	Organização Internacional de Normalização.
NP	Norma Portuguesa.
ENV	Projecto de norma europeia.
LNEC	Laboratório nacional de Engenharia Civil.
LNEC E-...	Especificação do Laboratório nacional de Engenharia Civil
RBLH	Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos.
DEO	Departamento de Estruturas e Obras.
DGVC	Departamento de Geotecnia e Vias de Comunicação.
DHQA	Departamento de Hidráulica, Química e Ambiente
DMC	Departamento de Materiais de Construção
ASTM	American Society for Testing and Materials
B25, B30, ...	Designação da classe de betão

SUMÁRIO

O presente trabalho é constituído por 6 capítulos.

Primeiro capítulo – “INTRODUÇÃO”, contextualiza o assunto de estudo de forma simples e genérica. Justificando a escolha do tema e sua relevância e importância na área do conhecimento e prevenção ambiental à favor da sociedade. Neste bloco, também serão descritos os objectivos gerais e específicos, a delimitação e a metodologia da pesquisa, a descrição da empresa onde se efectuou o estágio, nomeadamente o perfil, a missão, a visão, os valores, o organigrama, as áreas de intervenção da empresa e o sector de estágio

Segundo capítulo – “REVISÃO BIBLIOGRÁFICA”, nesse bloco foi realizado uma pesquisa com ênfase no betão.

Terceiro capítulo – “MATERIAIS E MÉTODOS”, abrange o programa experimental que orientou o desenvolvimento da pesquisa. Nesta etapa foram apresentadas a caracterização dos materiais, os ensaios efectuados e os métodos aplicados na realização do estudo.

Quarto capítulo – “APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA FASE EXPERIMENTAL”, são expostos os resultados extraídos durante os ensaios laboratoriais, que foram analisados e discutidos.

Quinto capítulo – “CONSIDERAÇÕES FINAIS”, são apresentadas todas as considerações e conclusões finais e recomendações que se embasam nos resultados derivados do capítulo anterior.

1 INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

Actualmente, o meio ambiente vem sofrendo vários danos causados pela exploração do homem. O betão, por ser um produto consumido em grande escala e que necessita de matéria-prima encontrada directamente na natureza, contribui em grande parte com esses danos (destruição de habitats, degradação de leito dos rios, etc).

As estruturas de betão são confeccionadas com areia natural. Entretanto, a consciencialização de prevenção ambiental tem incentivado e impulsionado estudos a busca de alternativas que substituam a areia natural, por materiais denominados rejeito como pó de pedra.

O pó de pedra é considerado um rejeito de pedreiras, que fica amontoado nos pátios das mesmas, formando enormes volumes, causando, deste modo, vários danos ambientais.

Portanto, na província de Maputo verifica-se a presença de Riolito em abundancia, esse estudo visa testar e validar essa substituição na tentativa de diminuir o dano ambiental.

Com a utilização do pó de pedra, podem ser mencionadas as seguintes vantagens que beneficiarão, não só as próprias pedreiras e fábricas de betão, como também o próprio consumidor:

- Aproveitamento integral das pedreiras sem descarte de efluentes; e
- Solução de problemas ambientais (destruição de habitats, degradação de leito dos rios, incremento de materiais em suspensão e aumento da erosão nas margens dos rios).

1.2. DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Neste trabalho, foi utilizado apenas um traço de betão previamente definido e avaliado. Os teores de substituição parcial e integral da areia por pó de pedra também foram pré-definidos em 0%, 50%, 75% e 100% .

1.3. OBJECTIVOS

1.3.1. Geral

- Analisar a influência de substituição parcial e total da areia natural por pó de pedra nas propriedades mecânicas do betão.

1.3.2. Específicos

- Realizar ensaios de caracterização dos materiais envolvidos;
- Realizar estudo de composição de betão;
- Avaliar consistência do betão pelo ensaio de abaixamento pelo cone de Abrams; e
- Avaliar a resistência à compressão simples do betão aos 7 e 28 dias de idade.

1.4. METODOLOGIA

Com vista a alcançar os objectivos traçados, foi adoptada a seguinte metodologia:

- Pesquisa bibliográfica – foram analisados livros que debruçam sobre caracterização dos materiais de construção e processo de fabricação de betão;
- Consulta dos documentos normativos;
- Colheita de matéria-prima para a produção de betão;
- Realização dos ensaios laboratoriais no Laboratório de Engenharia de Moçambique – LEM,IP;
- Análise de dados obtidos nos ensaios recorrendo ao *Microsoft Excel*;
- Estudo da composição do betão pelo método de Faury;
- Consultas ao supervisor e técnicos do LEM, IP; e
- Produção do betão com diferentes teores de adição de pó de pedra e realização de ensaios de compressão aos 7 e 28 dias.

1.5. INSTITUIÇÃO DE ESTÁGIO

1.5.1. Laboratório de Engenharia de Moçambique, Instituto Público

O Laboratório de Engenharia de Moçambique, IP, abreviadamente designado por LEM, IP, é um instituto público de fiscalização e normalização da qualidade de obras públicas e privadas, dotado de personalidade jurídica e autonomia administrativa e financeira.

A Figura 1 apresenta-se o logótipo de LEM, IP.



Figura 1. Logótipo da instituição LEM, IP.

1.5.2. Missão

O LEM, IP enquanto instituição pública e laboratório do Estado tem como missão garantir a investigação, homologação e controlo de qualidade no domínio da engenharia civil e de materiais de construção e materiais locais, especialmente em relação as obras públicas, e garantir a investigação e/ou coordenar estudos experimentais no campo da engenharia civil e dos materiais de construção.

1.5.3. Visão

Tornar-se num laboratório de excelência na área do controlo de qualidade de materiais de construção e de obras públicas e privadas, por forma a contribuir na execução de infra-estruturas com elevada qualidade.

1.5.4. Valores

- Profissionalismo
- Disciplina
- Responsabilidade;

- Segurança;
- Integridade
- Rigor científico
- Competência.

1.5.5. Estrutura Orgânica

Conforme o organograma da Figura 2, O LEM, IP é dirigido por um Director-Geral e coadjuvado por um Director-Geral Adjunto. A área técnica compreende dois serviços centrais e um departamento central autónomo, enquanto que na área administrativa comporta os departamentos autónomos de recursos humanos e de administração e finanças, a repartição de aquisições e gabinete jurídico.

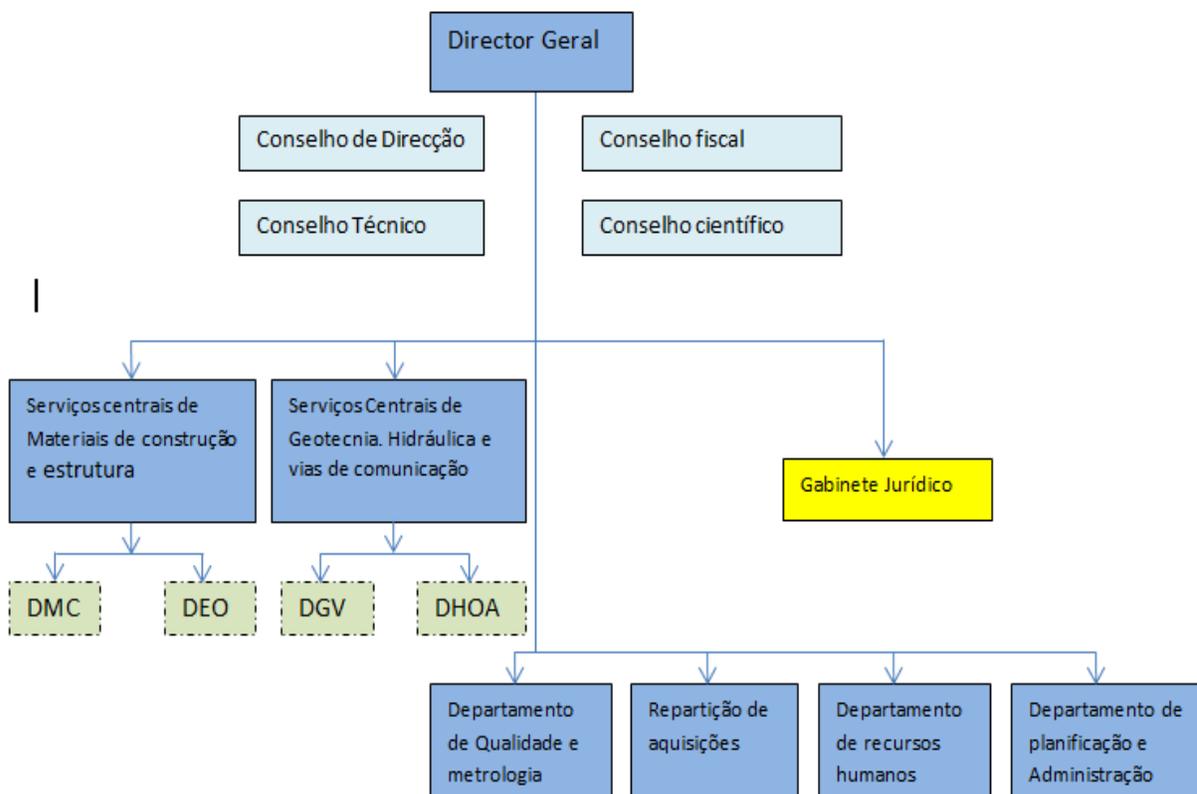


Figura 2. Organograma do LEM, IP.

1.5.6. Áreas de actuação do estudante

O LEM, IP, tem por atribuições:

- a) Promoção da investigação, homologação e controlo de qualidade no domínio da engenharia civil e de materiais de construção, sobretudo das obras públicas;
- b) Promoção e coordenação da investigação científica, controlo de qualidade de obras e do desenvolvimento tecnológico, tendo em vista o contínuo aperfeiçoamento e a boa prática da Engenharia Civil;
- c) Prestação de serviços de Ciência e Tecnologia a entidades públicas e privadas, nacionais e estrangeiras, contribuindo para a inovação, a disseminação do saber e a transferência tecnológica;
- d) Promoção e coordenação de estudos experimentais no campo de engenharia civil e dos materiais de construção;
- e) Homologação dos resultados da investigação na área de controlo de qualidade de obras;
- f) Colaboração com estabelecimentos de ensino na preparação do pessoal técnico dos vários graus de especialização e revisão dos currícula respectivos; e
- g) Exercício da sua acção de criação, desenvolvimento e difusão da investigação e controlo de qualidade no âmbito da Engenharia Civil, nomeadamente Engenharia Civil/Obras Públicas; Edifícios; Habitação e Urbanismo e Tecnologia da Construção; Ambiente; Hidráulica e Recursos Hídricos; Transportes, Infra-estruturas e Vias de Comunicação; Geotecnia e Obras Subterrâneas; Metrologia; Indústria dos Materiais; Componentes e outros materiais e produtos para construção.

1.5.7. Sector de estágio

O estágio profissional foi levado a cabo no Departamento de Materiais de Construção (**DMC**) que tem as seguintes funções:

- a) Proceder a investigação e estudos relativos aos materiais e processos de construção;
- b) Controlar a qualidade de materiais de construção a aplicar em obras tais como edifícios, pontes, barragens de betão, pontes de transmissão de energia eléctrica,

pavimentos de vias rodoviárias, ferroviárias, aeroportuárias e todos os materiais usados na construção de estruturas de engenharia civil;

- c) Proceder a investigação, estudo e ensaios relativos aos materiais de construção tradicionais e não tradicionais que envolvam novas tecnologias;
- d) Proceder ao controlo sistemático da qualidade de materiais de construção nacional e importados e garantir a sua certificação;
- e) Emitir pareceres sobre licenciamento de laboratórios comerciais e na certificação dos materiais de construção;
- f) Participar em actividades de normalização e qualidade de materiais e processos de construção e respectiva regulamentação;
- g) Pesquisar, desenvolver e disseminar técnicas para a determinação e julgamento das propriedades mecânicas e físicas das matérias-primas usadas no fabrico de betão, produtos cerâmicos, plásticos, madeiras e vidro e propor recomendações sobre as condições do seu uso;
- h) Estudar, desenvolver e disseminar técnicas para a determinação e julgamento das propriedades mecânicas e físicas dos materiais usados na construção civil (metálicos, cerâmicos, plásticos, vidro e madeiras); e
- i) Desenvolver e implementar critérios de avaliação e certificação da qualidade dos materiais usados na construção civil (cimento, argamassas e betões, produtos cerâmicos, plásticos, vidro e madeiras).

O estágio profissional consistiu na realização de actividades enquadradas nas funções das alíneas b), c) e d).

2 MATERIAS DE CONSTRUÇÃO

2.1. Agregados

Os Agregados para betões são materiais granulados, constituídos por partículas de rochas, naturais ou artificiais, com dimensões que variam geralmente entre cerca de 20 cm e 0,10 mm. Dispersos pela pasta de cimento, constituem no betão o seu “esqueleto” perfazendo 70 a 80% do seu volume.

2.1.1. Classificação

Os agregados podem ser agrupados de diferentes maneiras conforme o ponto de vista considerado:

a) **Petrográfico** – de acordo com a rocha de origem:

- Ígneos;
- Sedimentares;
- Metamórficos.

b) **Obtenção:**

- Rolados (naturais ou provenientes da erosão, sedimentação e depósitos das rochas originárias);
- Britados (artificiais ou por fracturas de rochas).

c) **Dimensões:**

- Inerte Grosso ou Pedra ($\varnothing \geq 4.76$ mm), pode ser rolado (godo e seixo ou calhau) ou britado (Brita);
- Inerte Fino ou Areia ($\varnothing < 4.76$ mm), também rolado (caso comum) ou britado (pó de pedra).

d) **Massa Volúmica:**

➤ Inerte Leve ($M_v < 2.3$ g/cm ³);	➤ Inerte Pesado ($M_v > 3.0$ g/cm ³).
➤ Inerte Normal (2.3 g/cm ³ $\leq M_v \leq 3.0$ g/cm ³);	

e) **Baridade (δ)**

➤ Ultraleve ($\delta < 300$ Kg/m ³);	➤ Denso (1200 a 1600 Kg/m ³);
---------------------------------------------------	-------------------------------------------

➤ Leve (300 a 1200 Kg/m ³);	➤ Extradenso ($\delta > 1700$ Kg/m ³).
-----------------------------------------	-----------------------------------------------------

2.2. Cimento

O cimento é definido como ligante hidráulico por reagir na presença da água. Este processo denominado hidratação (inicial) confere rigidez à mistura. Também é o principal aglomerante da mistura e sua composição é derivada de uma junção de silicatos e aluminatos de cálcio (METHA & MONTEIRO, 2008)

2.3. Água

A porção de H₂O está directamente ligada a vários factores como: o tipo de cimento, percentagem de finos, o uso de aditivos ou adições e os agregados. A contingente da água é dividida em quatro partes: hidratação do cimento, uma para preencher a porosidade, outra a absorção e a quarta parte fica responsável pela adsorção dos agregados, tudo isso para assegurar a fluidez (GOMES, 2005).

