



**UNIVERSIDADE
EDUARDO MONDLANE**
FACULDADE DE CIÊNCIAS



DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE RESÍDUO DE DEMOLIÇÃO DE
CONSTRUÇÃO CIVIL RECICLADO PARA FABRICO DE BETÃO



Autora: Emília Ilda Duarte

Maputo, Setembro de 2015



**UNIVERSIDADE
EDUARDO MONDLANE**



**FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA**

TRABALHO DE LICENCIATURA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE RESÍDUO DE DEMOLIÇÃO DE
CONSTRUÇÃO CIVIL RECICLADO PARA FABRICO DE BETÃO**



Autora: Emília Ilda Duarte

Supervisor: Professor Carvalho Madivate

Co-Supervisor: MSc. Moisés Eugénio Mabui

Maputo, Setembro de 2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Estêvão Duarte (em memória) e Ilda Mangana, aos meus irmãos Ana, Jaime (em memória), Daque, Isabel (em memória), ao Pedro Macuvele e, em especial, aos meus filhos Shelzia e Jorge, que são a razão da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e energia que me proporciona a cada dia.

Um agradecimento especial aos meus pais que me puseram no mundo e com sacrifício contribuíram para o meu bem-estar e por tudo que sou hoje.

Um agradecimento imenso vai para Pedro Eugénio Macuvele que me motivou e contribuiu para o meu ingresso na Universidade Eduardo Mondlane, e mais.

Agradeço igualmente ao Professor Carvalho Madivate pela supervisão do meu trabalho e ao meu co-supervisor, MSc. Moisés Mabui do LEM, pela supervisão e acompanhamento durante a realização do mesmo.

Agradeço ao corpo docente da Universidade Eduardo Mondlane, em especial aos docentes do Departamento de Química, assim como ao CTA pelo acompanhamento ao longo dos anos do curso.

Aos colegas do LEM, em especial Engenheiro Rodrigues Manjate, Sr. Milord Mazive e Sr. Santos Cuínica pela disposição e sugestões na elaboração do relatório.

Aos meus colegas da Faculdade: dr. Nhambete, pelas críticas, sugestões e tempo disponibilizado, Nicolau, Vombe, dra. Claudete, dr. Flávio, Osório pelo companheirismo e convivência durante o curso.

Às minhas amigas dra. Inocência Balói e Sra. Amélia Matavele pela força e apoio durante o curso.

Às Instituições que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos que, de forma específica ou geral, apoiaram a minha formação.

Vai também o meu agradecimento ao meu Chefe de Departamento, MSc. Moisés Mabui, e aos meus colegas do Departamento de Química do Laboratório de Engenharia de Moçambique, em particular.

A todos, o meu muito obrigado!

DECLARAÇÃO DE PALAVRA DE HONRA

O presente Trabalho de Licenciatura foi elaborado por mim com base na bibliografia a que se faz referência ao longo do relatório.

Maputo, Setembro de 2015

A autora

(Emília Ilda Duarte)

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

- ARB1 – Agregado reciclado de betão tipo 1
- ARB2 – Agregado reciclado de betão tipo 2
- ARC – Agregado reciclado geral
- ASTM – Sociedade Americana de Testes e Materiais
- BPHR – Base do painel publicitário do Hotel Radisson
- CEM – Cimento de acordo com a norma Europeia
- FC – Fotometria de chama
- gi – fracção granulométrica do agregado
- HK – Hotel Karibu
- IC – intervalo de confiança
- LEM – Laboratório de Engenharia de Moçambique
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Portugal
- mA – massa da amostra pesada para o ensaio
- mi – massa inicial do provete
- mr – massa do resíduo calcinado
- mr1 – massa do resíduo da segunda calcinação
- NP EN – Norma Portuguesa adoptada da Norma Europeia
- P – perda de massa do agregado
- PHR – passeio próximo à entrada do Hotel Radisson
- pi – perda de massa do provete
- PPHM – paragem Praça dos Heróis Moçambicanos
- PTM – perda total de massa
- RA – redução da alcalinidade potencial
- RDCC – Resíduo de demolição de construção civil
- S – Desvio padrão
- VA – volume gasto na titulação da amostra
- Veb – volume gasto na titulação do ensaio em branco
- \bar{X} – Média dos resultados das réplicas de cada amostra
- %RCD – desvio padrão relativo

RESUMO

O presente trabalho tem como objectivo caracterizar os resíduos de demolição de construção civil (RDCC) para o seu reaproveitamento no fabrico de betão. A interpretação dos resultados foi feita com base na comparação dos valores obtidos experimentalmente na caracterização química e física dos RDCC com os valores especificados no Regulamento de Betões para agregados naturais.

Os parâmetros analisados foram sulfatos, perda ao rubro, cloretos, álcalis, resistência à acção de sulfato de sódio e reactividade potencial aos álcalis, usando métodos clássicos (gravimetria e volumetria) e método instrumental (fotometria de chama).

As amostras analisadas foram colhidas em diferentes obras de demolição da cidade de Maputo, nomeadamente Avenida Marginal (BPHR, PHR e HK), Baixa da Cidade (FACIM) e Bairro de Urbanização (PPHM).

Todas as amostras apresentam teores de cloretos, sulfatos e álcalis dentro dos limites estabelecidos. Contudo, as mesmas amostras apresentam resultados elevados de perda ao rubro.

Na determinação da resistência à acção de sulfato de sódio, apenas a amostra PHR está dentro do limite especificado que é de $\leq 12\%$, enquanto nos resultados da determinação da reactividade potencial aos álcalis todas as amostras são classificadas como agregados reactivos.

Os resultados obtidos em diferentes RDCC, tendo em conta o intervalo de confiança calculado com um nível de significância de 90%, mostram, em alguns parâmetros, valores experimentais dentro do limite especificado no Regulamento de Betões para agregados naturais, embora hajam alguns parâmetros que mostram desvios aos valores recomendados. Contudo, as amostras podem ser usadas na construção civil.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA	3
1.2	IMPORTÂNCIA.....	3
1.3	APLICAÇÃO.....	3
2	OBJECTIVOS DO TRABALHO	4
2.1	GERAL	4
2.2	ESPECÍFICOS	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	IMPACTO AMBIENTAL	5
3.2	IMPACTO ECONÓMICO.....	6
3.3	CONCEITOS	6
3.4	CLASSIFICAÇÃO DOS RDCC	7
3.5	PROPRIEDADES E REQUISITOS MÍNIMOS DE RDCC	8
3.6	PARÂMETROS DETERMINADOS EM RDCC	8
3.6.1	Sulfatos	8
3.7	ACÇÃO DOS CLORETOS.....	11
3.8	LIMITES CRÍTICOS	13
3.9	PERDA AO RUBRO	14
3.10	RESISTÊNCIA À ACÇÃO DE SULFATO DE SÓDIO	14
3.11	ÁLCALIS.....	14
3.12	REACTIVIDADE POTENCIAL AOS ÁLCALIS	14
4	MÉTODOS USADOS NAS DETERMINAÇÕES	18
4.1	ANÁLISE GRAVIMÉTRICA	18
4.2	ANÁLISE VOLUMÉTRICA.....	19
4.3	FOTOMETRIA DE CHAMA	19
5	PARTE EXPERIMENTAL	20
5.1	COLHEITA DAS AMOSTRAS	20
5.2	IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	20
5.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	21

5.4	DETERMINAÇÃO POR MÉTODO DE FOTOMETRIA DE CHAMA.....	22
5.4.1	Determinação de álcalis (Na_2O e K_2O).....	22
5.5	DETERMINAÇÃO PELO MÉTODO VOLUMÉTRICO.....	23
5.5.1	Determinação do teor de cloretos solúveis em ácido.....	23
5.5.2	Determinação do teor de cloretos solúveis em água.....	23
5.6	DETERMINAÇÃO PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO.....	23
5.6.1	Determinação de teor de sulfatos solúveis em ácido.....	23
5.6.2	Determinação de teor de sulfatos solúveis em água.....	24
5.6.3	Determinação da Perda ao rubro.....	24
5.6.4	Determinação da reactividade potencial aos álcalis.....	24
5.6.5	Determinação da resistência à acção de sulfato de sódio.....	24
6	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	26
7	CONCLUSÕES.....	33
8	RECOMENDAÇÕES.....	34
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
	ANEXOS.....	38
	ANEXO 1 - PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES OPERACIONAIS.....	39
	ANEXO 2 - TABELAS DE RESULTADOS DAS ANÁLISES E TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	42
	ANEXO 3 - FÓRMULAS USADAS.....	49

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Classificação dos RDCC.....	7
Tabela 2 - Limites especificados no conjunto de agregados e pelas normas em cimento	17
Tabela 3 – Informação sobre a recolha de amostras da cidade de Maputo	20
Tabela 4 – Amostras naturais.....	21
Tabela 5 - Teores de SO ₃ , Cl ⁻ , álcalis e PR.....	26
Tabela 6 - Teores de SiO ₂ , redução de alcalinidade e classificação de agregados	29
Tabela 7 - Perda de massa por acção do sulfato de sódio	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da acção provocada por ataque pelos sulfatos.....	10
Figura 2 - Efeito da acção provocada pelos cloretos	13
Figura 3 - Efeito da acção provocada pela reacção alcalina em agregados	16
Figura 4 - Preparação das amostras com britadeira eléctrica.....	21
Figura 5 - Preparação das amostras com triturador manual.....	21
Figura 6 - Peneiros usados na preparação das amostras para diferentes granulometrias.....	22
Figura 7 - Preparação das amostras em diferentes granulometrias	22
Figura 8 - Amostras após imersão em sulfato de sódio a 21°C durante 16 a 18 horas	25
Figura 9 - Amostras após secagem na estufa a 105°C durante 4 horas.....	25
Figura 10 - Teor de álcalis nas diferentes amostras analisadas neste trabalho	27
Figura 11 - Teor de cloretos solúveis em ácido e em água.	27
Figura 12 - Teores de sulfatos (exprimidos na forma de SO ₃) solúveis em ácido e em água..	28
Figura 13 - Teor de perda ao rubro nas diferentes amostras analisadas, em comparação com o valor máximo admissível representado por linha contínua.....	28
Figura 14 - Gráfico da representação de reactividade potencial aos álcalis que classifica os agregados em reactivos e não reactivos	30
Figura 15 - Teor de Perda de massa dos agregados nas diferentes amostras analisadas em comparação com o valor máximo admissível representado por linha contínua.	32

1 INTRODUÇÃO

A construção civil representa uma actividade vital para o desenvolvimento económico e social de um país. Seu resíduo, que representa uma porção significativa do volume total produzido pelas actividades humanas, não tem tido um tratamento adequado, provocando a poluição ambiental (Minatti *et al.*, 2009). Segundo Spadotto *et al.*, (2011), citado por (Ferreira *et al.*, 2009), a construção civil não causa apenas impacto ambiental e económico, mas também impacto social.