2.4. Betão

O material de construção mais utilizado no mundo é o betão, comumente composto da mistura de cimento Portland com areia, brita e água. Em muitos países, a proporção de consumo de betão sobre o consumo de aço é de dez para um. Com excepção apenas da água, não há material mais consumido pelo homem em tamanha quantidade (METHA & MONTEIRO, 2008).

2.5. Pó de pedra

O Pó de pedra é um resíduo procedente da exploração de jazidas, que apresenta de 15 a 20% da produção de britagem, consequentemente das rochas (ANDRIOLO, 2005). De acordo com MENOSSI (2004), o pó de pedra já vem sendo utilizado desde o século passado nos países como Canadá e Estados Unidos.

Conforme ANDRIOLO (2005), o pó de pedra é considerado um rejeito de pedreiras, estocado ao ar livre em pátios das mesmas que gera a alteração da paisagem com o

impacto ambiental: poluição atmosférica, assoreamento de rios e contaminação com o material lixiviado nas áreas de drenagem.

2.6. A utilização do pó de pedra como agregado

O pó de pedra é utilizado de várias maneiras no ramo da construção civil: pavimentação, usinas de asfalto, calçamentos com base asfálticas e de concreto, fabricação de pré-moldados, estabilizante de solos, confecções de argamassa para assentamento e emboço, paralelepípedos de concreto, entre outros (COSTA, 2019).

2.7. Campanhas experimentais existentes

2.7.1. Campanha de Mansur.

Produziu-se betão com a incorporação de tijolo britado como agregado grosso, cuja resistência à compressão resultou em valores entre 30 e 60 MPa, e compararam as suas propriedades com as do betão convencional. (MANSUR, 1999)

Realizou-se vários ensaios durante todo este processo, que encontram se enumerados a seguir.

Agregados:

➤ Análise granulométrica;	➤ Absorção de água; e
➤ Massa volúmica;	➤ Desgaste de Los Angeles.

Betão fresco:

- Trabalhabilidade.

Betão endurecido:

➤ Resistência à compressão;	➤ Módulo de elasticidade dinâmico; e
➤ Retracção e expansão;	➤ Resistência à tracção por

➤ Fluência.	compressão diametral;
-------------	-----------------------

Os agregados grossos reciclados foram obtidos através de resíduos de tijolo de barro vermelho cozido, (densidade média de 2100 kg/m³) com auxílio de uma britadeira de mandíbulas e separação de vários tamanhos.

Os autores criaram quatro tipos de betões de referência, de forma a variarem as resistências entre 30 e 60 MPa. De forma a aplicarem o estudo que queriam, foram modificando as quantidades dos agregados nos novos betões de forma a obter resistências na mesma categoria dos de betão de referência, mantendo-se apenas um elemento constante, a água. A relação água / cimento (a/c) aparente, foi mantida para cada tipo de mistura.

2.7.2. Campanha de Khatib

Na campanha de KHATIB (2004), foi realizado um estudo relativo às propriedades de betões que sofreram incorporação de agregados finos reciclados (betão).

Os betões produzidos com estes agregados reciclados passaram por alguns ensaios laboratoriais, descritos a seguir.

Agregados:

- Análise granulométrica;
- Massa volúmica; e
- Absorção de água.

Betão fresco:

- Trabalhabilidade; e
- Massa volúmica.

Betão endurecido:

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Resistência à compressão; ➤ Velocidade de propagação de ultrasons; 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Módulo de elasticidade dinâmico; ➤ Massa volúmica e; ➤ Retracção e expansão.
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Foram realizadas diferentes misturas de forma a comparar a influência dos agregados reciclados nas propriedades do betão.

Nas várias misturas houve alteração dos agregados finos naturais em 25, 50, 75 e 100% por agregados finos reciclados de tijolo.

2.7.3. Campanha de Torgal e Jalali

Estes autores, TORGAL e JALALI (2009), para além do estudo da substituição de agregados naturais por agregados reciclados cerâmicos tanto na fracção fina como na grossa na produção de betão, realizaram também um estudo da substituição do cimento por agregados de cerâmica fina.

Agregados:

- Análise granulométrica;
- Massa volúmica;
- Absorção de água;

Betão fresco:

- Trabalhabilidade; e
- Massa volúmica.

Betão endurecido:

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Resistência à compressão; ➤ Absorção de água por imersão; ➤ Absorção de água por capilaridade; 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Permeabilidade ao oxigénio; ➤ Resistência à penetração de cloretos; ➤ Permeabilidade à água; e ➤ Envelhecimento acelerado.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.8. Conclusões das campanhas

A presença destas campanhas, serve para demonstrar a vontade de tentar reutilizar este resíduo que é tão comum na construção, principalmente na incorporação no betão.

Cada um com a sua ideologia na preferência, da percentagem de substituição, do tipo de agregado (grosso ou fino), o rácio de água/cimento e até mesmo os valores de resistência pretendidos. Estas campanhas mostram como esta tese continua com uma vertente actual, e que é possível a utilização destes resíduos na composição de betões estruturais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia executada no trabalho encontra-se sintetizada na Figura 3.

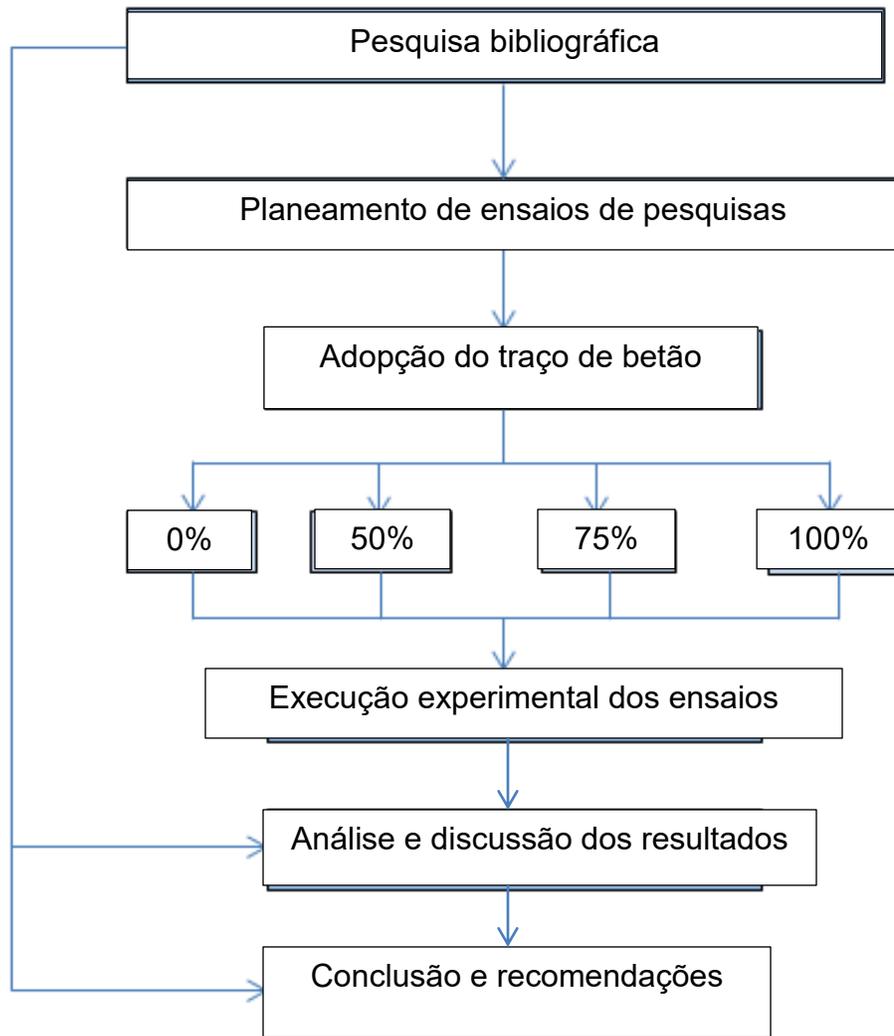


Figura 3. Fluxograma da metodologia empregada no estudo.

Este estudo experimental tem como objectivo a comparação da resistência mecânica entre um betão de referência contendo brita, areia e cimento, elaborado através de estudo de composição mostrado na secção 3.2 e betões que contêm na sua composição diferentes percentagem de Pó de pedra como indica a Figura 3, inerte este de origem de processo de britagem da rocha (Riolito).

A intenção passa por tentar perceber até que ponto estes novos elementos alteram o comportamento mecânico de betões estruturais, se numa vertente positiva ou negativa.

A planificação dos ensaios foi constituída por quatro fases.

a) Primeira fase

A primeira fase teve como objectivo a analisar e caracterizar os agregados naturais e dos resíduos cerâmicos vermelhos. Pretendeu-se com esta fase avaliar algumas características dos agregados que se iriam utilizar, para assim se obter uma fórmula mais estruturada da composição do betão de acordo com o método de Faury.

Nesta fase experimental realizaram-se aos seguintes ensaios:

Agregado fino (areia e pó de pedra)

- Análise granulométrica, de acordo com a norma NP 1379 (1978);
- Ensaio de baridade, de acordo com a norma NP 955 (1993); e
- Ensaio para determinação do grau de humidade e da densidade pelo Método de Picnómetro de acordo com a norma NP 83 (1965).

Agregado grosso (Brita)

- Análise granulométrica, de acordo com a norma NP 1379 (1978);
- Ensaio de baridade, de acordo com a norma NP 955 (1993);
- Ensaio para determinação de massas volúmicas e de absorção de água, de acordo com a norma NP 954 (1969);
- Ensaio de determinação de resistência ao esmagamento, de acordo com a norma NP 1039 (1974);
- Ensaio de Desgaste com a Máquina de Lós Angeles, de acordo com a especificação LNEC E237 (1970); e
- Ensaio para determinação de reactividade potencial, de acordo com a norma ASTM C 289 (1971).

b) Segunda fase

Esta fase teve como ênfase o estudo de composição do betão pelo método das curvas de referência de Faury. E cumprir com o estabelecido no Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos, (RBLH, 1989).

Onde determina-se as percentagens de cada elemento que vai compor o betão fresco. Areia, Brita, cimento e água.

c) Terceira fase

Nesta fase fez-se a produção do betão e realizou-se um tipo de ensaio, como o objectivo avaliar a consistência do betão.

Betão em estado fresco:

- Ensaio de abaixamento (Cone de Abrams), de acordo com a norma NP 87 (1984).

d) Quarta fase

Na última fase, os ensaios servem para perceber o comportamento mecânico do betão no estado endurecido.

Betão em estado endurecido:

- Ensaio de resistência à compressão dos provetes, de acordo com NP EN 12390-3 (2009).

3.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS INERTES

3.1.1. Análise granulométrica

Pretende-se com este ensaio fazer uma análise da distribuição das partículas ao longo dos peneiros de modo a poder classificar cada inerte. A forma de demonstrar os resultados é a partir de curvas granulométrica, essenciais para determinar as quantidades recomendadas de cada inerte a adicionar na produção do betão, de forma a maximizar a sua compacidade.

a) Objectivos

Determinar a percentagem retida em peso em cada peneiro dependendo do tamanho das partículas.

- Construir a curva granulométrica;
- Classificação dos agregados; e
- Definir a finalidade do agregado.

b) Matérias e equipamentos usados no ensaio

<ul style="list-style-type: none">➤ Amostra.➤ Esquartelador;➤ Pás;➤ Balança para pesagens com limites de erro de $\pm 0.1\%$;	<ul style="list-style-type: none">➤ Bandeja;➤ Escovas; e➤ Peneiros de rede de malha quadrada com seguintes aberturas nominais, 4.75mm, 2.36mm, 1.18mm, 600μm, 300μm, 150μm, e 75μm.
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Os materiais e equipamentos usados no ensaio estão ilustrados na **Figura 4**



Figura 4. Equipamentos usados no ensaio de granulometria.

c) Procedimento para realização do ensaio (ver ANEXO 3, Figura A3-2).

- Esquartela-se o material (somente brita). Recolhe-se o material que foi secado naturalmente ao ar livre e conservado, de seguida pesa-se a quantidade do mesmo

de acordo com o que é estabelecido na norma NP 1379 na balança que inicialmente foi tarada, após pesar a quantidade, verifica-se e coloca-se os peneiros de forma correcta (do crivo com maior abertura até o crivo com menor abertura na sua malha) e de seguida coloca-se o material dentro dos peneiros. Agita-se os peneiros manualmente, onde verifica-se que algum material é retido no segundo crivo e outro passa, e deste que passa algum é retido e o outro passa no crivo a seguir, e assim sucessivamente até que o pó passe por todos crivos e fique retido no último crivo com nenhuma abertura. Pesa-se cada fracção do material retido em cada crivo e regista-se.

d) Resultados

Registou-se a massa retida em cada peneiro e calculou-se como percentagem da massa da amostra inicial através da seguinte equação:

$$R_{i\%} = 100 \times \frac{R_i}{M} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

$R_{i\%}$ - é a percentagem de material retido no peneiro i (%);

R_i - é a massa retido no peneiro i (g);

M - é a massa total da amostra seca (g).