Os RDCC, também denominados entulho, são gerados nas actividades de construção, reabilitação ou demolição e são constituídos por um conjunto de materiais tais como: tijolo, blocos cerâmicos, concreto em geral, madeiras, argamassa, gesso, entre outros, de acordo com Conama (2002) e Angulo (2005), citados por (Angulo *et al.*, 2009).

O processamento dos RDCC inclui, habitualmente, quatro operações principais que são:

- a) **Triagem** – eliminação de componentes indesejáveis, como por exemplo madeira, plástico, borracha, metais que prejudicam as características técnicas e ambientais do produto reciclado;
- b) **Redução primária** - processo de redução da dimensão dos RDCC e de remoção dos materiais metálicos ainda existentes;
- c) **Britagem** - redução progressiva das dimensões dos RDCC;
- d) **Peneiração** - processo de classificação do material em diferentes granulometrias de modo a contemplar as diferentes necessidades de aplicação (Especificação LNEC 471, 2006).

Os RDCC a reciclar são armazenados separadamente em função da sua origem e de seus constituintes principais, podendo, eventualmente, utilizar-se combinações de resíduos de diferentes origens desde que a mistura se efectue adequadamente e em condições controladas que assegurem a homogeneidade do material a reciclar (Especificação LNEC 471, 2006).

Os estudos de incorporação de agregados provenientes de RDCC com composição maioritariamente de betão têm revelado melhores resultados e com menor dispersão relativamente aos agregados reciclados constituídos maioritariamente por alvenaria, motivo pelo qual se confinou a utilização destes últimos a betões sem grandes exigências, que são

betões de enchimento ou regularização, sem qualquer função estrutural e em ambientes não agressivos (Especificação LNEC 471, 2006).

O uso de agregados reciclados de betão para fabrico de betões com função estrutural tem algumas limitações quanto à sua proporção no conjunto dos agregados, de modo a evitar variações não previstas do módulo de elasticidade e das propriedades relacionadas com a durabilidade.

No entanto, a Especificação LNEC E 471 2006 permite utilizar percentagens acima do limite especificado desde que sejam realizados estudos específicos que avaliem a influência destes agregados nas propriedades relevantes para aplicação considerada. Esta possibilidade pode tornar-se particularmente interessante no caso da pré-fabricação de determinados produtos como blocos, pavês, lancis, etc. (Especificação LNEC 471, 2006).

A substituição de agregados naturais por agregados reciclados em novas matrizes de concreto pode levar à mudança das propriedades deste material, em função da porosidade do agregado reciclado e de suas características superficiais (Werle *et al*, 2011).

Esta substituição apresenta também duas vantagens:

- Vantagens económicas - na aquisição da matéria-prima, diminuição de consumo de energia,
- e vantagens ambientais - na diminuição da poluição gerada pela produção dos agregados e melhoria na preservação das reservas naturais da matéria-prima.

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

A construção civil é uma actividade caracterizada no desenvolvimento económico, por sua vez é maior consumidor de recursos naturais, e também produtor de elevadas quantidades de resíduos que podem ser reaproveitados diminuindo assim o consumo de insumos da construção civil oriundos de processos de britagem de rochas, britas e areias artificiais.

As autoridades municipais podem realizar e controlar a deposição de resíduos que não podem ser submetidos a processos de reciclagem e reaproveitamento como matéria-prima. Neste caso são desenvolvidos estudos específicos para o reaproveitamento de resíduos em processos construtivos visando menor impacto ambiental produzido pela deposição incorrecta dos mesmos e retorno financeiro possível na reutilização deste material.

Neste âmbito, é necessário gerir o RDCC desde sua caracterização, reciclagem, conservação, transporte e seu destino, de modo a promover uma construção sustentável.

1.2 IMPORTÂNCIA

A gestão de resíduos é um conjunto de atitudes (comportamento, procedimento e propósitos) que apresenta como objectivo principal, a eliminação dos impactos negativos associados à produção e ao destino do próprio resíduo.

A sua gestão pode diminuir, e em alguns casos evitar os impactos negativos decorrentes das diferentes actividades proporcionando níveis crescentes de qualidade de vida, saúde pública e bem-estar social.

O processo de reaproveitamento deste material pode gerar trabalho e renda, reduzir a extração de recursos naturais e economizar energia para sua extração beneficiando a matéria-prima.

1.3 APLICAÇÃO

Os RDCC podem ser aplicados como matéria-prima para fabrico de betão, revestimentos do tipo concreto betuminoso, em camadas de bases e sub-bases de pavimentos, no fabrico de blocos, na regularização de vias não pavimentadas, nas argamassas de assentamento de alvenarias de vedação, no enchimento de betão e solo-cimento, etc.

2 OBJECTIVOS DO TRABALHO

2.1 Geral

- Fazer Caracterização físico-química dos RDCC reciclados da cidade de Maputo para reaproveitamento no fabrico de betão.

2.2 Específicos

- Fazer estudo comparativo das características dos RDCC com as dos agregados naturais usando como referência valores especificados no regulamento de betões para ligantes hidráulicos;
- Avaliar o impacto económico na utilização de RDCC reciclado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Impacto Ambiental

Por meio ambiente entende-se o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química, biológica, sócio-cultural e urbanística que permite, abriga e rege a vida em suas formas (CONAMA, 2002), citado por (Ferreira *et al.*, 2009).

Segundo Ferreira *et al.* (2009), citado por (Marques Neto, 2005), o grande volume de RDCC dispensado pela construção civil gera impactos ambientais significativos devido à sua deposição de forma não controlada e sem critérios científicos. A reciclagem e o reaproveitamento de RDCC contribuem para a diminuição da poluição gerada na construção civil e para a preservação das reservas naturais.

Não reciclar o resíduo dispensado da construção civil tem suas consequências negativas como:

- Formação de áreas irregulares de descarte - a deposição de grandes volumes de resíduos que afectam directamente as condições de tráfego de peões e veículos, a drenagem superficial e a obstrução de riachos que propiciam a multiplicação de doenças;
- Áreas, que pela maneira irregular da deposição, servem de atractivo para a deposição de outros materiais de origem industrial e domésticos;
- Construtores clandestinos de pequenas obras lançam o resíduo ao longo das estradas, vias públicas, terrenos baldios e nas margens de rios e riachos, agravando os problemas urbanos como enchentes e tráfego congestionado;
- Locais irregulares de deposição de RDCC e outros materiais propiciam a degradação de áreas que deveriam ser preservadas, bem como, a degradação dos espaços urbanos.

Segundo ABNT NBR 10004 (2004), são considerados tóxicos os resíduos que contém constituintes perigosos, tais como: Cd, Ni, CN (complexo), CN (sais), Cr (hexavalente), Pb, Cr, As, Hg, Zn.

Assim, para garantir a protecção do meio ambiente e saúde pública, foi prevista a realização do teste de lixiviação, o qual classifica os resíduos inertes para serem usados no fabrico de betão.

3.2 Impacto Económico

Em Moçambique, particularmente nas cidades de Maputo e Matola, nos últimos anos, tem se verificado um grande aumento de construções de novos edifícios para habitação e prestação de serviços. Atendendo que uma obra de construção civil engloba vários processos de geração de resíduos, é fundamental e urgente que os agentes ligados aos processos de construção adoptem técnicas para rejeição de menor quantidade possível de resíduos.

Os RDCC são produzidos em grande quantidade, sendo em Maputo-Cidade cerca de 50 toneladas por dia (BR N° 38 III Série 2009), o que implica elevados custos de remoção e transporte. Estima-se gastos na ordem de quarenta e cinco milhões de meticais ao ano (cerca de 12% dos gastos do município), sem incluir a recolha de resíduos pelos próprios empreiteiros.

Na Matola-Cidade não foram encontrados dados preliminares que indicam o nível de produção de RDCC mas estima-se que não deve estar muito longe da quantidade produzida na cidade de Maputo (Mabui, 2015).

3.3 Conceitos

- Agregado é um material constituído por partículas de rochas com dimensões que variam, geralmente, entre cerca de 200 mm e 0,1 mm, dispersas pela pasta de cimento, e cujo volume constitui 70 a 80 % do volume do betão (Coutinho, 2006).
- Betão é um material constituído pela mistura devidamente proporcionada de agregados em geral pedra areia, com um ligante hidráulico (cimento), água e eventualmente adjuvantes (Coutinho, 2002).
- RDCC é uma mistura de materiais de construção, que pode ser areia, pedra, cimento, ferro, tijolo, etc. retirado das obras com o fim de descarte. Essa mistura é também denominada por entulho.

3.4 Classificação dos RDCC

Os agregados provenientes dos resíduos de construção e demolição são agrupados em três classes: ARB1, ARB2 e ARC, conforme ilustra a tabela 1 (Especificação LNEC E 471, 2006).

Tabela 1- Classificação dos RDCC

Classe	Proporções Dos Constituintes (%)					
	Rc	Rc + Ru	R _B	R _A	FL _S +FL _{NS}	X + R _G
ARB1	≥ 90		≤ 10	≤ 5	≤ 1	≤ 0,2
ARB2	≥ 70		≤ 30	≤ 5	≤ 1	≤ 0,5
ARC ⁽¹⁾	≥ 90			≤ 10	≤ 1	≤ 1

⁽¹⁾ material com massa volúmica inferior a 1000Kg/m³

Rc – produto de betão e argamassa;

Ru – agregados não ligados, pedra natural e agregados tratados com ligantes hidráulicos;

R_A – materiais betuminosos;

R_B – elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolos, telhas, ladrilhos, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante;

R_G – vidro;

FL_S – material pétreo flutuante;

FL_{NS} – material não pétreo flutuante;

X – materiais indesejáveis: materiais coesivos (por ex. solos argilosos), plásticos, borrachas, metais (ferrosos e não ferrosos) e materiais putrescíveis (Especificação LNEC E 471, 2006).