3.1.2. Ensaio de absorção de água

a) Objectivo

Avaliar a variação da sua massa (p1-p3) em função da sua massa sólida (p3).

b) Materiais e equipamentos usados no ensaio

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Balança; ➤ Estufa para secagem entre 105 °C e 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cesto cilíndrico de rede metálica, malha quadrada, de 4,76 mm de abertura, e cerca de 20 cm de diâmetro e 20 cm de altura;
------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>110 °C;</p> <p>➤ Tanque apropriado para imersão do cesto;</p>	<p>➤ Amostra (cerca de 5 kg de partículas do inerte que não passem através da rede do cesto).</p>
------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------

Os materiais e equipamentos usados no ensaio estão ilustrados na **Figura 5**.



Figura 5. Materiais e equipamentos usados no ensaio de absorção de água.

c) Procedimento para realização do ensaio (ver ANEXO 3, Figura A3-5).

- Deixa-se mergulhado o cesto contendo o inerte por 24 h, em água, anota-se a temperatura da água, anota-se o peso de cesto no ar e imerso na água sem nenhum material. Retira-se o provete e limpa-se a superfície das partículas com panos, mas evitando a perda da água absorvida, coloca-se a amostra no cesto e pesa-se. Em seguida, mergulha-se na água e pesa-se novamente. Seca-se o provete na estufa, entre 1105 °C e 110 °C, por 24 h.

d) Resultados

Sendo:

m_1 a massa do provete com partículas saturadas (massa do provete saturado e do cesto, deduzida da massa deste no ar);

m_2 a massa imersa (massa do provete e do cesto imersos em água, deduzida da massa deste também imerso em água);

m_3 a massa do provete seco (massa do provete seco e do cesto, deduzida da massa deste no ar); e

ρ a massa volúmica da água a temperatura a que se realizou o ensaio, expressa em quilogramas por metro cubico.

A massa volúmica do material impermeável das partículas:

$$\frac{m_3}{m_3 - m_2} \times 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

A massa volúmica das partículas saturadas:

$$\frac{m_1}{m_1 - m_2} \times 100 \quad \text{Equação 3.3}$$

A massa volúmica das partículas secas:

$$\frac{m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad \text{Equação 3.4}$$

Absorção de água:

$$\frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100 \quad \text{Equação 3.5}$$

3.1.3. Ensaio de baridade

a) Objectivo

Classificar os agregados de acordo com o descrito na secção 2.1.1, para o cálculo da composição do betão.

b) Matérias e equipamentos usados no ensaio

<ul style="list-style-type: none">➤ Varão de compactação;➤ Molde;➤ Pá;	<ul style="list-style-type: none">➤ Amostra (Areia ou Brita); e➤ Balança.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------

Os materiais e equipamentos usados no ensaio estão ilustrados na **Figura 6**



Figura 6. Materiais e equipamento usados no ensaio de baridade.

c) Procedimento para realização do ensaio (ver ANEXO 3, Figura A3-3)

- Verificou-se o peso do molde, pesando-o na balança e regista-se, enche-se o molde com o agregado (Areia ou Brita) em três camadas (equivalentes 1/3 do volume total do molde), onde são aplicadas 25 pancadas em cada camada. Pesa-se o molde contendo o agregado e regista-se e executa-se esse procedimento para três determinações.

d) Resultado

Sendo:

m_1 a massa do recipiente, em quilogramas;

m_2 a massa do recipiente cheio de inerte, em quilogramas; e

V a capacidade do recipiente, em decímetros cúbicos.

A baridade do inerte seco, em quilogramas por metro cúbicos é:

$$\frac{m_2 - m_1}{V} \times 100$$

Equação 3.6

3.1.4. Ensaio de desgaste (Los Angeles)

a) Objectivo

Este ensaio mede o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva

b) Material e equipamentos usados:

<ul style="list-style-type: none">➤ Amostra (Brita);➤ Esferas;➤ Estufa;➤ Peneiros usados para análise granulométrica;➤ Peneiro de 1,7 mm;	<ul style="list-style-type: none">➤ Pá;➤ Balança;➤ Bandejas; e➤ Máquina de “Los Angeles” e a respectiva chave.
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Os materiais e equipamentos usados no ensaio estão ilustrados na **Figura 7**



Figura 7. Materiais e equipamentos usados no ensaio de desgaste.

c) Preparação da amostra

- i. A amostra seleccionada para o ensaio, dentre as graduações A, B, C, D, E, F e G, deve ter a massa indicada na Tabela 1. A representatividade deste ensaio será intimamente ligada à granulometria do material ensaiado, portanto a graduação escolhida deverá ser aquela de granulometria mais próxima possível da que deverá ser usada na obra. O ensaio poderá, entretanto, ser executado em outra graduação, a critério dos interessados.

Tabela 1. Tipos de granulometria

Peneiras Abertura em mm		Amostra - massa parcial em gramas						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
63	50	—	—	—	—	2500 ± 50	—	—
50	38	—	—	—	—	5000 ± 50	5000 ± 50	—
38	25	1250 ± 25	—	—	—	—	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	—	—	—	—	—	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	—	—	—	—	—
9,5	6,3	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
6,3	4,8	—	—	2500 ± 10	—	—	—	—
4,8	2,4	—	—	—	5000 ± 10	—	—	—
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

- ii. Adoptada a graduação para o ensaio, determina-se as massas das porções de graduação escolhida, obedecendo as respectivas tolerâncias, misturam-se bem e somam-se as massas parciais, obtendo-se assim uma massa seca antes do ensaio (m_n).
- iii. A carga abrasiva, a ser usada para cada graduação, é ilustrada na Tabela 2.

Tabela 2. Carga abrasiva.

Graduação	Número de esferas	Massa de carga (g)
A	12	5.000 ± 25
B	11	4.584 ± 25
C	8	3.330 ± 20
D	6	2.500 ± 15
E	12	5.000 ± 25
F	12	5.000 ± 25
G	12	5.000 ± 25

d) Procedimento para realização do ensaio (ver ANEXO 3, Figura A3-4)

- Verificada a limpeza interna do tambor, colocam-se no mesmo a amostra e a respectiva carga abrasiva; a seguir é cuidadosamente fechado para evitar perda de material. Faz-se girar o tambor com velocidade de 30 a 33 rpm até completar 500 rotações, para as graduações A, B, C e D e 1000 rotações para as graduações E, F e G, conforme Tabela acima;
- Retira-se todo o material do tambor, separam-se as esferas, limpam-se as mesmas com a escova, e faz-se passar a amostra na peneira 1,7 mm, rejeitando-se o material passante, lava-se o material retido na própria peneira (1,7 mm); reúne-se o mesmo, e em seguida é seco em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C, durante, 24 horas e retira-se o material da estufa, deixa-se esfriar, e determina-se sua massa com aproximação de 1 g, obtendo-se a massa da amostra lavada e seca (m'_n).

e) Resultados

A_n = abrasão “Los Angeles” da graduação n , com aproximação de 1%;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina; e

m'_n = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm).

Formula:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad \text{Equação 3.7}$$

3.1.5. Ensaio de esmagamento

a) Objectivo

Comprimir a amostra de agregado, com auxílio de uma prensa, até que este perca a sua resistência e esmague-se, com a finalidade de saber qual a sua resistência máxima ao esmagamento.

b) Materiais e equipamentos usados no ensaio

<ul style="list-style-type: none">➤ Amostra;➤ Crivos (12,5 mm, 9,5 mm e 2,4 mm);➤ Prensa Hidráulica;➤ Cilindro Metálico;	<ul style="list-style-type: none">➤ Esmagador;➤ Varão de compactação;➤ Bandejas; e➤ Balança.
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Os materiais e equipamentos usados no ensaio estão ilustrados na **Figura 8**



Figura 8. Materiais e equipamentos usados no ensaio de esmagamento.

c) **Procedimento para realização do ensaio** (ver ANEXO 3, Figura A3-6).

- É tomada uma quantidade de amostra após a passagem da mesma pela peneira com abertura de malha de 12,5 mm que contenha cerca de 10 kg retirados na peneira de malha de 9,5 mm (3/8). A amostra é seca em estufa a (105 +/-5) °C por 24 h, sendo necessário o seu resfriamento. O recipiente cilíndrico é preenchido em três camadas sucessivas, aplicando-se com a haste, 25 golpes em cada camada distribuídos por toda a superfície. A massa inicial do agregado preparado é determinada como aproximação de 1 g. O cilindro de ensaio é preenchido com esse material, em três camadas sucessivas de mesma espessura, aplicando-se 25 golpes com a haste a cada uma delas. O êmbolo é inserido no cilindro de ensaio e nivelado com seu auxílio a superfície do agregado;
- O conjunto é colocado no prato inferior da máquina de ensaio, centralizando-o cuidadosamente.
- Uma carga de 400 kN é aplicada uniformemente à razão de (40 +/-5)kN/min;
- Após aplicar-se a carga total, o conjunto é retirado da máquina e todo o material contido no cilindro de ensaio é removido para uma bandeja limpa. Se houverem partículas aderidas, utilizar um martelo, aplicando leves pancadas laterais para sua remoção. O material removido é passado na peneira de malha de 2,36 mm e determinada a massa do material retido; e
- Faz-se uma segunda determinação, com os mesmos procedimentos descritos acima.

d) **Resultados**

m_1 a massa do recipiente;

m_2 a massa do recipiente cheio com o provete; e

m_3 a massa do material que passou no peneiro de 2,36 mm de abertura.

$$\frac{m_3}{m_1 - m_2} \times 100$$

Equação 3.8

3.1.6. Ensaio para Determinação do grau de humidade e da densidade pelo Método de Picnómetro

a) Objectivo

Determinar a densidade real do solo, neste caso areia natural, e pó de pedra.

b) Materiais e equipamentos usados no ensaio

➤ Picnómetro;	➤ Balança; e
➤ Água;	➤ Amostra.

Os materiais e equipamentos usados no ensaio estão ilustrados na **Figura 9**



Figura 9. Materiais e equipamentos usados no ensaio.

c) Procedimento para realização do ensaio (ver ANEXO 3, Figura A3-8).

- Pesa-se o picnómetro vazio, seco e limpo, depois pesa-se o picnómetro com água (P1), verte-se a água no picnómetro até a metade em seguida introduz-se o material sólido com massas de 340g, 345g e 350g para cada determinação. Fecha-se a tampa do picnómetro e agita-se levemente de modo que não haja bolhas de ar aderidas as superfícies das partículas ou à superfície interna do picnómetro;

- Completar com água o conteúdo do picnómetro até sua marca de calibração, enxugar previamente a parte externa do picnómetro e pesar o conjunto picnómetro + solo + água. Repetir o ensaio pelo menos 3 vezes.

d) Resultados

$$D = \frac{S}{S + P_1 - P_2} \quad \text{Equação 3.9}$$

Sendo:

P1 é Peso do frasco + água;	S é o Peso do solo (seco); e
P2 é o Peso do frasco + solo + água;	D é a Densidade Real.

3.1.7. Ensaio de determinação de reactividade potencial

a) Objectivo

Determinar maior valor para redução de alcalinidade ou menor valor para a concentração em sílica, por efeito de reacção do hidróxido de sódio com certos compostos presentes no agregado, tais como carbonato de magnésio, carbonato de ferro e sílica de magnésio.

b) Reagentes

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Acido clorídrico (d=1.18), ➤ Ácido sulfúrico (d=1.84); ➤ Ácido clorídrico (1:1); 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ácido clorídrico (1:99); ➤ Acido fluorídrico com a concentração de 4º, ➤ Solução de hidróxido de sódio normal (1000 N ± 0.010)
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

c) Materiais e equipamentos usados no ensaio

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Recipientes de 60cm³ ±10cm³, de aço inoxidável, com tampas estanques ao ar. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Frascos de Erlenmeyer de 125 cm³, ➤ Balões de fundo plano de 40 cm³, ➤ Cápsulas de preferência de platina
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Peneiros definidos na Especificação E 11-61 da ASTM, de malha quadrada de 0.297 mm(Nº 50) e 0.149 mm(Nº100) de abertura; ➤ Triturador ;Trompa ou bomba de vácuo capaz de manter uma depressão de aproximadamente 380 mm Hg; ➤ Provetes de 10cm³ e de 25 cm³, ➤ Balança para pesagens com limites de erro de 1g; ➤ Balança para pesagens com limites de erro de 0,1mg; ➤ Espátula de aço inoxidável. 	<ul style="list-style-type: none"> de 125 cm³; ➤ Cadinho de porcelana de fundo filtrante, Nº4 (para filtração rápida); ➤ Funil para adaptação do cadinho filtrante; ➤ Frasco de Kitassato; ➤ Pipetas de 10cm³, de 20cm³, de 25cm³ e de 100cm³; ➤ Balões graduados de 200cm³; ➤ Cadinho de platina de 40 mm de diâmetro; ➤ Estufa capaz de manter 105°C ± 5°C.Mufla eléctrica capaz de manter 1100 °C ± 50°C;
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

d) Preparação da amostra (Anexo 3, Figura A3-8)

- Tomam-se cerca de 5kg do agregado, secam-se na estufa a 105°C durante 24h, e deixam-se arrefecer até a temperatura ambiente num excitador ou na própria estufa, tritura-se e pulveriza-se o agregado de modo a passar pelo peneiro de 0.297 mm de abertura, tendo cuidado de evitar que se formem partículas que passem no peneiro de 0.149mm de abertura, Lava-se o agregado sobre este ultimo peneiro em porções não superiores a 100g, e rejeita-se o material que nele passar. Seca-se na estufa, a 105°C durante 24h, o material retido, após o que se deixar arrefecer até a temperatura ambiente ao exsicador ou própria estufa, peneira-se de novo com o peneiro de 0.149mm de abertura.

e) Determinações

Para a determinação de redução de alcalinidade e concentração da sílica encontra-se descrito na norma americana ASTM C 289 (1971).

Este ensaio consiste em medir a redução de alcalinidade de uma solução normal de hidróxido de sódio em contacto com o inerte pulverizado, a 80 °C, determinando-se também a quantidade de sílica que passou a estar dissolvida no soluto de hidróxido de sódio. Com estes dois elementos é possível predizer, pelo menos, a reactividade potencial do inerte.

f) Resultados

➤ Redução de alcalinidade

Sendo, para cada um dos provetes submetidos a ensaio.