As classes ARB1 e ARB2 são constituídas maioritariamente por betão, misturados ou não misturados com agregados não ligados.

A classe ARC tem como constituintes principais o betão, agregados não ligados e elementos de alvenaria, não havendo exigências quanto às percentagens relativas de cada um deles.

A identificação dos agregados reciclados é feita através da indicação do produtor (operador de gestão), do local de produção, da sigla da classe a que pertence e da granulometria, sendo possível incluir outras informações suplementares (Especificação LNEC E 471, 2006).

Os agregados das classes ARB1 e ARB2 podem ser usados no fabrico de betão simples ou armado. Para aplicação em betão armado a proporção máxima de agregados reciclados de betão, no conjunto dos agregados é de 25% para os agregados da classe ARB1 e 20% para os agregados da classe ARB2 (Especificação LNEC E 471, 2006).

Para betões simples, de enchimento ou de regularização, em ambientes não agressivos, a percentagem de incorporação não fica sujeita à qualquer limite (Especificação LNEC E 471, 2006).

A utilização dos agregados da classe ARC só é permitida em betões de enchimento ou de regularização, sem qualquer função estrutural, e em ambientes não agressivos. A sua utilização noutros materiais, qualquer que seja a percentagem de incorporação, deve ser sempre precedida de estudos especificados (Especificação LNEC E 471, 2006).

3.5 Propriedades e requisitos mínimos de RDCC

Os RDCC não devem conter materiais que, pela sua natureza, forma, dimensão e teor, possam influenciar de forma negativa às propriedades do betão.

Os agregados reciclados de betão e agregados compostos, a utilizar no fabrico de betão, devem satisfazer os requisitos estabelecidos na especificação LNEC E471 – 2006.

3.6 PARÂMETROS A DETERMINADOS EM RDCC

3.6.1 Sulfatos

A percentagem de sulfatos é limitada para todo tipo de cimento Portland, estes aparecem no cimento como reguladores de presa na forma de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Entretanto, uma quantidade excessiva de sulfatos pode originar sulfo-aluminatos de cálcio expansivos que podem por em perigo a estrutura do cimento hidratado.

O ataque por sulfatos, que se enquadra nos fenómenos de degradação química do betão, resulta, em geral, da reacção entre o ião sulfato com os aluminatos de cimento, formando-se sulfo-aluminato tricálcio (etringite) e gesso, produzindo um significativo aumento de volume na presença da água.

A presença de sílica e carbonato pode conduzir à formação de um terceiro composto, a taumasite. São portanto, dois fenómenos de degradação do betão associados ao ataque por

sulfatos que interessa analisar, a formação da etringite e a formação da taumasite (Coutinho, 2001).

➤ **Formação da etringite**

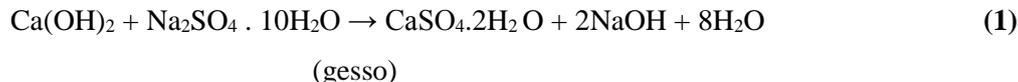
Todos os sulfatos levam à deterioração do betão, mas o mecanismo e grau de ataque depende do tipo de sulfato presente.

O sulfato de cálcio reage apenas com aluminato de cálcio de cimento hidratado para formar sulfoaluminato de cálcio, mas o sulfato de sódio reage com hidróxido de cálcio livre com formação de sulfato de cálcio que por sua vez reage com aluminato (Coutinho, 2001).

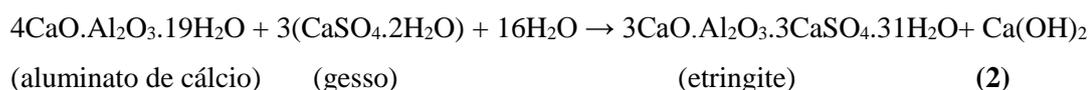
A etringite pode resultar de dois processos químicos diferentes; um dos processos está associado aos sulfatos de cálcio e de sódio, e o outro está associado ao sulfato de magnésio.

O primeiro resulta da reacção do sulfato de sódio com hidróxido de cálcio, formando sulfato de cálcio (gesso), seguida da reacção deste com aluminato de cálcio hidratado, formando sulfoaluminato de cálcio (etringite), conforme as equações de reacção 1 e 2.

a) **Reacção de Sulfato de sódio com formação de gesso**

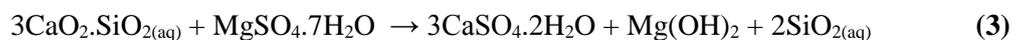


b) **Reacção do sulfato de cálcio com formação de etringite**



O segundo processo da formação da etringite, tem uma acção mais devastadora que o processo anterior, resulta da acção do sulfato de magnésio sobre os silicatos de cálcio hidratados e respectiva reacção com os aluminatos e hidróxidos de cálcio, conforme a equação de reacção (3).

c) **Reacção do sulfato de magnésio com formação do gesso**

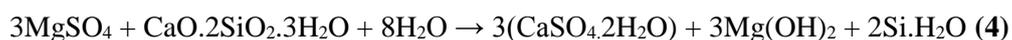


O modo de garantir a protecção do betão contra o ataque por sulfatos reside na escolha de cimentos não reactivos aos sulfatos (CEM VB, CEM VA) e pelo nível de porosidade do betão (razão a/c baixa).

➤ **Formação da Taumasite**

A taumasite resulta da reacção dos sulfatos com os silicatos cálcicos hidratados (CSH), que são o principal agente de ligação do cimento Portland. Esta reacção é acompanhada por perda de resistência do betão, transformando o ligante numa pasta sem coesão. Para ocorrer esta reacção, é necessário a existência de iões sulfatos, iões carbonato (em geral calcário presente no betão), silicatos cálcicos hidratados ou não hidratados, humidade e água (Coutinho, 2001).

d) Reacção de decomposição dos silicatos cálcicos hidratados



A principal consequência deste processo é a descalcificação do C-S-H, com alteração da estrutura por perda do ligante, com a consequente perda de resistência. A figura 1 mostra o resultado da reacção do excesso de sulfatos com o cimento enfraquecendo a estrutura do betão e provocando de seguida uma degradação.



Figura 1 - Efeito da acção provocada por ataque pelos sulfatos

3.7 Acção dos cloretos

Os cloretos alteram o tempo de presa de cimento e a velocidade de endurecimento, mas não são perigosos para o betão simples, pois não formam compostos indesejáveis com os componentes do cimento mesmo em teores muito elevados.

Mas no caso do betão armado ou pré esforçado (com armaduras), os cloretos podem provocar oxidação das armaduras, diminuindo a secção como também expansões, pois a ferrugem forma-se com um notável aumento de volume que acaba rompendo o revestimento do betão, o que acelera mais ainda o processo de corrosão (Coutinho, 1999) citado por (Coutinho, 2006).

O constituinte do cimento, responsável directo na acção de cloretos, é o C₃A (aluminato tricálcio). Em presença de hidróxido de cálcio, reage de preferência com ião sulfato para dar sulfoaluminatos que são compostos muito estáveis, de seguida reage com ião cloreto para dar cloroaluminatos de acordo com a reacção abaixo (Salta, 1987).



Os cloretos que não reagem ficam disponíveis para despassivar o aço protegido pela formação de uma película estável de óxido de ferro na interface aço/betão (passivante), que é assegurada pela alta alcalinidade do betão (pH 13 a 14) (Salta, 1987).

A ruptura da passivação do aço pode ser devido ao:

- Decréscimo do pH a valores menores de 8 a 9,5, principalmente por acção de CO₂ atmosférico;
- Presença de agentes despassivantes, principalmente cloretos em quantidades suficientes para que haja destruição da película passivante.

As equações de reacção apresentadas abaixo mostram a despassivação do aço. Além de depender da concentração do ião cloreto, a acção despassivante será também influenciada pela natureza do catião associado ao ião cloreto (Ca²⁺, Na⁺, K⁺, etc), através da sua influência na velocidade de difusão dos cloretos.

Se as condições do meio forem alteradas de modo a ocorrer a dissolução dos cloretoaluminatos, como parece acontecer quando há acesso de dióxido de carbono, mais iões ficarão disponíveis para poderem destruir a passivação das armaduras (Salta, 1987).

e) Reacção de despassivação



f) Reacção principal da oxidação



Esta reacção é um processo anódico, que consiste fundamentalmente na dissolução do ferro com libertação de electrões.

g) Reacções catódicas



A ocorrência de uma ou outra destas reacções depende do valor do pH.

h) Reacções secundárias da oxidação



Em suma, segundo (Salta, 1987), a acção dos cloretos dependerá basicamente da concentração do ião hidróxido, da concentração total em cloretos existentes no betão e principalmente da concentração em ião cloreto livre. Esta concentração dependerá directamente dos factores seguinte:

- Quantidade de cloretos introduzidos no betão;
- Dosagem do cimento no betão;
- Tipo de cimento;
- Tipo de C₃A no cimento;
- Teor de sulfato de cálcio (gesso) no cimento;
- Tipo de catião associado ao cloreto;
- Razão água/cimento no betão.

3.8 Limites críticos

Segundo Hausmann, citado por (Salta, 1987), o limite crítico em cloretos é de 0,61%.

Outro factor importante a considerar é o momento da introdução dos cloretos, se uma dada quantidade de cloretos for introduzida no betão posteriormente ao seu fabrico, a percentagem de cloretos que permanecem livres será muito mais elevada do que se essa mesma quantidade de cloretos fosse introduzida na altura da amassadura. Isto explica-se pelo facto das reacções no estado sólido serem muito mais lentas do que no estado líquido.

A figura 2 ilustra a degradação do betão devido ao processo alternado de molhagem e secagem, factores que permitem acesso de O₂ para o interior do betão, facilitando entrada de cloretos.



Figura 2 - Efeito da acção provocada pelos cloretos

3.9 Perda ao Rubro

Perda ao rubro, exprime a perda de massa da amostra após o aquecimento em mufla a 950 °C. A maior parte desse valor é referente ao dióxido de carbono (CO₂) e, a outra parte à água evaporada (Prando *et al.*, 2013).

Esta característica demonstra o grau de carbonatação e hidratação do CaO e MgO livres devido à exposição atmosférica (Neville, 1995) citado por (Coutinho, 2006).

O armazenamento dos componentes do betão no estaleiro deve ser feito de modo a assegurar a sua boa conservação enquanto aguardam a utilização (Diário do Governo, 1971).

3.10 Resistência à acção de sulfato de sódio

Este parâmetro constitui ensaio de recepção que serve sobretudo para verificar se há variação na qualidade do agregado, quando já se conhece bem o seu comportamento real.

O procedimento deste ensaio consiste em considerar uma amostra de agregado, devidamente peneirada entre dois peneiros muito próximos, sujeita à imersão em solução de sulfato de sódio com formação de cristais seguida por secagem na estufa.

A formação de cristais tende a fracturar as partículas e a granulometria depois dos ciclos fornece, em princípio o grau de resistência à congelação.

Mas este método não nos dá indicações exactas sobre o comportamento da pedra no betão sujeito a condições reais de alternância de temperaturas negativas e positivas. De facto o agregado está rodeado da pasta de cimento, o que condiciona o seu comportamento e também a taxa de variação da temperatura que se verifica realmente é diferente da dos ensaios (Coutinho, 2002).

3.11 Álcalis

Os álcalis encontram-se com frequência no cimento Portland, em teores de 0,5 a 1,3% desenvolvendo papel de fundentes na cozedura e agindo como aceleradores da pega (Petrucci, 1970).

3.12 Reactividade Potencial aos álcalis

O silício ocorre na natureza na forma combinada, encontra-se praticamente em todas as rochas, areias e solos. Entre seus compostos naturais alguns dos mais importantes são quartzo - SiO₂,

asbestos – $H_4Mg_3Si_2O_9$, zeólita – $Na_2(Al_2Si_3O_{10}).H_2O$, mica – $K_2Al_2(Al_2Si_3O_{10}).H_2O$ (Peixoto, 2001) citado por (Caux et al., 2011). É de salientar que o silício a analisar neste trabalho é o quartzo - SiO_2 .

Os agregados reciclados são considerados potencialmente reactivos segundo a norma (BS 8500-2, 2002) citada na (Especificação LNEC 471, 2006).

Quando num betão conservado em meio húmido o agregado contém sílica reactiva e o cimento possui uma quantidade superior a 0,6% de álcalis, expressa em Na_2O , dá-se uma reacção química com grande expansão entre estes componentes que leva à formação de silicatos alcalinos (Coutinho, 2006; Coutinho, 2002).

i) Reacções de álcalis-sílica



Os iões de silicatos associam-se em iões complexos que não são capazes de se difundir através da pasta do cimento endurecido. Esta pasta actua então como uma membrana semi-permeável, que permite a passagem da água dos iões de complexos dos silicatos, que originam uma pressão osmótica.

Dentro do espaço onde se formaram os silicatos, limitado pela pasta de cimento, o produto da reacção não pode então sair e, como à medida que se vai formando ocupa um volume maior do que o original, a pressão osmótica vai crescendo até provocar a ruptura da estrutura da pasta de cimento (Coutinho, 2006).

Esta pressão é da ordem, ou superiores às tensões de roptura do betão por tracção e é admissível que o gel possa provocar a sua expansão e fissuração.

A determinação da reactividade potencial serve para avaliar o comportamento real do agregado. Para isso, mede-se a redução da alcalinidade de uma solução normal de hidróxido de sódio em contacto com o agregado pulverizado a $80^\circ C$, determinando-se também a quantidade de sílica que se dissolveu na solução de hidróxido de sódio.

A reactividade é afectada do seguinte modo:

- a) pela concentração em álcalis na superfície reactiva, a qual é, evidentemente, função do teor de álcalis do cimento;
- b) pela dimensão das partículas e sua porosidade;
- c) pela quantidade da água livre da pasta de cimento;
- d) pela sua permeabilidade.

Os agregados que contêm sílica reactiva reagem com os álcalis (sódio e potássio) contidos no cimento ou com outros provenientes do meio ambiente sob forma de cloreto de sódio.

A reacção álcali-agregado é um processo que ocorre lentamente de forma heterogénea enquanto estiver ligada à composição dos agregados que contêm a sílica, o produto da reacção com os silicatos de sódio e potássio hidratado.

A presença imediata da reacção álcali-agregados é feita através de uma análise visual, conforme mostra a figura 3. Este tipo de degradação manifesta-se com a fissuração do betão distribuída em teia mais ou menos desordenada consoante a armadura presente que por sua vez provoca um inchamento causado pelo aumento de volume.

São considerados potencialmente reactivos os agregados cujo teor em percentagem de minerais esteja situado à direita da linha que separa as duas áreas no gráfico da representação da reactividade potencial aos álcalis (ASTM C 289, 1976).

Um agregado potencialmente reactivo pode ser empregado, caso se use um cimento com menos do que 0.6% de álcalis (Petrucci, 1970).



Figura 3 - Efeito da acção provocada pela reacção alcalina em agregados

As tabelas 2 e 3 ilustram os parâmetros admissíveis em agregados - Regulamento de Betões em agregados naturais e pelas normas em cimento e cimento.

Tabela 2 - Limites especificados no conjunto de agregados e pelas normas em cimento

Betão	Cimento	Cl⁻ (%)	SO₃ (%)	Álcalis (Na₂O) (%)
Simplex	Portland normal	-	3,5	0,6
Armado e pré-esforçado	Portland normal	1,3	3,5	0,6

Fonte: Diário da República – I Série nº 299 (1989)

4 MÉTODOS USADOS NAS DETERMINAÇÕES

As análises foram feitas usando métodos clássicos:

- Método gravimétrico para determinação de SO_3 , P.R., concentração em sílica e resistência à acção de sulfato de sódio;
- Método volumétrico para determinação de Cl^- e redução de alcalinidade.

Além dos métodos clássicos, também, foi usado um método instrumental (fotometria da chama) para análise de óxido de sódio e óxido de potássio.

4.1 Análise gravimétrica

Princípio da gravimetria (método de precipitação): Baseia-se na determinação da massa do precipitado depositado após precipitação do elemento (ião) sob forma de composto. A amostra a analisar é submetida numa solução, depois precipita-se a elemento (ião) em estudo sob forma de um composto dificilmente solúvel ou então liberta-se no estado livre. O precipitado separa-se por filtração em seguida lava-se e calcina-se (ou seca-se) e determina-se a sua massa com rigor. O teor do elemento a dosear calcula-se a partir da massa do precipitado e da sua fórmula química e exprime-se o resultado em percentagem. A precisão de resultado de análise neste método depende, em grande parte, da escolha conveniente do precipitante, da quantidade a adicionar e das condições em que se efectua a precipitação (Alexéev, 2000).

Procedimento: O processo começa por decantação, depois lava-se o precipitado e transfere-se para o filtro. Lança-se no copo de precipitação que contém o precipitado uma certa quantidade de líquido de lavagem, mistura-se com cuidado e deixa-se depositar, novamente decanta-se todo líquido para o filtro com auxílio de uma vareta de vidro. Lança no copo uma nova porção de líquido de lavagem, este processo acelera a eliminação de impurezas contidas no precipitado (Alexéev, 2000).

4.2 Análise volumétrica

A análise volumétrica é feita por titulação, através da reacção quantitativa entre volume de uma solução com concentração conhecida com um volume conhecido da solução que contém o elemento a ser determinado, anota-se o volume gasto na titulação e calcula-se o teor do elemento a analisar.

4.3 Fotometria de chama

A determinação de sódio e potássio foi feita por fotometria de chama, o fotómetro e alimentado por gás natural. Os catiões sódio e potássio contidos numa solução com diluição conhecida, são arrastados por ar comprimido para uma chama que funciona como fonte energética de excitação dos electrões.

Quando os electrões transitam para seu estado fundamental emitem radiações com energia e comprimento de onda característico. As radiações emitidas são direccionadas para um conjunto de lentes e prismas monocromadores por forma a seleccionar a radiação característica do elemento a determinar. Esta característica incide sobre uma célula fotoelétrica, produzindo uma corrente eléctrica fraca cuja densidade é proporcional à intensidade da radiação e, por sua vez, proporcional à concentração do elemento a determinar (Manjate, 2002/04).

➤ Interferências

A principal interferência em fotometria de chama é a ionização e pode ser eliminada adicionando às soluções padrão e à amostra uma espécie facilmente ionizável em elevadas concentrações (Okumura *et al.*, 2004).

5 PARTE EXPERIMENTAL

5.1 COLHEITA DAS AMOSTRAS

As amostras de RDCC foram colhidas em algumas obras de demolição da cidade de Maputo, aproximadamente 100 Kg para cada amostra, as zonas de colheita foram: baixa da cidade, bairro de urbanização e costa do sol (avenida marginal).

Os agregados naturais: pedra natural, areia grossa e cimento foram comprados numa das ferragens de venda de material de construção na cidade de maputo. As amostras constam das tabelas 3 e 4.

5.2 Identificação das amostras

Tabela 3 – Informação sobre a recolha de amostras da cidade de Maputo

Item	Tipo de amostra	Refª da amostra	Local	Data da colheita	Observação
1	Agregado reciclado misturado	HK	Antiga obra do Hotel Karibu	04/07/13	Edifício que esteve em construção (anos 90) e demolido antes do fim.
2	Agregado reciclado não misturado	BPHR	Base do painel publicitário do Hotel Radisson	04/07/13	-
3	Agregado reciclado não misturado	PHR	Passeio próximo da entrada do Hotel Radisson	04/07/13	-
4	Agregado reciclado misturado	PPHM	Paragem Praça dos Heróis Moçambicanos	16/07/13	Pequeno edifício que era usado para fins comerciais demolido pelo CMCM
5	Agregado reciclado misturado	FACIM	Antiga FACIM	19/07/13	Conjunto de edifícios que serviam para exposições

Tabela 4 – Amostras naturais

Item	Tipo de amostra	Referência da amostra
1	Pedra	PN-riolito
2	Areia	AG
3	Cimento	CCM/32,5

5.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras compostas fisicamente por pedra, areia e cimento foram preparadas manualmente no LEM, depois foram britadas por uma britadeira eléctrica, seguido de processo de homogeneização e esquartelamento. Uma parte das amostras foi triturada manualmente num triturador e peneirada com peneiros de 150 e 300 micrómetros, 19mm, 25mm, 150mm e 300mm de diâmetro, conforme se indica nas figuras 4, 5 e 7.