- f* O factor de normalidade de ácido clorídrico usado para titulação
- V1* O volume, expresso em centímetros cúbicos da solução diluída utilizada, obtida como indica a alínea 1) do Anexo 4.
- V2* O volume expresso em centímetros cúbicos de ácido clorídrico N/20
- V3* O volume expresso em centímetros cúbicos do mesmo ácido gasto no ensaio testemunha.

A redução de alcalinidade, expressa com milimoles por decímetros cúbicos do filtrado original proveniente do ataque de cada provete pela solução de hidróxido de sódio é:

$$\frac{20xf}{V1} (V3 - V2) \times 1000 \quad \text{Equação 3.10}$$

O resultado do ensaio é dado pela média dos três valores obtidos arredondados as décimas.

➤ Concentração em sílica

Sendo, para cada um dos provetes submetidos a ensaio:

- m₁* A massa do resíduo volatilizado pelo ácido fluorídrico no ensaio do filtrado original proveniente do ataque do provete pela solução do hidróxido de sódio
- m₂* A massa do resíduo volatilizado pelo ácido fluorídrico no ensaio testemunha.

Ambas expressas em gramas a concentração em sílica do filtrado original proveniente de cada provete, expressa em milimoles por decímetro cúbico é:

$$(m_1 - m_2) \times 3330$$

Equação 3.11

3.2. ESTUDO DE COMPOSIÇÃO DO BETÃO

Nesta etapa, após o estudo de caracterização dos agregados, realizou-se o estudo de composição do betão. Um dos betões necessários seria um de referência, ou seja, um betão que contem na sua composição cimento, areia, brita e água. Os outros três betões já seriam com a adição de pó de pedra em substituição da areia natural.

Dados

Classe do betão: B30

Classe de exposição: Ambiente húmido

Trabalhabilidade: Classe de abaixamento S3

Meio de compactação: Vibração mecânica normal

Cimento: Portland Composto CEM II/B-V 42,5N

Água: potável, obtida através da rede pública de abastecimento de água.

Inertes finos: Areia natural rolada e Pó de pedra

Inerte grosso: Brita (ver ANEXO 3, Figura A3-1)

3.2.1. Estimativa de índice de vazios(I_v)

Para estimativa de índice de vazio foi usada a fórmula proposta por Faury

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

Equação 3.12

Sendo que:

$D=25.4\text{mm}$; $R/D=1$; $K=0.36$ e $K'=0.003$

Portanto

$$I_v = 0.201\text{m}^3$$

3.2.2. Água de amassadura (A)

A dosagem da água de amassadura será estimada a partir de índice de vazios e de volume de vazios, pela expressão.

$$A = (I_v - V_v) \times 1000 \quad \text{Equação 3.13}$$

Sendo que:

$$V_v=0.015\text{m}^3$$

$$A = 199 \text{ litros}$$

3.2.3. Dosagem de cimento (C)

$$C = \frac{20 \times (f_{ck} + 10)}{\sqrt[5]{D}} \quad \text{Equação 3.14}$$

Sendo que:

$f_{ck}= 30\text{Mpa}$, Tensão característica do betão

$D_{\text{max}}=25.4\text{mm}$

$$C = 418.9\text{kg} \cong 420\text{kg}$$

A (NP ENV 206, 1993), estabelece na cláusula 5.3, a dosagem mínima de cimento a adoptar para a produção do betão em função da classe de exposição ambiental.

Dosagem mínima do cimento e de 280kg por metro cubico, portanto respeita os requisitos mínimos estabelecidos pela regulamento RBLH (1989), pelo que se consideram cumpridas as disposições regulamentares a este respeito.

3.2.4. Volume das partículas do cimento (V_c)

O volume das partículas do cimento pode ser determinado pela expressão:

$$V_c = \frac{C}{\delta} \quad \text{Equação 3.15}$$

Sendo que:

$C = 420\text{kg}$, dosagem de cimento

$\delta = 3100\text{kg/m}^3$, peso específico do cimento

$$V_c = 0.135\text{m}^3$$

Volume total das partículas sólidas do betão

O Volume total das partículas sólidas do betão é dado por:

$$V_s = 1 - I_v \quad \text{Equação 3.16}$$

Sendo que:

$I_v = 0.201 \text{ m}^3$

$$V_s = 0.799\text{m}^3$$

3.2.5. Percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume total dos sólidos. (%C)

A percentagem do volume das partículas de cimento em relação ao volume total dos sólidos é dada pela expressão:

$$\%C = \frac{V_c}{V_s} \times 100 \quad \text{Equação 3.17}$$

Sendo que:

$V_c = 0.135\text{m}^3$, Volume do cimento

$V_s = 0.779\text{m}^3$, Volume dos sólidos

$$\%C = 16.95$$

3.2.6. Curva de referência de Faury

A curva de Faury é determinada por dois segmentos de retas identificados por três pontos. As coordenadas desses pontos dependem de grau de consistência pretendida, dos meios disponíveis para trabalhar o betão e certamente do tipo de inerte disponível. Assim de acordo com o Faury os pontos são definidos de seguinte modo.

Sendo:

$D_{\max} = 25.4\text{mm}$

$A = 30$

$B = 2$

$$\frac{D}{2} = A + 17 \times \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

Equação 3.18

Tabela 3. Pontos da curva de referência de Faury.

Curva de Faury	Abertura (mm)	c/cimento (%)
D	25,4	100
D/2	12,7	70,47
di	0,075	
0,0065	0,0065	0

A curva de referência de Faury encontra-se apresentada no Anexo 1, Figura A1-1.

3.2.7. Determinação das percentagens dos componentes sólidos e verificação do ajustamento da curva dos inertes a curva de referência.

O ajustamento das curvas granulométricas dos inertes a curva de referência de Faury encontram-se apresentados no Anexo 1, Figura A1-1 ,Figura A1-2 e Tabela A1-1.

Tabela 4. Percentagem inicial

Percentagens iniciais (%)	
Cimento	16,95
Areia	40,05
Brita	43,00

3.2.8. Massa de cada componente sólido

Percentagem de componentes sólidos (I_i)

$$I_i = 100 - \%C$$

Equação 3.19

$$I_i = 83\%$$

3.2.9. Composição centesimal do inerte

$$Areia = \frac{43\%}{83\%} = 51.7\%$$

$$Brita = \frac{50\%}{83\%} = 60.2\%$$

Tabela 5. Composição final

Composição betão para 1m ³	
Massa da brita (kg/m ³)	987,4
Massa da Areia (kg/m ³)	904,1
Massa do cimento (kg/m ³)	420,0
Volume de água (l/m ³)	199,0
Massa volúmica do betão fresco (kg/m ³)	2510,5

3.3. ENSAIO DE BETÃO EM ESTADO FRESCO

O cimento utilizado foi o Portland CEM II/B-V 42,5 N. É um cimento muito utilizado para fabricação de betão, pois é bom elemento quando as resistências necessárias são elevadas.

3.3.1. Ensaio de abaixamento

a) Objectivo

Avaliar a influência da quantidade da água da amassadura sobre a sua consistência.

b) Materiais e equipamento usados no ensaio

➤ Amostra;	➤ Régua de madeira;
➤ Varão de compactação;	➤ Colher de pedreiro e
➤ Placa plana, lisa e não absorvente;	
➤ Molde de chapa metálico galvanizado com pelo menos 1 mm de espessura, superfície lisa, forma tronco cónico;	➤ Escala metálica para medições com limites de erro de 0,5cm.

Os materiais e equipamentos usados no ensaio estão ilustrados na **Figura 10**.



Figura 10. Equipamento e execução do ensaio.

c) Procedimento para realização do ensaio (Anexo 3, Figura A3-9)

- Humedecer o molde e a placa, caso não haja necessidade de os lavar, e assenta-se esta horizontalmente e de modo que não possa oscilar, coloca-se o molde sobre a placa e firma-se com os pés. Enche-se o molde três camadas sucessivas, aplicando-se com a haste, 25 golpes em cada camada distribuídos por toda a superfície. Rasa-se a última camada de betão com colher, para que o molde fique perfeitamente cheio e apoia-se a régua em consola, sobre o molde, de modo que.

d) Resultados

O resultado do ensaio de abaixamento do cone de Abrams é determinado através da diferença entre a altura do molde, e o ponto mais alto da amostra que registou o abaixamento.

A validade do ensaio depende também da conformidade da deformada da amostra. Para o ensaio ser válido, o betão deve permanecer substancialmente intacto e simétrico. Se esta deformada não se confirmar, o ensaio deve ser repetido imediatamente a seguir.

3.4. ENSAIO DE BETÃO EM ESTADO ENDURECIDO

3.4.1. Ensaio de resistência à compressão

a) Objectivo

Este ensaio tem como objectivo determinar a capacidade do betão resistir a uma tensão uniforme de compressão. E para isso, colocam-se os provetes de betão numa máquina de compressão para obter-se o valor máximo de resistência do provete.

b) Materiais usados

- Prensa hidráulica com velocidade de carregamento controlável, respeitando NP EN 12390-3 (2009); e
- Balança.

Os materiais e equipamentos usados no ensaio estão ilustrados na **Figura 11**.



Figura 11. Prensa Hidráulica e Balanço.

c) Procedimento para realização do ensaio (Anexo 3, figura A3-10)

- Recolher o provete do ambiente escolhido para cura, quando este atinge a idade pretendida, retirar alguma humidade que possa existir. Pesear o provete, e registar a sua massa, limpar as superfícies da máquina usada para o ensaio. Colocar o provete numa posição centrada, em que a face de acabamento do provete não esteja em contacto com as superfícies da máquina. Aplicar a carga a uma velocidade constante, visto que a calibração desta carga era manual, o pretendido foi entre 10 kN/s e 12 kN/s e registar a carga máxima.

d) Resultados

Após o ensaio, deve-se inspeccionar se a rotura de cada provete foi satisfatória ou não satisfatória, conforme estipulado na NP EN 12390-3 (2009).

A resistência à compressão de cada provete é dada pela expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{Equação 3.20}$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão do provete (MPa ou N/mm²);

F é a carga máxima (N); e

A_c é a área da secção transversal do provete na qual a força foi aplicada (mm²).

Para cada idade, a resistência à compressão dos vários betões é dada pela média simples dos resultados dos provetes ensaiados.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DA FASE EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão analisados e comparados os resultados obtidos nos ensaios realizados, descritos no capítulo anterior.

Inicialmente começa-se por mostrar os valores obtidos para os agregados, identificando assim algumas diferenças entre os agregados naturais e os agregados artificiais. E é a partir dos resultados obtidos nesta primeira fase, que se torna possível definir melhor as composições dos betões a produzir.

Depois expõe-se os resultados obtidos no ensaio ao betão no estado fresco, que permite até certo ponto, estimar o seu desempenho no estado endurecido.

Por último, apresenta-se os resultados dos ensaios realizados ao betão em estado endurecido, de forma a analisar o seu comportamento mecânico consoante a percentagem de pó de pedra.

4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Como referido anteriormente na secção 4.1, nesta fase serão apresentados os valores que caracterizam os agregados seleccionados, de forma a prosseguir com a investigação.

4.2.1. Ensaio de granulometria

a) Areia

Massa da amostra: 350 g

A Tabela 6 apresenta os resultados encontrados através da análise granulométrica da areia.

Tabela 6. Análise granulométrica da areia grossa.

Peneiro (ASTM)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Retido (%)	Retida acumulada (%)	Passa (%)
4	4,75	2	0,57	0,57	99,43
8	2,38	6	1,72	2,29	97,71
15	1,19	41	11,75	14,04	85,96
30	0,595	130	37,25	51,29	48,71
50	0,297	137	39,26	90,54	9,46
100	0,149	31	8,88	99,43	0,57
200	0,075	2	0,57	100,00	0,00

O gráfico da curva granulométrica da areia esta ilustrado na **Figura 12**.

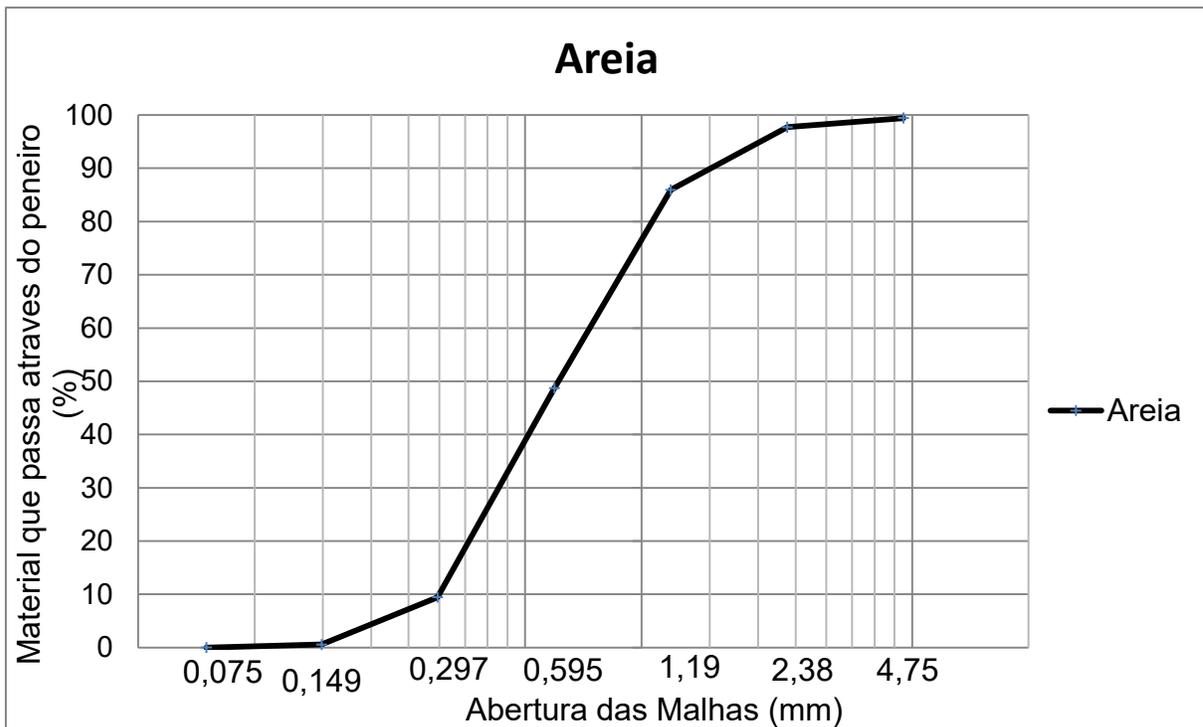


Figura 12 .Curva granulométrica da areia.

A Tabela 6 mostra os resultados do ensaio de granulometria da areia, segundo LNEC E355 (1990) ,classifica-se como sendo areia rolada natural de origem sedimental, com partículas com dimensões compreendidas entre 2.38/0.149 mm, podendo todavia, apresentar 10% das partículas com dimensões superiores a 2.38 mm e 5% com dimensões inferiores a 0.149 mm, com módulo de finura igual a 3.58, o que representa o quarto peneiro da série normal, isto é, em media apresenta uma dimensão de 1.19 mm.

b) Pó de pedra

Massa da amostra: 350 g

A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados através da análise granulométrica de pó de pedra.

Tabela 7. Análise granulométrica de pó de pedra.

Peneiro (ASTM)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Retido (%)	Retida acumulada (%)	Passa (%)
4	4,75	17	4,87	4,87	95,13
8	2,38	86	24,64	29,51	70,49
15	1,19	111	31,81	61,32	38,68
30	0,595	90	25,79	87,11	12,89
50	0,297	35	10,03	97,13	2,87
100	0,149	8	2,29	99,43	0,57
200	0,075	2	0,57	100,00	0,00

O gráfico da curva granulométrica de pó de pedra esta ilustrado na **Figura 13**.

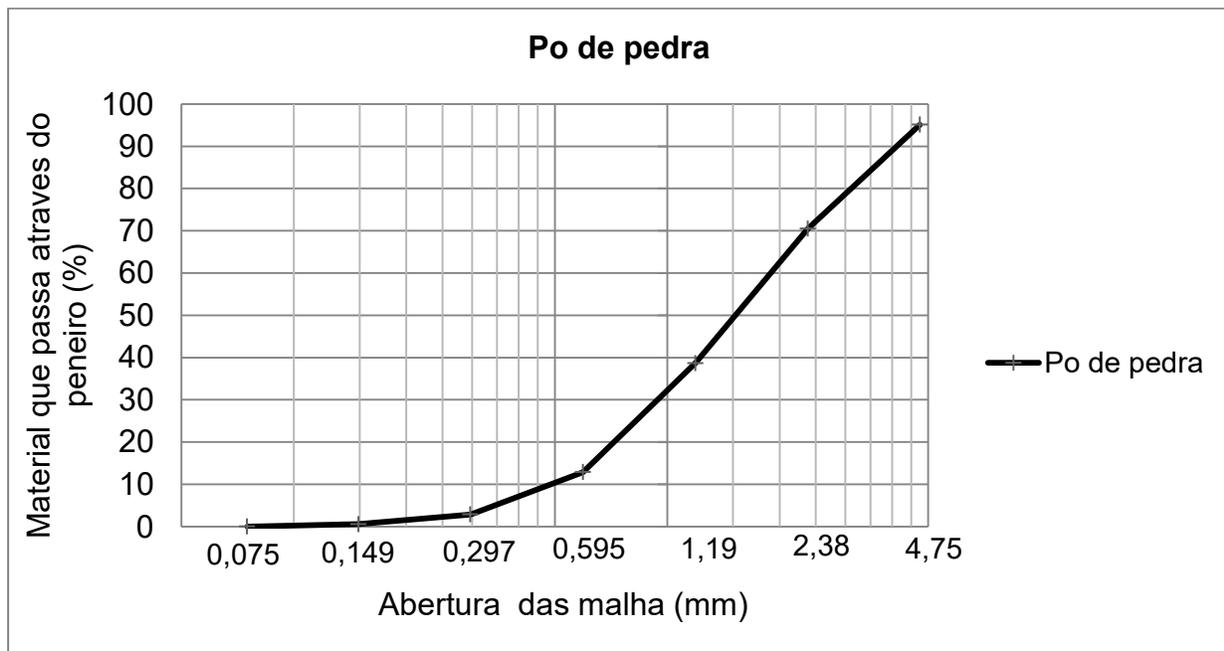


Figura 13. Curva granulométrica de pó de pedra.

A Tabela 7 mostra os resultados do ensaio de granulometria de pó de pedra, classifica-se como sendo areia britada, com partículas com dimensões compreendidas entre 4.75/0.297, com módulo de finura igual a 4.79, o que representa o quinto peneiro da série normal, isto é, em média apresenta uma dimensão de 2.38 mm.

c) **Brita**

Massa da amostra: 8000 g

A Tabela 8 apresenta os resultados encontrados através da análise granulométrica da brita.

Tabela 8. Análise granulométrica da brita.

Peneiro (ASTM)	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Retido (%)	Retida acumulada (%)	Passa (%)
1 1/2"	38,1	0	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	36	0,45	0,45	99,55
3/4"	19	3158	39,48	39,93	60,07
1/2"	12,7	3790	47,38	87,31	12,69
3/8"	9,51	876	10,95	98,26	1,74
4	4,75	106	1,33	99,59	0,41
8	2,38	33	0,41	100,00	0,00

O gráfico da curva granulométrica da areia esta ilustrado na **Figura 14**.

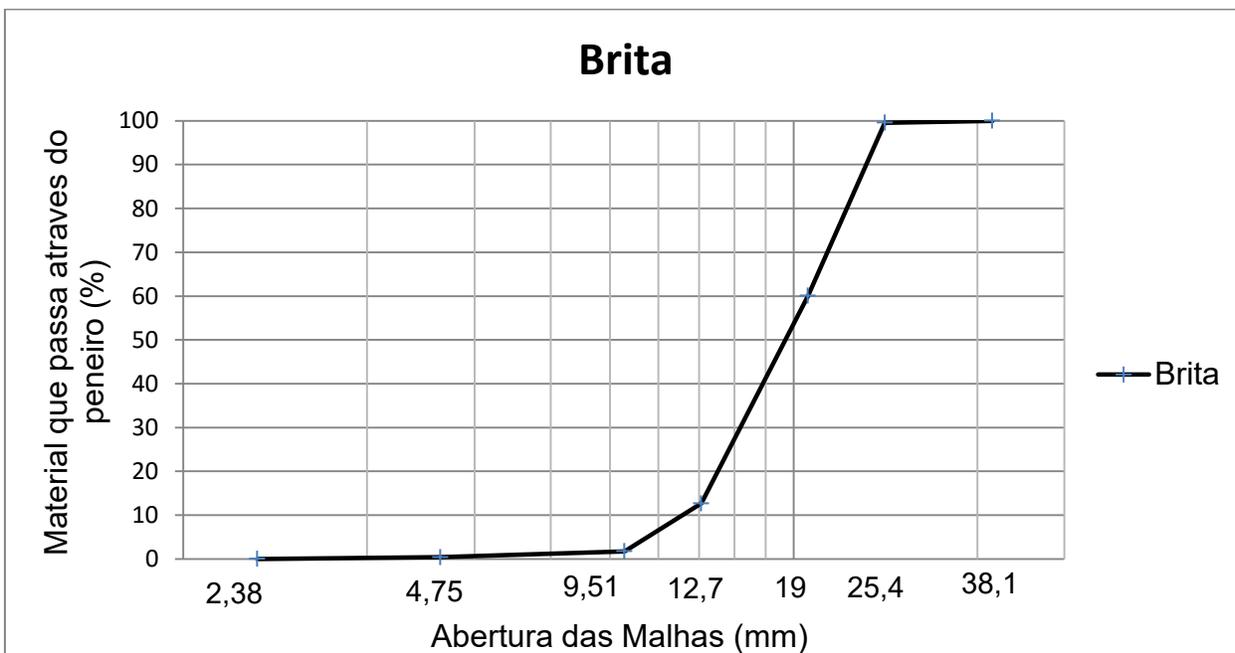


Figura 14. Curva granulométrica da brita.

A Tabela 8, mostra os resultados do ensaio de granulometria da Brita, com partículas com dimensões compreendidas entre 25.4/9.51, com módulo de finura de 7.38, o que representa o sétimo peneiro da série normal, isto é , em media apresenta uma dimensão de 9.51 mm.

4.2.2. Massa Específica e Absorção da Água

A Tabela 9 apresenta os resultados encontrados através do ensaio.

Tabela 9. Resultados obtidos no ensaio.

	Massa (g)
Peso no ar da amostra saturada com a superfície seca +cesto	7411
Peso na água da amostra saturada + cesto na água + armação	6166
Peso no ar da amostra seca menos cesto	7147
Peso do cesto no ar	1919
Peso do cesto na água +armação	3046,5
Temperatura da água (°C)	22
Peso específico da água (g/cm ³)	0,996
Peso no ar da amostra saturada com superfície seca (A)	5492
Peso na água da amostra saturada (B)	3119,5
Peso no ar da amostra seca C	5228

a) Absorção da água

A Tabela 10 apresenta os resultados encontrados através do ensaio de absorção de água da brita.

Tabela 10. Resultado obtido da absorção de água da brita.

Peso no ar da amostra seca (g)	Peso da amostra saturada com superfície seca (g)	Absorção (%)
5228	5492	5,0

A Tabela 10 mostra a absorção de água da brita em 5 por cento, implicando que o inerte analisado no ensaio variou 5% da sua massa (p1-p3) em função da sua massa sólida (p3). A norma preconiza que para um agregado ser usado para a produção de betão a taxa de absorção de água deve ser menor ou igual a 5%.

b) Massa específica

A Tabela 11 apresenta os resultados encontrados através do ensaio de massa específica da brita.

Tabela 11. Os resultados obtidos através do ensaio de massa específica da brita.

Peso específico (g/cm ³)	Impermeável	2,47
	Saturado	2,31
	Real	2,20

Conforme o resultado apresentado na Tabela 11, a brita é classificada como sendo leve, como referido na alínea d) da secção 2.1.1.

4.2.3. Baridade

A Tabela 12 apresenta os resultados encontrados através do ensaio de baridade da areia.

Tabela 12. Resultados encontrados através do ensaio de baridade da areia.

AREIA			
Determinação	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Peso da medida (g)	4139	4139	4139
Peso da medida + amostra (g)	9010	9007	9014
Peso da amostra (g)	4871	4868	4875
Volume da medida (cm ³)	3000	3000	3000
Baridade (g/cm ³)	1,62	1,62	1,63
Baridade media (g/cm ³)	1,62		

Com o resultado apresentado na Tabela 12, a areia classifica-se como sendo Denso, como descrito na alínea e) da secção 2.1.1, a sua baridade enquadra-se entre o intervalo de 1,2 a 1,7 g/cm³. A baridade calculada acima, foi determinada aparentemente nas mesmas condições, mas pra já aparecem com valores com uma certa diferença, essa diferença é capaz de ter sido originado pela compactidade do inerte no cilindro, por isso determinou-se o seu valor médio para se ter o valor mais provável, considerando as duas determinações. Quanto mais tiverem sido as

determinações, ou seja, processos de medição, compactação do inerte no cilindro, mais se aproximaria do valor de baridade mais provável, que resultaria da média aritmética das n determinações.

A Tabela 13 apresenta os resultados encontrados através do ensaio de baridade de pó de pedra.

Tabela 13. Resultados encontrados através do ensaio de baridade de pó de pedra.

PO DE PEDRA			
Determinação	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Peso da medida (g)	4139	4139	4139
Peso da medida + amostra (g)	8785	8790	8792
Peso da amostra (g)	4646	4651	4653
Volume da medida (cm ³)	3000	3000	3000
Baridade (g/cm ³)	1,55	1,55	1,55
Baridade media (g/cm ³)	1,55		

Com o resultado apresentado na Tabela 13, a areia britada classifica-se como sendo denso, porque a sua baridade enquadra-se entre o intervalo de 1,2 a 1,7 g/cm³.

A Tabela 14 apresenta os resultados encontrados através do ensaio de baridade da brita.

Tabela 14. Resultados encontrados através do ensaio de baridade de brita.

BRITA			
Determinação	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Peso da medida (g)	9840	9840	9840
Peso da medida + amostra (g)	28860	28880	28900
Peso da amostra (g)	19020	19040	19060
Volume da medida (cm ³)	15000	15000	15000
Baridade (g/cm ³)	1,27	1,27	1,27
Baridade media (g/cm ³)	1,27		

Com o resultado apresentado na Tabela 14, a brita classifica-se como sendo denso, porque a sua baridade enquadra-se entre o intervalo de 1,2 a 1,7 g/cm³.

4.2.4. Ensaio de desgaste

A Tabela 15 apresenta os resultados encontrados através do ensaio de desgaste da brita.

Tabela 15. Resultados encontrados através do ensaio de desgaste da brita.

Tipo de granulometria	B
Nº de esferas	11
Peso da carga abrasiva (g)	4706
Nº de rotações	500
Peso inicial da amostra (g)	5000
Peso final da amostra (g)	3766
Desgaste (%)	25

A Tabela 15, apresenta o resultado do ensaio pela máquina do desgaste de Los Angeles, segundo especificação LNEC E237 (1970) , limita a perda por desgaste pela máquina de Los Angeles em 50%. Portanto o inerte em estudo esta abaixo do especificado que esta em volta de 25%.

4.2.5. Ensaio de esmagamento

A Tabela 16 apresenta os resultados encontrados através do ensaio de esmagamento da brita

Tabela 16. Resultados encontrados através do ensaio de esmagamento da brita.

Designação	1º Determinação	2º Determinação
Massa do provete com agregado (g)	5259	5248
Massa do provete (g)	3250	3250

Peso Inicial da amostra (g)	2009	1998
Peso do provete com material passado no peneiro nº8 (g)	3633	3684
Peso do provete (g)	3250	3250
Peso do material que passou do peneiro nº8 (g)	383	434
Percentagem de material friável (%)	19	22
Média da percentagem do material friável (%)	20	

Segundo a NP ENV 206 (1993), o resultado do ensaio ao esmagamento para inerte grosso terá de ser inferior a 45%. Portanto o inerte estudado está com uma percentagem de 20%, que é menor que o especificado pela norma.