Figura 4 - Preparação das amostras com britadeira eléctrica



Figura 5 - Preparação das amostras com triturador manual



Figura 6 - Peneiros usados na preparação das amostras para diferentes granulometrias



Figura 7 - Preparação das amostras em diferentes granulometrias

5.4 DETERMINAÇÃO POR MÉTODO DE FOTOMETRIA DE CHAMA

5.4.1 Determinação de álcalis (Na_2O e K_2O)

A determinação do sódio e do potássio foi feita por solubilização de 0,5g de amostra com 10ml de água destilada quente, seguido de 10ml de HCl conc, leva-se ao banho-maria por 30 minutos depois filtra-se para balão volumétrico de 100ml e lava-se o copo contendo o resíduo com água quente e prefaz-se o volume com água destilada. Deixa-se arrefecer a solução e faz-se a leitura na fotometria de chama.

5.5 DETERMINAÇÃO PELO MÉTODO VOLUMÉTRICO

5.5.1 Determinação do teor de cloretos solúveis em ácido

5g de amostra foram dissolvidos em água quente, adicionou-se HNO₃ diluído quente seguidos de solução de AgNO₃ 0,05 M, filtrou-se e arrefeceu-se. A seguir adicionou-se indicador o (NH₄)Fe(SO₄)₂.12H₂O e titulou-se com solução de tiocianato de amónio (fórmula 1, anexo3).

5.5.2 Determinação do teor de cloretos solúveis em água

Tomou-se 25 ml do extracto aquoso da amostra a analisar, adicionou-se cromato de potássio e titulou-se com AgNO₃ de concentração 0,01M (fórmula 1.1, anexo3).

j) Reacção do analito



k) Reacção de titulação



l) Reacção do indicador



5.6 DETERMINAÇÃO PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO

5.6.1 Determinação de teor de sulfatos solúveis em ácido

Dissolveu-se 2 g de amostra em água destilada fria, adicionou-se HCl diluído e aqueceu-se para decomposição da amostra, filtrou-se e adicionou-se solução de BaCl₂ para precipitar os sulfatos, calcinou-se à temperatura de 850°C. (fórmula 2, anexo3).

5.6.2 Determinação de teor de sulfatos solúveis em água

Tomou-se 50 ml do extracto aquoso da amostra de acordo com a norma NP EN 1744-1, diluiu-se com 250 ml de água destilada e acidificou-se com HCl, depois precipitou-se com BaCl₂. Filtrou-se e calcinou-se à temperatura de 850°C (fórmula 2.1, anexo3).

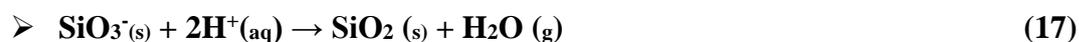


5.6.3 Determinação da Perda ao rubro

Colocou-se num cadinho de porcelana uma massa conhecida da amostra, calcinou-se numa mufla a 1000°C durante 30 minutos, depois retirou-se o cadinho contendo a amostra calcinada, arrefeceu-se num excicador até à temperatura constante e pesou-se, calculou-se a sua percentagem (fórmula 3, anexo3).

5.6.4 Determinação da reactividade potencial aos álcalis

25 g de amostra reagiram com solução de NaOH 1N a uma temperatura de 80°C durante 24 horas, seguidos de filtração para posterior determinação da redução de alcalinidade por titulação e da concentração de sílica pelo tratamento com ácido fluorídrico. (fórmulas 4 e 5, anexo3).



5.6.5 Determinação da resistência à acção de sulfato de sódio

Tomou-se uma porção de amostra retida nos peneiros de 25, 40 mm e 19,0 mm para determinados provetes e mergulhou-se na solução de sulfato de sódio à temperatura de 21 °C durante cinco ciclos completos de imersão e secagem. Efectuou-se uma observação macroscópica das amostras a fim de se verificar qualquer tipo de alteração. No fim dos cinco ciclos, secou-se as amostras na estufa a 105 °C (fórmulas 6 e 7, anexo3).



Figura 8 - Amostras após imersão em sulfato de sódio a 21°C durante 16 a 18 horas



Figura 9 - Amostras após secagem na estufa a 105°C durante 4 horas

6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apresenta-se, na tabela 5, os resultados da determinação dos teores de sulfatos e cloretos solúveis em ácido e solúveis em água, assim como os teores de álcalis e perda ao rubro.

As tabelas de réplicas dos ensaios constam dos anexos 2.

Tabela 5 - Teores de SO₃, Cl⁻, álcalis e PR

Amostras	Sulfatos (% SO ₃) (sol ácido)	Sulfatos (% SO ₃) (sol água)	Cloretos (% Cl ⁻) (sol ácido)	Cloretos (% Cl ⁻) (sol água)	Álcalis (% Na ₂ O)	P.R. (%)
PN	0,12	0,00	0,05	0,01	0,23	-
AG	0,05	-	0,00	-	0,21	-
HK	0,72	0,10	0,06	0,01	0,07	20,82
BPHR	0,62	0,00	0,04	0,01	0,04	19,29
PHR	0,73	0,02	0,19	0,01	0,05	22,20
PPHM	0,57	0,00	0,03	0,01	0,12	20,54
FACIM	0,61	0,02	0,04	0,01	0,05	17,72

sol ácido: Refere-se aos teores de trióxido de enxofre e de cloretos solúveis em ácido; e

sol água: Aos teores destes componentes solúveis em água

Os valores apresentados na tabela 5 representam a média de cinco réplicas dos parâmetros analisados em RDCC e agregados naturais, cujos valores de agregados são apresentados no Anexo 2 (Tabelas B-1 até B-6.1).

Os resultados da tabela 5 estão representados na forma de diagramas: figuras 10 a 12, 14.

Os teores de sulfatos, cloretos, e álcalis nas amostras em estudo, figuras 10 a 12, estão abaixo do limite especificado em agregados naturais, segundo o Regulamento de Betões para ligantes hidráulicos e valores apresentados no trabalho de Petrucci (1970). Estes resultados são satisfatórios para o uso no fabrico de betão.

Os teores de perda ao rubro, figura 13, são elevados. O termo perda ao rubro está associado à exposição prolongada do cimento ao ar livre, desta exposição resulta a carbonatação e

hidratação de MgO e CaO, provocando elevada porosidade do betão, baixa resistência e alta sensibilidade à acção de agentes químicos (Costa *et al.*, 2002).

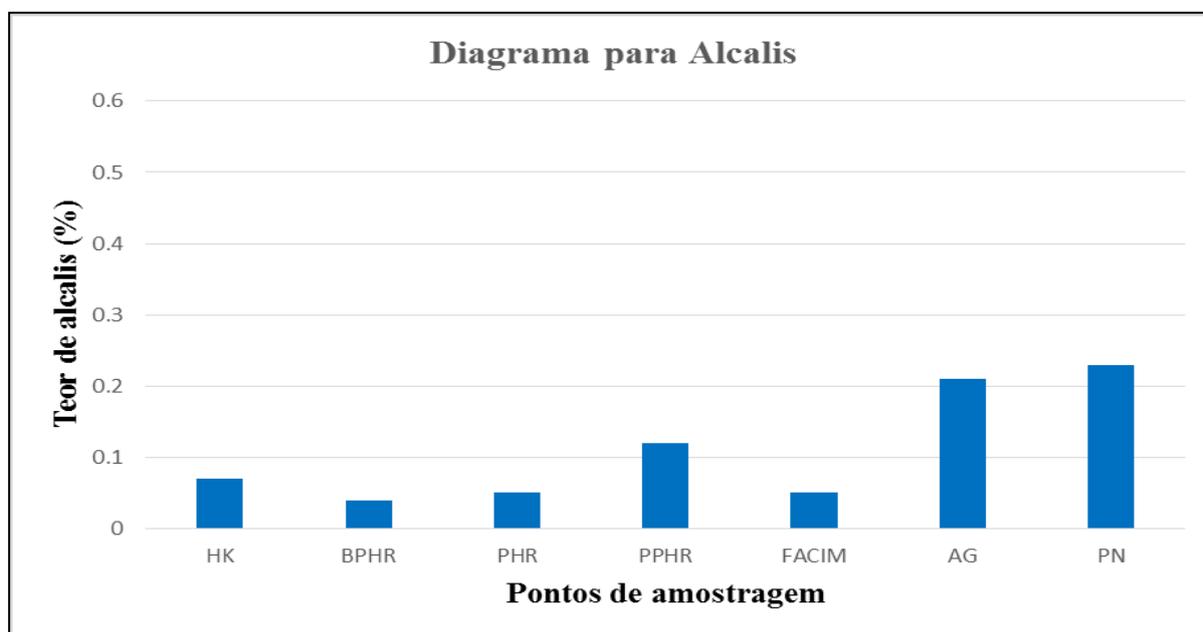


Figura 10 - Teor de álcalis nas diferentes amostras analisadas neste trabalho

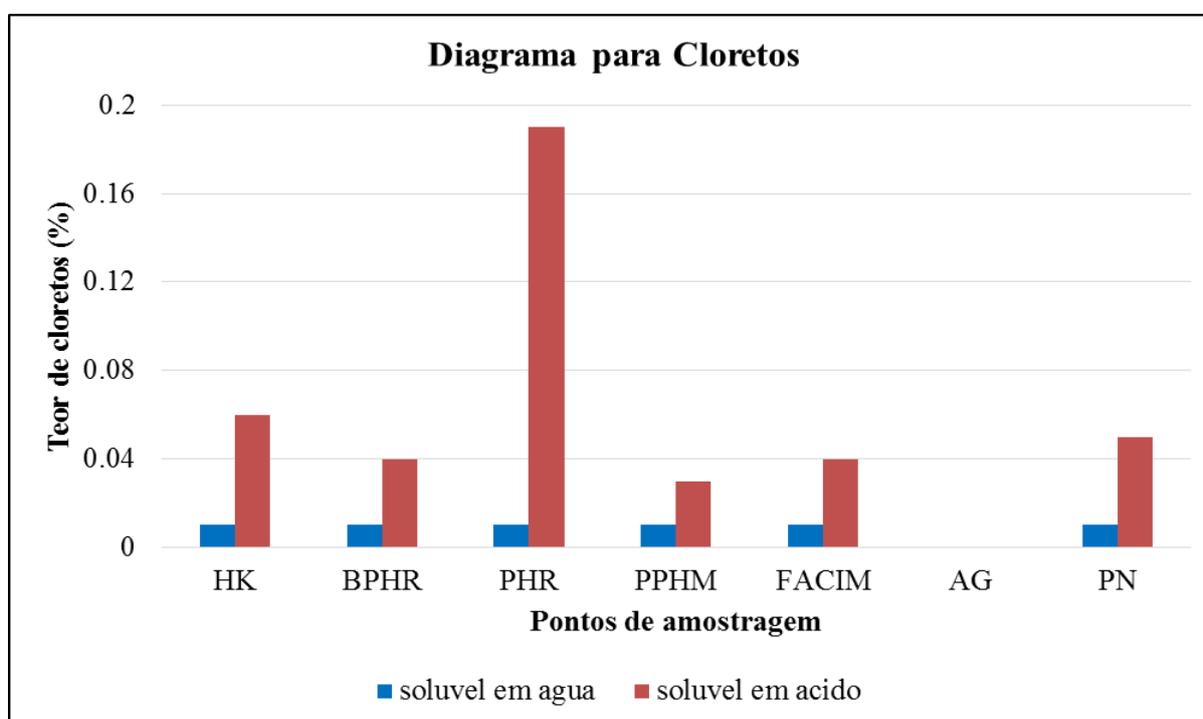


Figura 11 - Teor de cloretos solúveis em ácido e em água.