4.2.6. Ensaio de determinação de densidade pelo método de picnómetro

A Tabela 17 apresenta os resultados encontrados através do ensaio pelo método de picnómetro da areia.

Tabela 17. Resultados encontrados através do ensaio pelo método de picnómetro da areia.

Amostra 1			
Peso do frasco + água (P1) (g)	1264	1264	1264
Peso do solo seco (S) (g)	340	345	350
Peso do frasco + solo + água (P2) (g)	1473	1477	1480
Densidade Real (D) (g/cm ³)	2,6	2,6	2,6
Amostra 2			
Peso do frasco + água (P1) (g)	1264	1264	1264
Peso do solo seco (S) (g)	340	345	350
Peso do frasco + solo + água (P2) (g)	1474	1477	1480
Densidade Real (D) (g/cm ³)	2,6	2,6	2,6

A Tabela 18 apresenta os resultados encontrados através do ensaio pelo método de picnómetro de pó de pedra.

Tabela 18. Resultados encontrados através do ensaio pelo método de picnómetro do pó de pedra.

Amostra 1			
Peso do frasco + água (P1) (g)	1264	1264	1264
Peso do solo seco (S) (g)	340	345	350
Peso do frasco + solo + água (P2) (g)	1470	1473	1476
Densidade Real (D) (g/cm ³)	2,5	2,5	2,5
Amostra 2			
Peso do frasco + água (P1) (g)	1264	1264	1264
Peso do solo seco (S) (g)	340	345	350
Peso do frasco + solo + água (P2) (g)	1470	1473	1476
Densidade Real (D) (g/cm ³)	2,5	2,5	2,5

Com base nos resultados apresentados na Tabela 17 e Tabela 18, a areia e o pó de pedra são classificados como sendo inerte normal, como referido na alínea d) da secção 2.1.1.

4.2.7. Ensaio de determinação de reactividade potencial

A tabela **Tabela 19**, apresenta resultados do ensaio de reactividade potencial.

Tabela 19. Resultados encontrados através do ensaio de determinação de reactividade potencial

Ref	Volum e (ml)	Massa do cadinho + resíduo (g)	Massa do cadinho + resíduo Volatilizado (g)	Massa do resíduo volatilizado (g)	Redução da alcalinidade (mmol/dm ³)	Concentração em sílica (mmol/dm ³)	Observação
E.Br	18	18,715	18,714	0,001			
1	14,5	19,069	19,054	0,015	175	46,62	Rejeitado
2	13,8	19,242	19,216	0,026	210	83,25	Rejeitado
3	14,0	19,241	19,215	0,026	200	83,25	Aceite

4	14,0	19,242	19,216	0,026	200	83,25	Aceite
5	14,0	19,243	19,217	0,026	200	83,25	Aceite
6	14,5	19,061	19,05	0,018	175	56,61	Rejeitado
				Media	200	83,25	Agregado não reactivo

Com base nos resultados mostrados na **Tabela 19** e na figura A4-1 do Anexo 4, a amostra de pó de pedra não é reactivo, visto que os pontos da intersecção entre a concentração em sílica e da redução da alcalinidade se situam à esquerda e fora da zona onde estão os agregados reactivos.

4.3. ENSAIO DE BETÃO EM ESTADO FRESCO

4.3.1. Ensaio de Abaixamento (cone de Abrams)

A Tabela 20 apresenta os resultados encontrados através do ensaio de abaixamento.

Tabela 20. Resultados encontrados através do ensaio de abaixamento.

Composição (%)	0	50	75	100
Areia (kg)	22	11	5,5	0
Pó de pedra (kg)	0	11	16,5	22
Brita (kg)	24	24	24	24
Cimento (kg)	10,3	10,3	10,3	10,3
Água (l)	4,9	4,9	4,9	4,9
Acréscimo de água (l)	2,1	2	1,62	2,69
Abaixamento (cm)	11,5	14,5	10,1	11,1

Ao analisar os resultados referentes ao ensaio de abaixamento apresentados na Tabela 20, percebe-se que houve um aumento significativo de quantidade de água da amassadura para teor de substituição 100% de pó de pedra, isso acontece devido a material muito fino contido no pó de pedra, enquanto para teores de substituição de 50% e

75% houve uma redução da quantidade de água de amassadura quando comparado a composição referência (0% de pó de pedra).

4.4. ENSAIO DE BETÃO EM ESTADO ENDURECIDO

Nesta fase, será apresentado os valores referentes ao comportamento mecânico do betão no estado endurecido.

4.4.1. Ensaio de resistência à compressão

A Tabela 21 apresenta os resultados encontrados através do ensaio compressão axial aos 7 dias.

Tabela 21. Resultados dos ensaios de compressão simples aos 7 dias.

		7 Dias			
Composição (%)		0	50	75	100
Provete 1	Massa (g)	7726,0	7831,0	7922,0	7578,0
	Massa volúmica (Kg/m ³)	2289,2	2320,3	2347,3	2245,3
	F (kN)	463,8	438,3	500,0	450,0
	fc (MPa)	20,6	19,5	22,2	20,0
Provete 2	Massa (g)	7610,0	7694,0	7661,0	7718,0
	Massa volúmica (Kg/m ³)	2254,8	2279,7	2269,9	2286,8
	F (kN)	454,4	434,4	460,0	480,0
	fc (MPa)	20,2	19,3	20,4	21,3
Provete 3	Massa (g)	7750,0	7766,0	7661,0	7498,0
	Massa volúmica (Kg/m ³)	2296,3	2301,0	2269,9	2221,6
	F (kN)	454,7	469,5	500,0	460,0
	fc (MPa)	20,2	20,9	22,2	20,4
Massa volúmica media (Kg/m ³)		2280,1	2300,3	2295,7	2251,3
Tensão de compressão media (MPa)		20,3	19,9	21,6	20,6
Desvio Padrão		0,2	0,9	1,0	0,7

O gráfico do ensaio de compressão simples aos 7 dias de Idade esta ilustrado na Figura 15

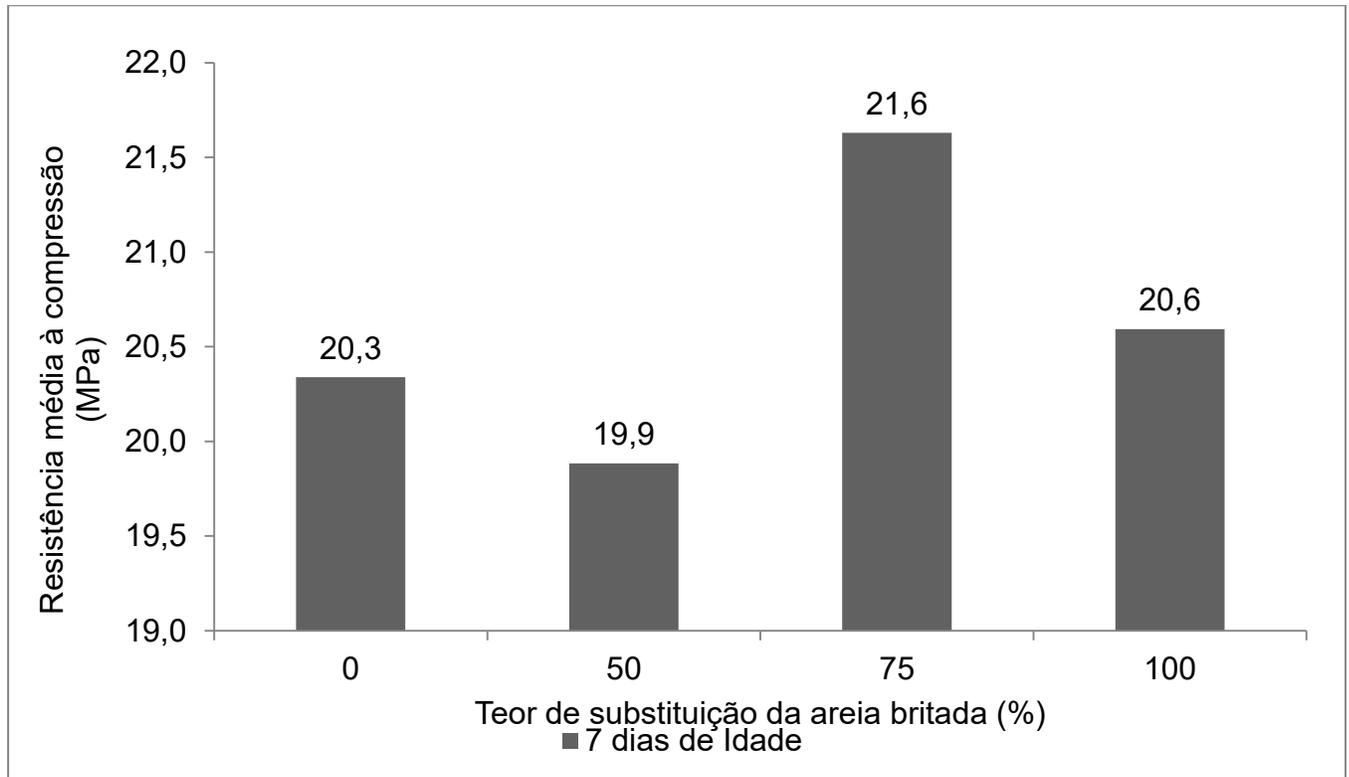


Figura 15. Resultados do ensaio de compressão simples aos 7 dias de idade.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 21, pode observar-se que somente o betão com 50% de teor de substituição tem resistência média abaixo da resistência do betão de referência, mas esta acima da resistência media aos 7 dias para esta classe de betão, segundo o regulamento REBAP (2007).

A Tabela 22 apresenta os resultados encontrados através do ensaio compressão axial aos 28 dias.

Tabela 22. Resultados dos ensaios de compressão simples aos 28 dias.

		28 Dias			
Composição (%)		0	50	75	100
Provete 1	Massa (g)	7606,0	8060,0	7695,0	7637,0
	Massa volúmica (Kg/m ³)	2253,6	2388,1	2280,0	2262,8
	F (kN)	698,5	681,2	792,4	749,1
	fc (MPa)	31,0	30,3	35,2	33,3
Provete 2	Massa (g)	7654,0	7774,0	7740,0	7634,0
	Massa volúmica (Kg/m ³)	2267,9	2303,4	2293,3	2261,9
	F (kN)	683,4	698,0	821,4	737,8
	fc (MPa)	30,4	31,0	36,5	32,8
Provete 3	Massa (g)	7629,0	7840,0	7797,0	7558,0
	Massa volúmica (Kg/m ³)	2260,4	2323,0	2310,2	2239,4
	F (kN)	647,7	670,3	842,2	734,1
	fc (MPa)	28,8	29,8	37,4	32,6
	Massa volúmica media (Kg/m ³)	2260,6	2338,2	2294,5	2254,7
	Tensão de compressão media (MPa)	30,1	30,4	36,4	32,9
	Desvio Padrão	1,2	0,6	1,1	0,3

Segundo o regulamento RBLH (1989), para determinação de desvio padrão, do coeficiente de variação e do valor característico da tensão de rotura de betão a partir dos resultados de ensaios, no cálculo de valor característico a compressão não poderão ser considerados os valores de desvio padrão inferiores a 2.5 MPa, do mesmo modo será de 7% o limite inferior ao valor de coeficiente de variação a considerar.

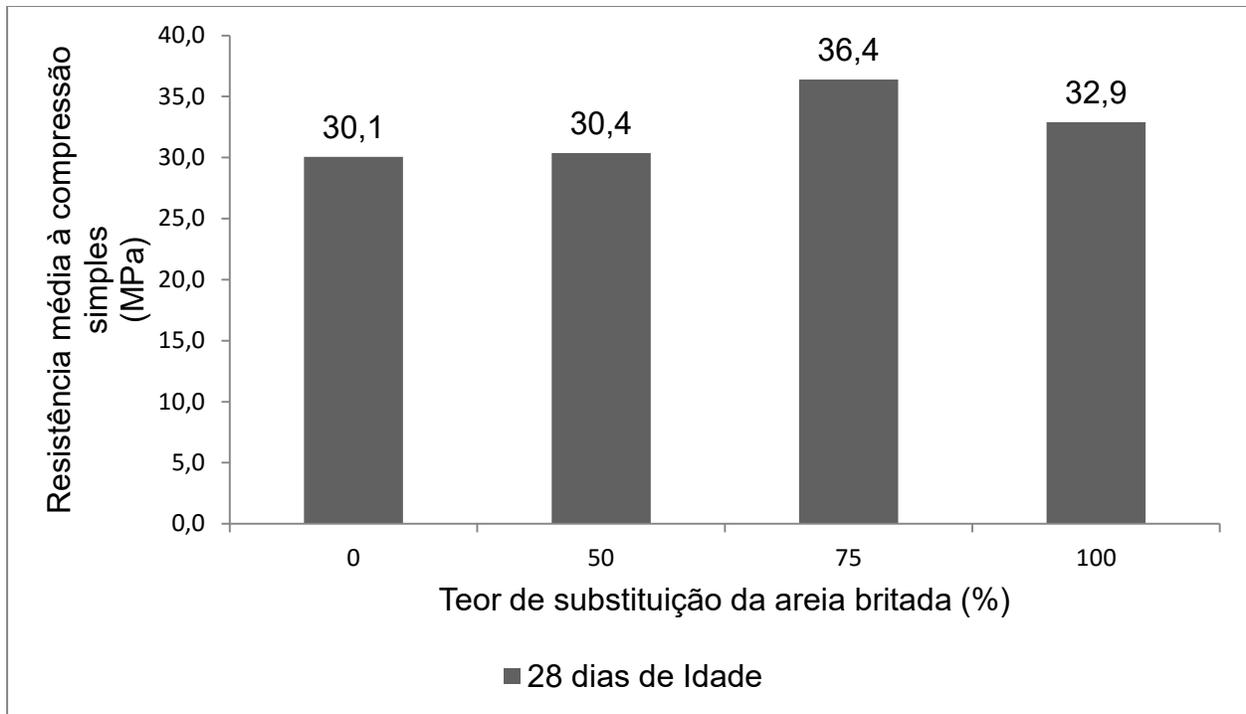


Figura 16. Resultados do ensaio de compressão simples aos 28 dias de idade.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 1 e a Figura 16, é possível observar que para teor de substituição de 75% houve aumento de resistência a compressão de aproximadamente 18% comparado com o betão de referência, 9% e 1% para betão com teor de substituição de 100% e 50% respectivamente.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDACOES

5.1. Conclusões

Contudo pode se dizer que o objectivo de incorporar pó de pedra no betão foi cumprido. Constatando que o comportamento mecânico obtido foi positivo. Como verificou-se no capítulo anterior, os resultados de resistência à compressão, foram valores superiores aos do betão de referência aos 28 dias de idade. E esses valores seguiram um aumento ao longo do tempo de cura, dando assim bons indicativos para o seu comportamento a longo prazo.