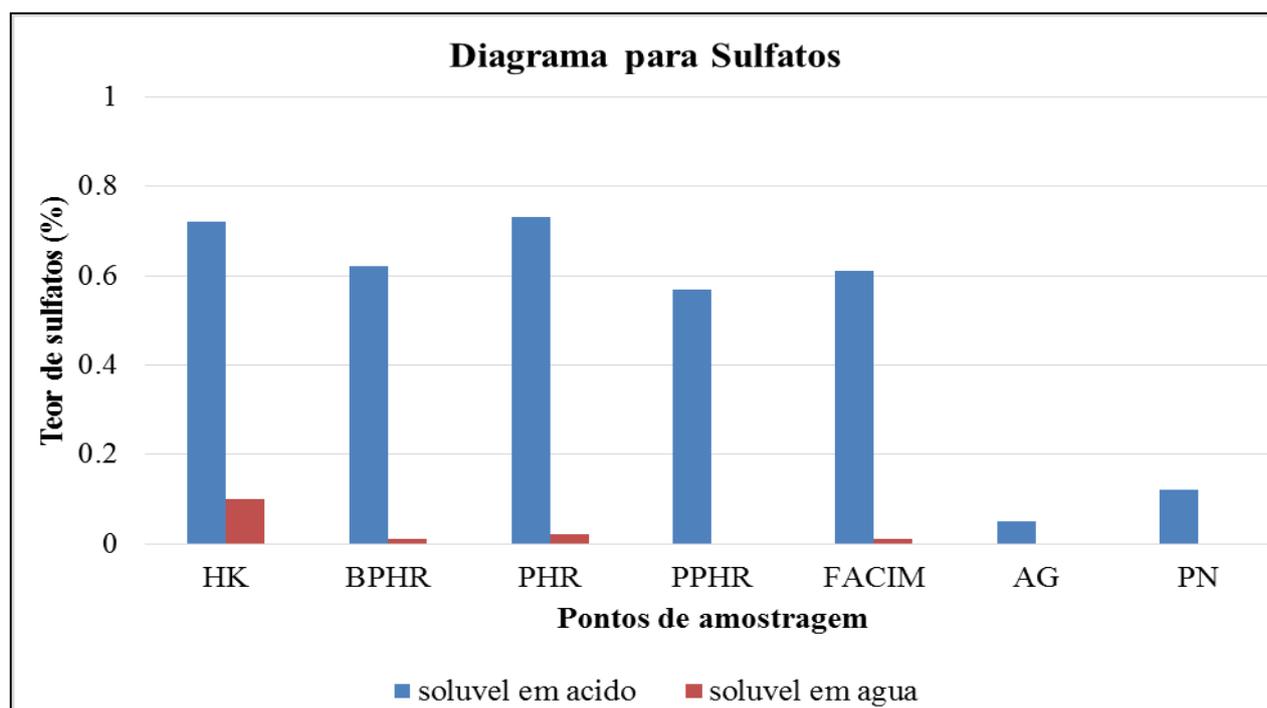


Figura 12 - Teores de sulfatos (expressidos na forma de SO_3) solúveis em ácido e em água.

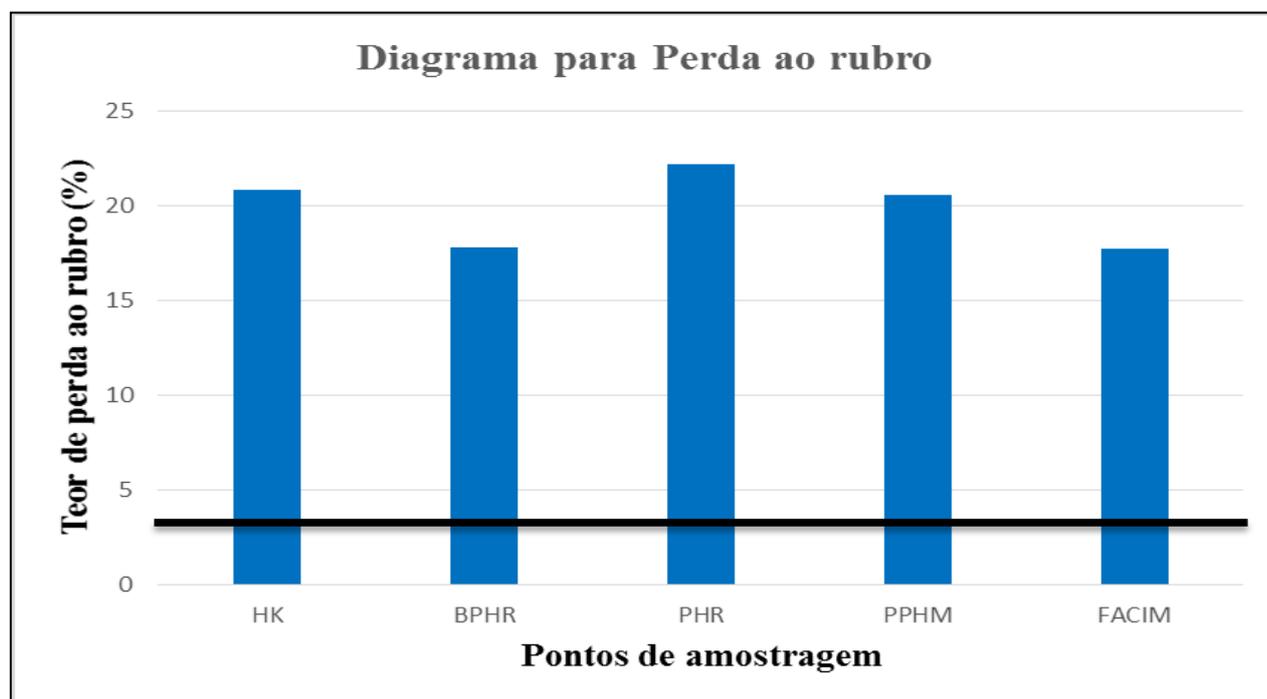


Figura 13 - Teor de perda ao rubro nas diferentes amostras analisadas, em comparação com o valor máximo admissível representado por linha contínua

Tabela 6 - Teores de SiO₂, redução de alcalinidade e classificação de agregados

Amostras	Redução de Alcalinidade (mmoles/l)	SiO₂ (%)	Obs.
PN	146,25	29,97	Agregado Não-Reactivo
AG	70,00	33,33	Agregado Não-Reactivo
HK	210,00	347,82	Agregado Reactivo
BPHR	205,42	421,09	Agregado Reactivo
PHR	122,33	302,10	Agregado Reactivo
PPHM	142,23	502,35	Agregado Reactivo
FACIM	150,00	587,56	Agregado Reactivo

A classificação dos agregados em reactivos e não reactivos é feita com base no diagrama da figura 14, que apresenta a redução da alcalinidade em função da concentração de sílica.

Todos os RDCC são agregados reactivos, comportamento que é característico de resíduos reciclados de construção civil. Estes resultados não são alarmantes devido ao baixo teor de álcalis que eles apresentam, admite-se como máximo 0,6% teor de álcalis para evitar reacções alcalinas que podem provocar a degradação do betão. Constituem excepção aqui as amostras naturais (PN e AG) que são agregados não reactivos, conforme mostra o gráfico da figura 13.

Para o efeito marcam-se no gráfico os pontos correspondentes a cada amostra a partir dos pares de valores “redução de alcalinidade - concentração de sílica”, para verificar o comportamento de cada uma das amostras: São reactivas as amostras que se situam à direita da linha contínua representada e são não-activas as amostras que se situam à esquerda da linha contínua que atravessa o diagrama.

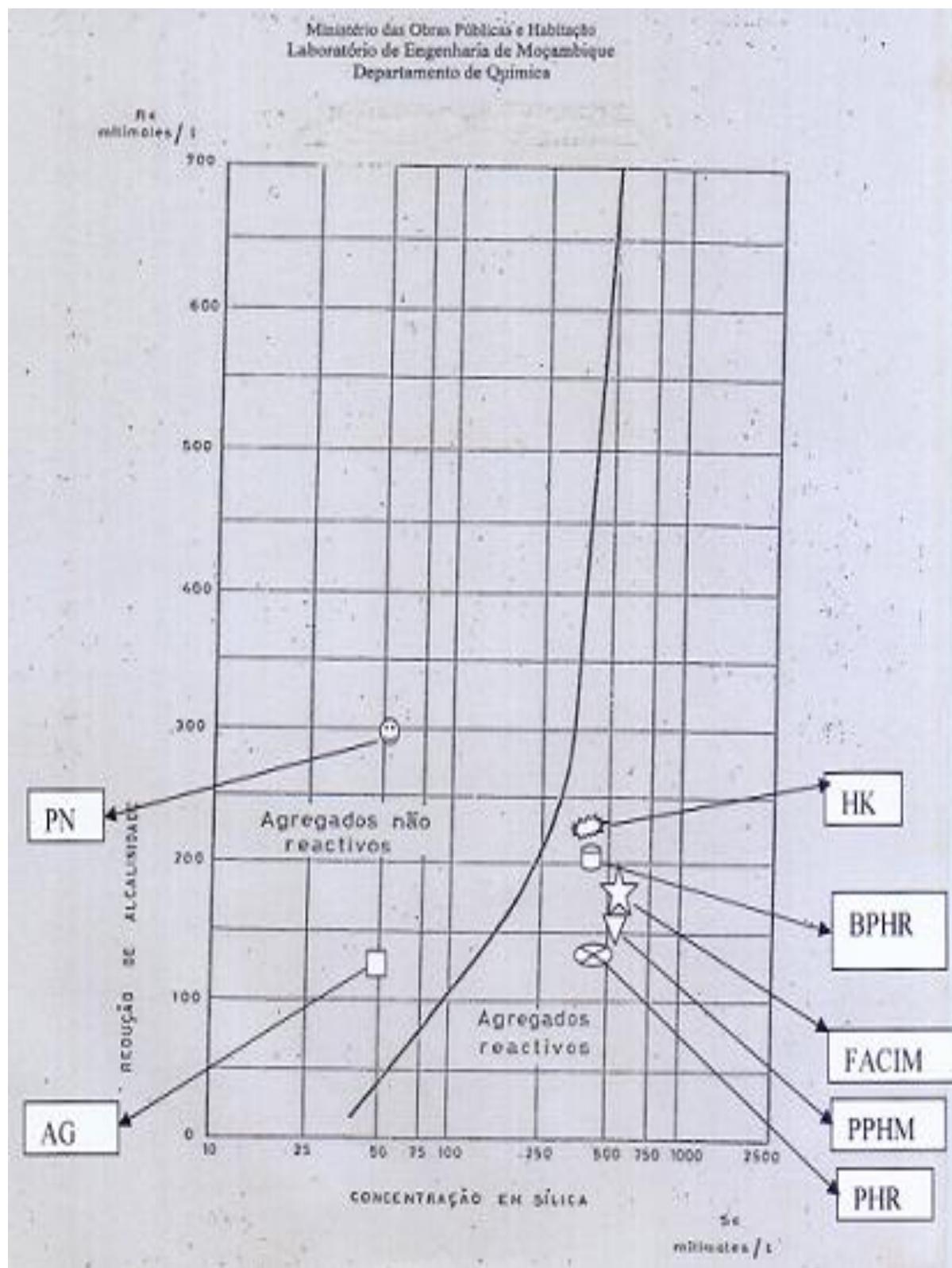


Figura 14 - Gráfico da representação de reactividade potencial aos álcalis que classifica os agregados em reactivos e não reactivos

Tabela 7 - Perda de massa por acção do sulfato de sódio

Amostras	Perda total de massa (%)	Observação macroscópica	Máx admissível (%)
P N	7,13	Fragmentação e esfarelamento	≤ 12
HK	58,85	Esfarelamento	≤ 12
BPHR	39,52	Esfarelamento	≤ 12
PHR	9,04	Esfarelamento	≤ 12
PPHM	13,11	Esfarelamento	≤ 12
FACIM	44,95	Esfarelamento	≤ 12

A tabela 7 mostra os resultados da perda total de massa (por acção do sulfato de sódio) das diferentes amostras, cujos resultados são apresentados na forma gráfica na figura 15. Os resultados de agregados podem ser vistos no Anexo 2 (tabelas B-8, B-10, B-12, B-14, B-16 e B-18).

O ensaio de resistência à acção de sulfato de sódio, apresenta resultados quantitativos com perda total de massa acima do valor máximo recomendado em agregados naturais, conforme ilustra a figura 15. Aspecto que influencia negativamente a resistência mecânica do betão. Apenas as amostras PHR e PN apresentam resultados dentro do limite estabelecido em agregados naturais, que é de $\leq 12\%$. Quanto aos resultados qualitativos, os RDCC sofreram alterações significativas pela acção do sulfato de sódio em cinco ciclos de imersão, amostra PN sofreu pequenas alterações.

As amostras que apresentam resultados acima do valor recomendado no ensaio de alteração pelo sulfato de sódio são confinadas a betão sem grandes exigências, como betão de enchimento ou regularização sem qualquer função estrutural e em ambientes não agressivos.

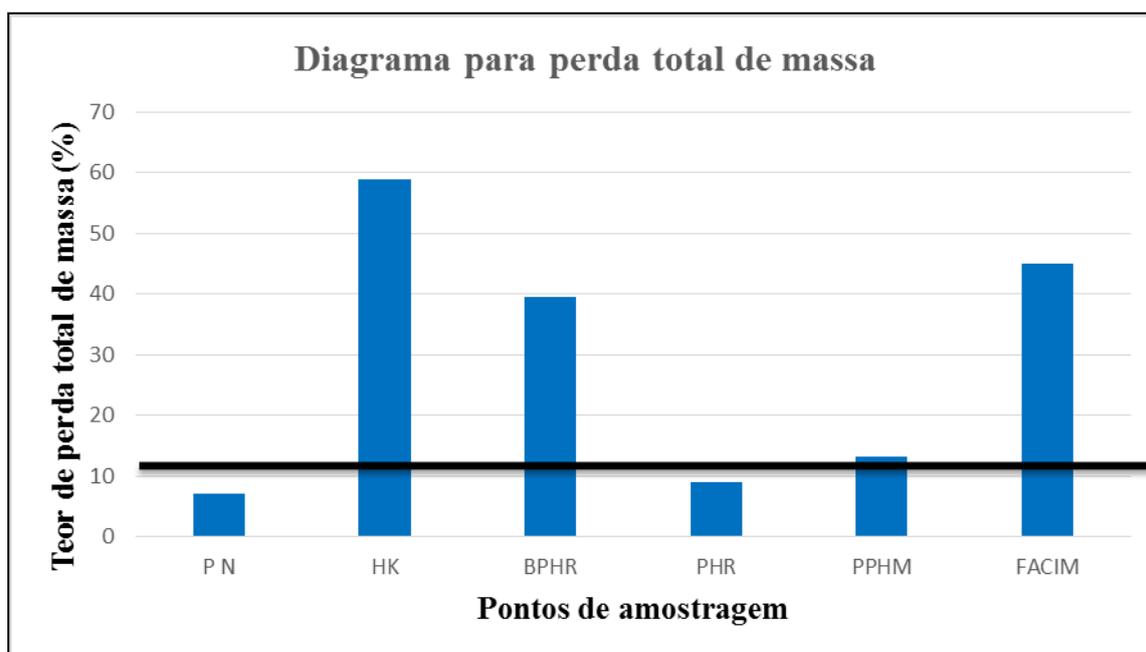


Figura 15 - Teor de Perda de massa dos agregados nas diferentes amostras analisadas em comparação com o valor máximo admissível representado por linha contínua.

7 CONCLUSÕES

O elevado número de ocorrências de estruturas afectadas pelas reacções expansivas internas em várias obras de construção civil torna pertinente o cuidado redobrado com a composição do betão, como: teor de sílica em agregado, teor de sulfatos, cloretos e álcalis em cimento para a não degradação do betão.

Contudo, torna-se evidente a necessidade de realizar estudo dos RDCC noutras propriedades e características do betão ligadas ao risco de ocorrência de degradação em função da condição de exposição e do tipo de estrutura, visto que o betão tem várias aplicações. Do mesmo modo, o controlo e garantia da qualidade deve ser exercido sobre todos parâmetros.

Na determinação da reactividade potencial aos álcalis obteve-se como resultado agregado reactivo, para todas amostras de RDCC, que é característica de resíduos de construção e demolição segundo a Especificação LNEC 471 (2006). Para as amostras reactivas, antes da sua incorporação noutros constituintes ou substituição do agregado natural pelo RDCC, deve-se fazer um estudo e controlo do teor de álcalis em cada componente de modo que não exceda o máximo admissível 0,6% no conjunto de agregados para evitar reacções expansivas no interior do betão.

Quanto a resistência à acção de sulfato de sódio, as amostras em estudo apresentam resultados de perda total de massa acima do valor recomendado em agregados naturais que é de $\leq 12,00\%$, segundo a norma ASTM C88-76. Excepto a amostra de PHR, que teve como resultado perda total de massa de 9,04%. Provavelmente estes valores estão associados ao tipo e características de cada agregado que compõe o RDCC.

Os valores obtidos do teor de sulfatos, cloretos e álcalis encontram-se abaixo do limite recomendado no conjunto de agregados.

Com base na revisão bibliográfica e nos resultados obtidos experimentalmente nas amostras de RDCC, conclui-se primeiramente que:

As amostras estudadas reúnem condições para serem utilizadas na construção civil dependendo do fim a que se pretende aplicar e do local, respeitando as proporções exigidas para cada classe de RDCC no conjunto de agregados.

8 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que em estudos futuros se faça o ensaio de lixiviação nos resíduos de construção e demolição para melhor avaliação do impacto ambiental na utilização dos mesmos.

Seria útil e elucidativo realizar ensaios tecnológicos com as amostras onde se incorporam os agregados reciclados, como forma de avaliar o seu efeito nas propriedades tecnológicas do material, parâmetros mais decisivos na determinação da potencial utilização de um dado agregado. Estes ensaios deveriam ser extensivos aos materiais com alguns parâmetros fora dos limites permitidos, como forma de se aferir até que ponto os parâmetros “anormais” afectam as propriedades tecnológicas do material.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexeév, V. (2000). *Análise quantitativa*, 4ª edição, Editora Lopes da Silva, pp.59,60,122,201.

ASTM C114 – American Society for testing and materials. (1976). *Concrete and mineral aggregates* (including manual of concrete testing).

ASTM C289 – American Society for testing and materials. (1976). *Concrete and mineral aggregates* (including manual of concrete testing).

ASTM C88 – American Society for testing and materials. (1976). *Concrete and mineral aggregates* (including manual of concrete testing).

Boletim da República, *III série, nº. 38*. (2009). Assembleia Municipal da Cidade de Maputo, República de Moçambique.

Caux, A. C. P. S.; Nascimento, F. G.; Silveira, M. F. e Sobrinho, P. J. N. (2011). *Análise do silício metálico em escória por deslocamento de coluna de mercúrio*.

Chanakian¹, F. C. e Filho², A. F. S. (2009). *Reciclagem dos resíduos da construção civil*.

Costa, António e Appleton, Júlio. (2002). *Folhas de apoio à cadeira de estruturas de betão I - parte II – materiais*. Instituto Superior Técnico. Lisboa. pp. 2 a 5.

Coutinho, A.S. (1988). *Fabrico e propriedades do betão*; Vol. 1 – Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Coutinho, J. S. (2002). *Ciências de Materiais – 1ª parte*, documento provisório.