Também dizer que constatou-se que com substituição parcial da areia em 75 por cento de pó de pedra houve um aumento significativo no que tange a resistência a compressão aos 28 dias de idade, e pode se notar que a quantidade de água adicionada para atingir-se a classe de abaixamento definido é inferior a do traço de referência, portanto recomendaria a produção de betão com esta composição, que mostrou-se ter maior resistência a compressão.

A trabalhabilidade do betão com substituição parcial em 50 por cento de pó de pedra, teve a sua fluidez aumentada em cerca de 20%, isso acontece devido as para partículas finas, isto é, de dimensões inferiores a 150 micron em que a superfície especifica é grande, não é necessário uma quantidade proporcionalmente grande de água, na medida em que estas partículas parecem exibir efeitos de lubrificação sem estarem completamente molhadas (COUTINHO, 1999).

Para betão com substituição total por pó de pedra, a trabalhabilidade diminui ligeiramente devido a quantidade de partículas finas ser muito elevada.

Por fim, conclui-se que este estudo teve um balanço positivo, pois apesar de ser necessário mais alguns estudos, verificou-se a sua viabilidade. Sendo este um passo para a o uso de pó de pedra, diminuindo assim o volume de material estocado nas pedreiras, e aproveitando o valor potencial.

5.2. Recomendações

A realização deste estudo permitiu analisar algumas propriedades mecânicas do betão com agregado que resulta no processo de britagem da brita, especificamente pó de pedra de Riolito. Mas não foi possível analisar tudo o que pretendíamos, devido ao tempo que a faculdade da para o estagio profissional.

Os estudos que seriam oportunos desenvolver no futuro, seriam os seguintes.

Nas propriedades dos agregados:

- Composição química pela norma NP EN 196-2.

Nas propriedades do betão no estado endurecido:

- Absorção de água;
- Retracção;
- Módulo de elasticidade;
- Resistência à tracção; e
- Durabilidade.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ALMEIDA, S., & SAMPAIO, J. (2002). *Obtenção de Areia Artificial com Base em Finos de Pedreiras, Areia e Pedra*.
- [2] ANDRIOLO, F. R. (2005). *Construções de Materiais*. São Paulo: Pini.
- [3] ASTM C 289. (1971). *Determinação de Reatividade Potencial*. Canada.
- [4] COSTA, A. F. (2019). *Análise da adição de pó de brita no melhoramento de um solo, com vistas à pavimentação*.
- [5] COUTINHO, J. S. (1999). *Materiais de construção 1-Agregado para argamassas e Betões*.
- [6] GOMES, A. d. (2005). *Propriedade das argamassas de revestimento de fachadas*.
- [7] Khatib, J. (2004). *Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate*. *Cement and Concrete Research*.
- [8] LNEC E237. (1970). *Agregado. Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles*. Lisboa: IPQ.
- [9] LNEC E355. (1990). *"inertes para argamassas e betões"Classes granulométricas*. Lisboa: IPQ.
- [10] MANSUR, M. A. (1999). *Crushed bricks as coarse aggregate*. *ACI Materials Journal* (Vol. 96).
- [11] MENOSSE, R. T. (2004). *Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto*.
- [12] METHA, P., & MONTEIRO, P. (2008). *Concreto Microestrutura, Propriedades e Materias*. São Paulo: Ibracon.
- [13] NP 83. (1965). *Solos. Determinação da densidade das partículas*. Lisboa: IPQ.

- [14] NP 954. (1969). *“inertes para argamassas e betões” Determinação de massas volúmicas e de absorção da água de britas e godos.*
- [15] NP 955. (1993). *“inertes para argamassas e betões” Determinação de bariade.* Lisboa: IPQ.
- [16] NP EN 12390-3. (2009). *Ensaio do betão endurecido-Parte: Resistência à compressão dos provetes.* Caparica: IPQ.
- [17] NP ENV 206. (1993). *Comportamento, produção, colocação e critério de conformidade.*
- [18] NP1039. (1974). *inertes para argamassas e betões”, Determinação da resistência ao esmagamento.* Lisboa: IPQ.
- [19] NP1379. (1978). *“Inertes para argamassas e betões” Análise Granulométrica.* Lisboa: IPQ.
- [20] NP87. (1984). *Consistência de betão. Ensaio de abaixamento.* Lisboa: IPQ.
- [21] RBLH. (1989). *Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos. s.l. : Decreto-Lei no445/89, de 30 de Dezembro.*
- [22] REBAP. (2007). *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado. s.l. : Decreto-Lei no349-c/83, de 30 julho e Dereto-Lei no128-99, de 21 Abril.* Porto Editora.
- [23] TORRAL, F. P. (2009). *Reusing ceramic wastes in concrete. Construction and Building Materials.*

ANEXO

ANEXO 1 – Estudo de composição de betão.

ANEXO 2 – Resultados de ensaio a compressão simples

ANEXO 3 – Reportagem fotográfica da execução dos ensaios laboratoriais

ANEXO 4 – Procedimentos e resultados do ensaio de reactividade potencial

ANEXO 1 - Estudo de composição de betão

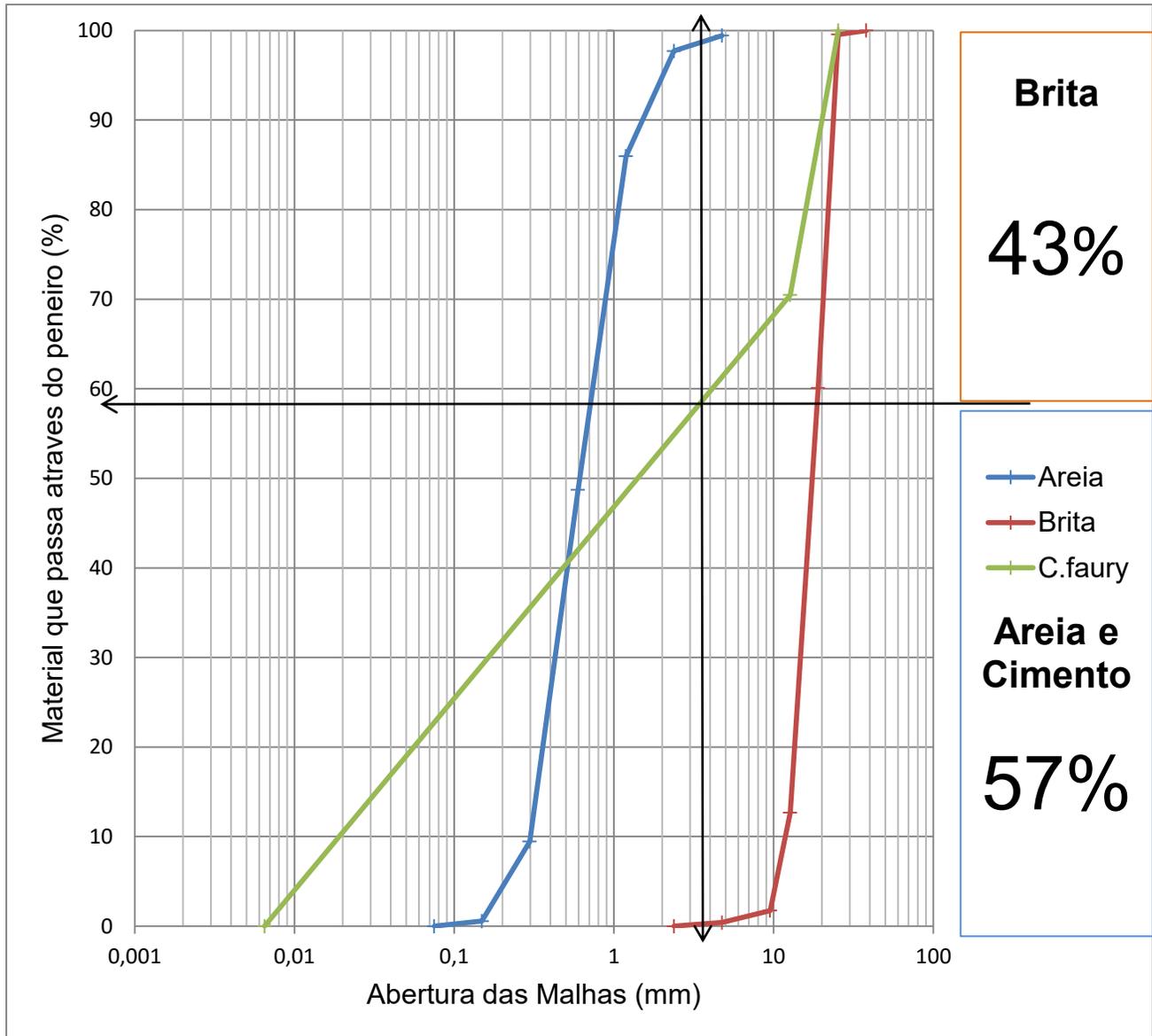


Figura A1-1. Curva de Faury incluindo cimento e percentagem inicial de cada componente.

Tabela A1 – 1. Verificação e ajustamento a curva de Referencia

Peneiro (ASTM)	Abertura (mm)	Material que passa (%)						Curva real	Curva de referência	Erro
		Brita	50	Areia	43	Cimento	16,95			
1 1/2"	38,1	100,00		100		100		100	99,99	0
1"	25,4	99,55		100		100		100	89,09	10
3/4"	19	60,07		100		100		90,0	81,29	9
1/2"	12,7	12,69		100		100		66,3	70,47	4
3/8"	9,51	1,74		100		100		60,8	67,78	7
4	4,75	0,41		99,43		100		59,9	61,32	1
8	2,38	0,00		97,71		100		59,0	54,89	4
15	1,19	0		85,96		100		53,9	48,45	5
30	0,595	0		48,71		100		37,9	42,00	4
50	0,297	0		9,46		100		21,0	35,54	15
100	0,149	0		0,57		100		17,2	29,12	12
200	0,075	0		0,00		100		16,9	22,74	6
Fundo	0,0065	0		0		0		0,0	0,00	0

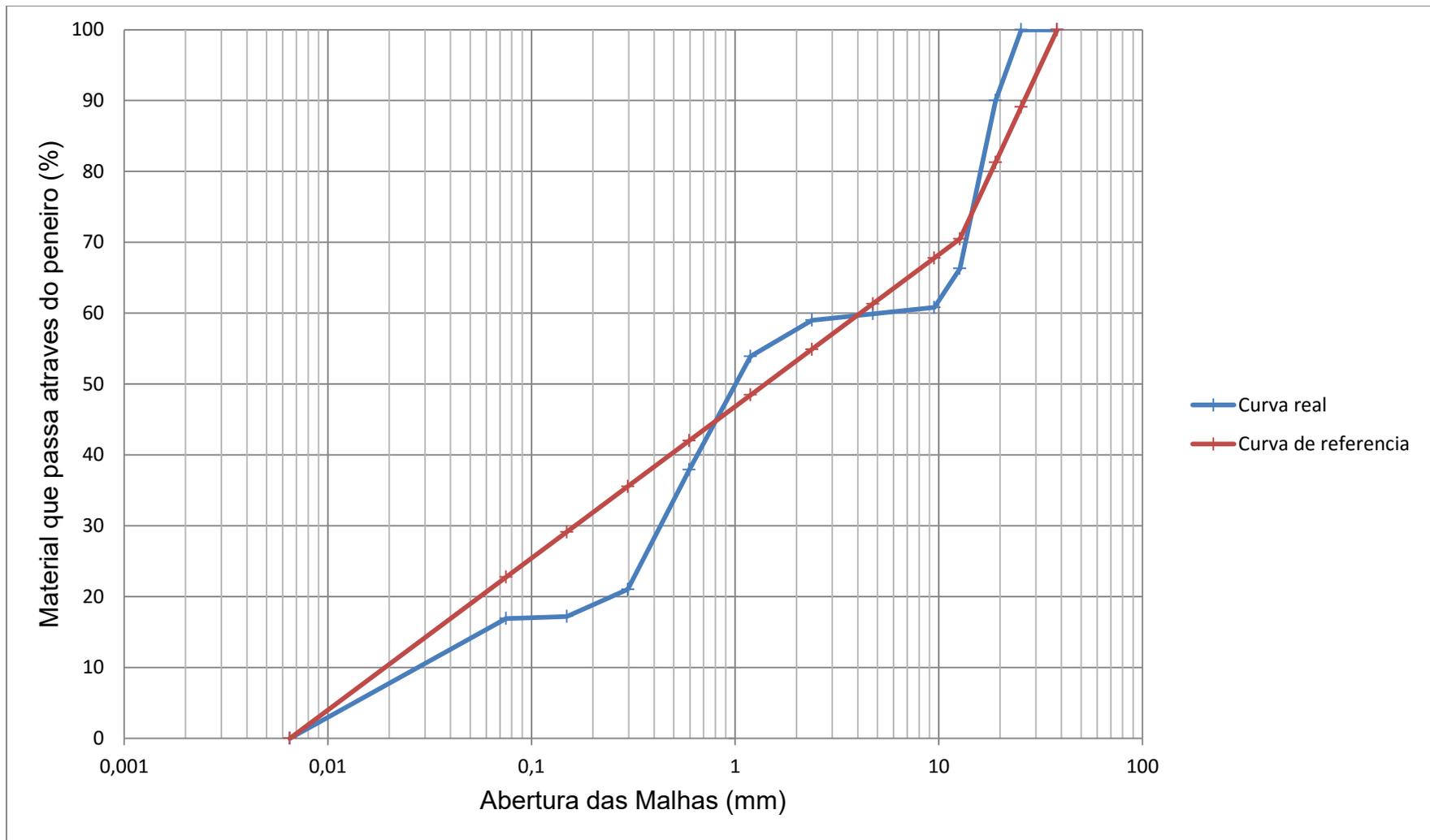


Figura A1 – 2. Curva granulométrica real dos Inertes.

ANEXO 2 – Resultados de ensaio a compressão simples aos 7 e 28 dias de idade

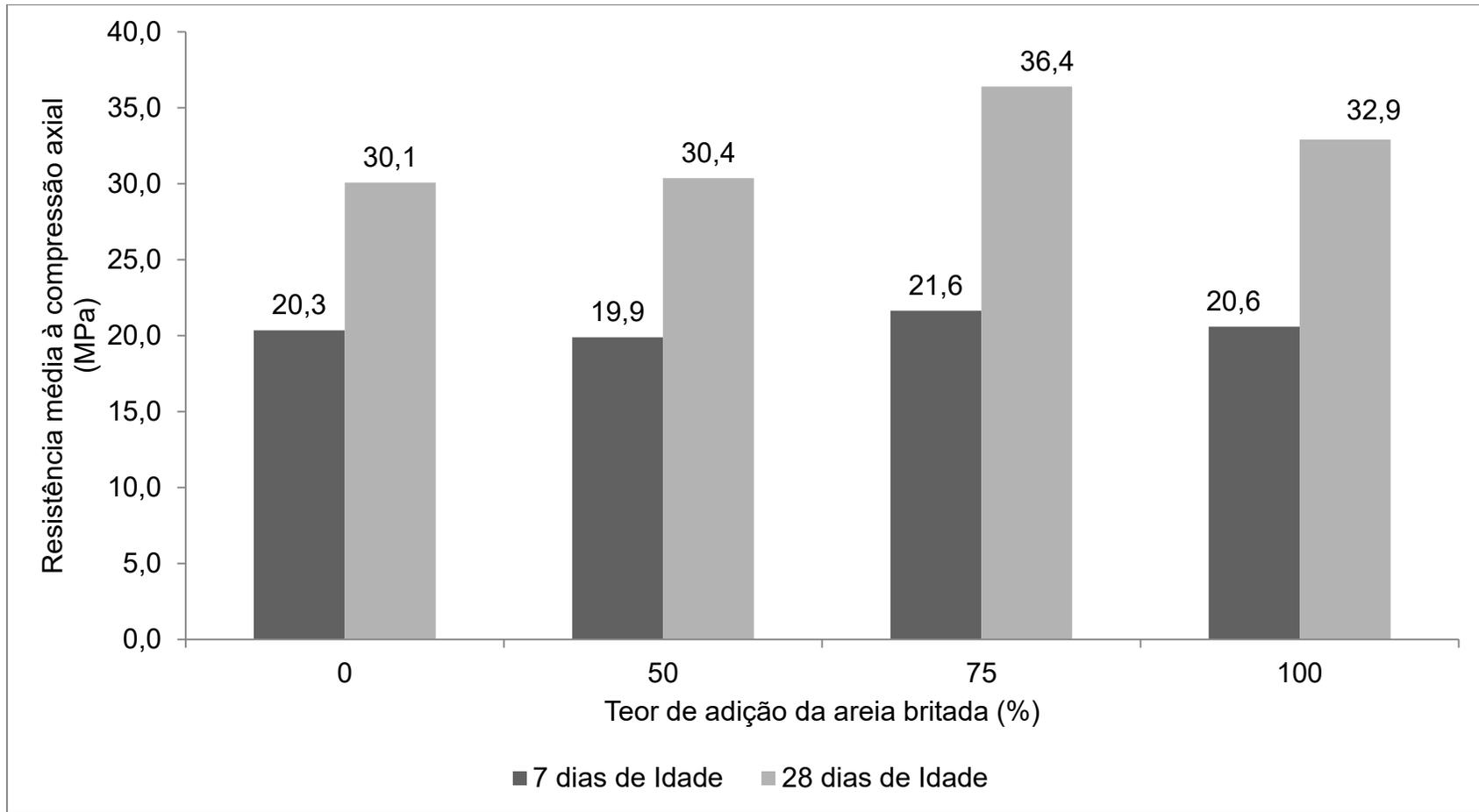


Figura A2 – 1. Gráficos dos resultados de ensaio de compressão simples aos 7 e 28 dias de Idade.

ANEXO 3 – Reportagem fotográfica dos materiais e execução dos ensaios



Figura A3 – 1. Amostra dos agregados usados, Brita (riolito) e Areia.



Figura A3 – 2. Pó de pedra (riolito) e processo de execução de ensaio de granulometria.



Figura A3 – 3. Processo de execução do ensaio de baridade da brita e areia.



Figura A3 – 4. Execução de ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles



Figura A3 – 5. Execução de ensaio de absorção de água da Brita.

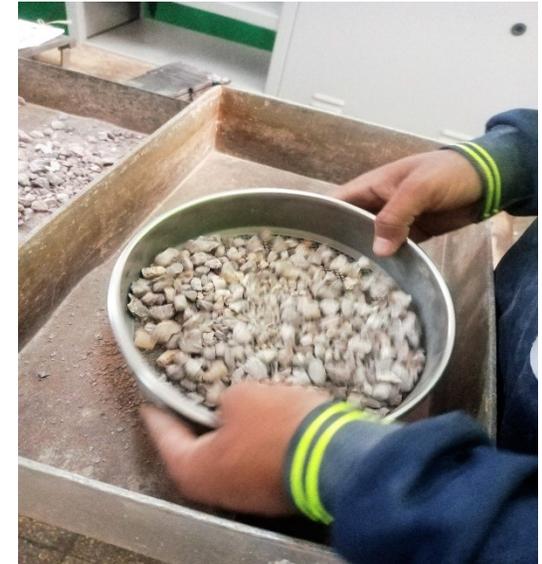


Figura A3 – 6. Equipamentos e execução do ensaio de ensaio de esmagamento.



Figura A3 – 8. Processo de execução do ensaio para determinação da densidade das partículas pelo método de picnómetro.



Figura A3 – 8. Execução do ensaio de determinação de reactividade potencial



Figura A3 – 9. Execução do ensaio de abaixamento, e moldagem de provetes de cubo de betão.



Figura A3 – 10. Execução de ensaio de compressão de cubos de betão na prensa hidráulica e tipo de rotura de provetes.



Determinação de reactividade potencial

(ASTM C 289 1971)

Determinações

1) Determinação de redução de alcalinidade

- Paralelamente à determinação e nas mesmas condições, realiza-se um ensaio testemunha com as mesmas quantidades de reagentes;
- Toma-se três porções de 25g do material seco retido no peneiro de 0.149mm de abertura;
- Coloca-se cada porção em cada um de três dos recipientes referidos na alínea d) da secção 3.1.7;
- E para cada uma procede-se como a seguir se indica: Adicionam-se com a pipeta, 25cm³ da solução de hidróxido de sódio normal, agita-se suavemente o recipiente para libertar as bolhas de ar que porventura tenham ficado aderentes as partículas do agregado e fecha-se;
- Mantem-se o recipiente a 80°C durante 24h ± 15min, após o que arrefece-se sob água corrente, durante 15min±2min, até temperatura inferior a 30°C;
- Abre-se o recipiente e filtra-se o líquido sobrenadante para o balão de fundo plano. Para isso usa-se cadinho de fundo filtrante e papel de filtro sem cinzas cortado de forma a cobrir o fundo do cadinho. Obtém-se a depressão para filtração pela trompa ou bomba de vácuo. Quando se completar a decantação do conteúdo do recipiente desliga-se aquela e transforma-se o resíduo sólido para o cadinho com espátula de aço;
- Regula-se a depressão para cerca de 380 mm Hg e continua-se a filtração até que não caia mais de uma gota em cada 10s. Anota-se o tempo gasto na filtração a fim de que se procure gastar o mesmo tempo nas filtrações das soluções obtidas a partir dos outros dois provetes;

- Agita-se o filtrado para ficar homogéneo, toma-se 10cm^3 , introduzem-se dentro dum balão graduado de 200cm^3 e perfaz-se o volume até a marca com água destilada. A solução diluída resultante serve também para determinação da concentração em sílica;
- Transforma-se 20cm^3 da solução diluída para um dos frascos de frascos de Erlenmeyer, junta-se duas ou três gotas de indicador de fonoltaleina e titula-se com ácido clorídrico até desaparecimento da cor rosa; e
- Nesta titulação, assim como a determinação da concentração em sílica, deve efectuar-se logo após a preparação da solução diluída.

2) **Determinação de concentração da sílica**

- Paralelamente a determinação e nas mesmas condições, realizam-se ensaios testemunha com as mesmas quantidades de reagentes;
- Para cada uma das três soluções diluídas, obtidas como se indica no segundo parágrafo da alínea 1), procede-se do modo seguinte: tem-se 100cm^3 , introduzem-se numa cápsula de 125cm^3 , juntam-se 5cm^3 a 10cm^3 de ácido clorídrico (d-1.18) e evapora-se até a secura em banho de vapor, retira-se a cápsula do banho, trata-se o resíduo com 5 a 10cm^3 de ácido clorídrico e igual quantidade de água. Cobre-se a cápsula com vidro de relógio e aquece-se durante 10min no banho. Dilui-se solução com igual volume de água quente. Filtra-se com papel de filtro sem cinzas, recolhe-se o filtrado numa cápsula idêntica à anterior e lava-se a sílica separada com ácido clorídrico (1:99) quente e depois com água quente. Guarda-se o papel de filtro com o resíduo;
- Evapora-se de novo o filtrado até a secura e seca-se o resíduo na estufa durante 1h. Trata-se o resíduo com 10 a 15cm^3 de ácido clorídrico (1:1). Cobre-se a cápsula com vidro-de-relógio e aquece-se durante 10min no banho. Dilui-se a solução com igual volume de água quente e procede-se como anteriormente.
- Passam-se os papéis de filtro com os resíduos para cadinho de platina previamente tratado, secam-se e incineram-se com precaução para não inflamar os papéis de filtro e calcina-se o resíduo na mufla eléctrica a $1100^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ até massa constante; e

- Trata-se a sílica obtida com algumas gotas de água, uma gota de ácido sulfúrico e cerca de 10cm³ de ácido fluorídrico. Evapora-se cautelosamente até a secura, e calcina-se na mufla durante 1 a 2 min. Deixa-se arrefecer num excicador e pesa-se.

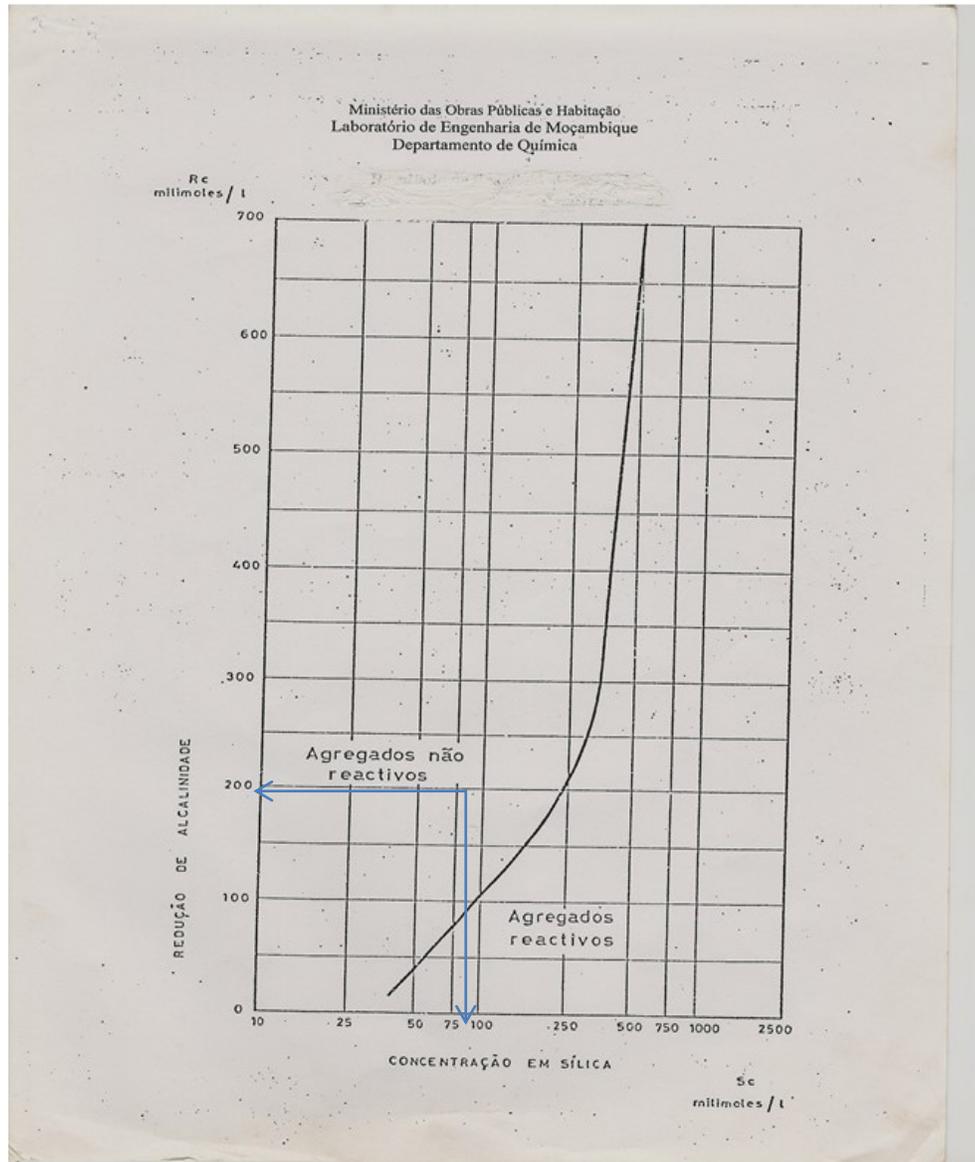


Figura A4 – 1. Diagrama da redução de alcalinidade da solução normal de hidróxido de sódio e do aumento de sílica dissolvida nessa solução, a 80°C, em contacto com o inerte.