Coutinho, J. S. (2002) atualização (2006). *Materiais de Construção 2, 1ª parte – ligantes e caldas*. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Coutinho, J. S. (2001). *Durabilidade, Ataque por sulfatos*, FEUP.

Diário do Governo, *I Série*, nº 225. (1971). Regulamento de Betões de ligantes Hidráulicos.

Diário da República, *I Série*, nº 299. (1989). Regulamento de Betões de ligantes Hidráulicos.

Especificação LNEC E 471. (2006). *Guia para utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos.*

Ferreira, D.D.M.; Noschang, C.R.T. e Ferreira, L. F. (2009). *Gestão de resíduos da construção civil e de demolição: contribuições para a sustentabilidade ambiental.*

Ferreira, F. L. C. (UFSC 1). V Congresso Nacional de Excelência em Gestão. (2009). *Gestão de resíduos da construção civil e de demolição: Contribuições para a sustentabilidade ambiental.*

Gradin¹, A. M. N. e Costa², P. S. N. (Sem ano). Reciclagem dos resíduos sólidos da construção civil.

Mabui, M. E. (2015). *Utilização de agregados grossos reciclados em Betões com ligantes hidráulicos*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências, Departamento de Química, UEM,

Manjate, R.S. (2004). *Incorporação de resíduos derivados do corte e polimento de rochas naturais em pastas cerâmicas*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia cerâmica e do vidro, Portugal.

NBR 10004, 2ª edição. (2004). *Classificação de resíduos sólidos.*

Norma Portuguesa 2106. (1984). *Inertes para argamassas e betões. Determinação do teor de sulfatos.*

Norma Portuguesa EN 1744-1. (2000). *Ensaios para determinação das propriedades químicas dos agregados - Parte 1: Análise química.*

Norma Portuguesa EN 196-21. (1990). *Determinação de teor de cloretos*

Pereira, E.; Medeiros, M. H. F. e Levy, S. M. (2012). *Durabilidade de concretos com agregados reciclados: uma aplicação de análise hierárquica*. Ambiente Construído 1678-8621.12.

Prando, L. P. e Halasz, M. R. T. Enciclopédia Biosfera. (2013). *Análises de parâmetros físico-químico de cimento com incorporação de resíduos de rochas ornamentais*.

Pessoa, João. (2008). *Análise química instrumental*. Centro de ciências exactas e da natureza, Departamento de Química, Universidade Federal da Paraíba.

Petrucci, E. Enciclopédia Técnica Universal. (1970). *Concreto de Cimento Portland*, 2ª edição, Editora Globo.

Relatório do Estado do Ambiente em Moçambique, Aprovada na 18ª sessão do Conselho de Ministros. (2011).

Romano, P. e Brito, P. S. D. (2009). *Estudo da degradação de Estruturas de betão armado expostas ao ataque por sulfatos*.

Salta, M. M.; Reis, M. O. B. e Silva, A. M. S. (2000). Manual do Laboratório de Engenharia de Moçambique, *Inspeção e reparação de estruturas de betão armado com corrosão*.

Salta, M. M. S. R. L. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1987). *Corrosão do aço no betão*, Vol. 1.

Ulsen, C.; Kahn, H.; Sérgio C.; Angulo, S.C. e Vanderley M. J. (2010). *Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição*.

Werle, A. P.; Kazmierczak, C. S. e Kulakowski, M. P. (2011). *Ambient. constr.*

ANEXOS

Anexo 1 - Preparação das soluções operacionais

BaCl₂ 100g/l

Pesou-se aproximadamente 100g de BaCl₂.2H₂O, dissolveu-se em água destilada e completou-se para volume de 1 litro ASTM (1977) e COSTA (1987).

NH₄Cl 20g/l

Dissolveu-se cerca de 20g de cloreto de amónio em 1 litro de água destilada Norma Portuguesa – 955. (1973).

NH₄OH 1:1

Mediu-se 500ml de água destilada e adicionou-se 500ml de hidróxido de amónio concentrado. Para uma solução de 1 litro ASTM. (1978).

NaOH 10g/l

Pesou-se 10g de hidróxido de sódio em água destilada e fez-se o volume de 1 litro ASTM (1977).

Indicador vermelho de metilo

Dissolveu-se 2g de vermelho de metilo em 1 litro de etanol COSTA (1987).

Indicador fenolftaleína

Dissolveu-se 1g de fenolftaleína em 100ml de álcool etílico 95% ASTM (1976).

H₂SO₄ 1:1

Mediu-se 200ml de água destilada e adicionou-se 200ml de ácido sulfúrico concentrado. Para uma solução de 1 litro ASTM (1976).

HCl 1:99

Mediu-se 990ml de destilada e adicionou-se 10ml de ácido clorídrico concentrado. Para uma solução de 1 litro COSTA (1987).

HCl 1:2

Preparou-se 1 litro de solução medindo cerca de 333,33ml de água destilada e adicionou-se 666,66ml de ácido clorídrico concentrado COSTA (1987).

NaOH 1N

Pesou-se cerca de 42g mais 4 pastilhas de hidróxido de sódio, dissolveu-se em água recentemente fervida completando depois de arrefecido o volume de 1 litro ASTM (1976).

HCl 1N

Mediu-se 98,33ml de ácido clorídrico concentrado para um balão volumétrico de 1 litro e completou-se o volume com água destilada ASTM (1976).

HCl 0,05N

Mediu-se 50ml de solução HCl 1N para balão volumétrico de 1 litro e perpez-se o volume com água destilada ASTM (1976).

(NH₄)₂HPO₄ 100g/l

Pesou-se 100g de fosfato monoácido de amónio e dissolveu-se 1 litro de água destilada ASTM (1976).

(NH₄)₂C₂O₄ 50g/l

Pesou-se 50g de oxalato de amónio e dissolveu-se em 1 litro de água destilada ASTM (1976).

KMnO₄ 0,18N

Dissolveu-se cerca de 5,64g de permanganato de potássio em 1 litro de água, deixou-se repousar por cerca de uma semana, filtrou-se com lã de vidro e titulou-se a parte límpida com 0,7500g de oxalato de sódio ASTM (1976) e COSTA (1987).

AgNO₃ 0,01M

Pesou-se cerca de 1,699g de nitrato de prata seco na estufa à temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ durante pelo menos uma hora, dissolveu-se em 1 litro de água destilada e conservou-se num frasco escuro COSTA (1987).

K₂CrO₄ 10g/100ml

Pesou-se 10g de cromato de potássio e dissolveu-se em 100ml de água destilada ASTM (1977).

HNO₃ 1:100

Mediu-se 9,90ml de água destilada e adicionou-se 990,09ml de ácido nítrico concentrado para um volume total de 1 litro COSTA (1987).

Anexo 2 - Tabelas de resultados das análises e tratamento estatístico

Tabela B - 1: Teores de sulfatos solúveis em ácido (%SO₃)

Amostras	Réplicas					\bar{X}	S	%RSD	IC
HK	0,7014	0,7443	0,6808	0,7405	0,7399	0,72	0,0286	3,9650	0,72 ± 0,01
BPHR	0,7082*	0,6345	0,6139	0,6223	0,7013*	0,62	0,0103	1,6519	0,62 ± 0,01
PHR	0,7391	0,7353	0,6791*	0,7321	0,7300	0,73	0,0039	0,5312	0,73 ± 0,00
PPHM	0,5779	0,5470	0,5916	0,5480	0,5672	0,57	0,0192	3,3900	0,57 ± 0,01
FACIM	0,5965	0,6119	0,6788*	0,6002	0,6123	0,61	0,0080	1,3218	0,61 ± 0,00
AG	0,0611	0,0432	0,0402	0,0405	0,0500	0,05	0,0088	17,600	0,05 ± 0,00
PN	0,1102	0,1700*	0,1201	0,1209	-	0,12	0,0059	4,9165	0,12 ± 0,00

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valores rejeitados pelo teste Q

Tabela B – 1.1: Teores de Sulfatos solúveis em água (%SO₃)

Amostras	Réplicas					\bar{X}	S	%RSD	IC
HK	0,0960	0,0960	0,0950	0,0903*	0,0951	0,10	0,0005	0,5235	0,10 ± 0,00
BPHR	0,0050	0,0045*	0,0051	0,0050	0,0050	0,01	0,0000	0,0000	0,01 ± 0,00
PHR	0,0140	0,0145	0,0170	0,0179	0,0177	0,02	0,0018	11,1111	0,02 ± 0,00
PPHM	0,0020*	0,0030	0,0033	0,0033	0,0031	0,00	0,0001	3,1250	0,00 ± 0,00
FACIM	0,0065	0,0060	0,0066	0,0065	0,0063	0,01	0,0002	0,1250	0,01 ± 0,00
AG	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN	0,0030	0,0023	0,0019	0,0020	0,0009	0,00	0,0007	35,0000	0,00 ± 0,00

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valores rejeitados pelo teste Q

Tabela B - 2: Teores de Cloretos solúveis em ácido (% Cl⁻)

Amostras	Réplicas					\bar{X}	S	%RSD	IC
HK	0,0530	0,0560	0,0700	0,0670	0,0670	0,06	0,0228	36,4217	0,06 ± 0,01
BPHR	0,0420	0,0420	0,0420	0,0350*	0,0420	0,04	0,0000	0,0000	0,04 ± 0,00
PHR	0,1870	0,1870	0,1840*	0,1870	0,1870	0,19	0,0000	0,0000	0,19 ± 0,00
PPHM	0,0310	0,0310	0,0280*	0,0310	0,0310	0,03	0,0000	0,0000	0,03 ± 0,00
FACIM	0,0350	0,0350	0,0350	0,0350	0,039*	0,04	0,0000	0,0000	0,04 ± 0,00
AG	0,0000	0,0000	0,0100*	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,00 ± 0,00
PN	0,0000	0,0100	0,0000	0,0100	-	0,05	0,0565	113,00	0,05 ± 0,02

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valores rejeitados pelo teste Q

Tabela B – 2.1: Teores de Cloretos solúveis em água (% Cl⁻)

Amostras	Réplicas					\bar{X}	S	%RSD	IC
HK	0,0062	0,0062	0,0065	0,0065	0,0065	0,01	0,0001	1,5625	0,01 ± 0,00
BPHR	0,0090	0,0099	0,0093	0,0093	0,0096	0,01	0,0003	3,1914	0,01 ± 0,00
PHR	0,0065	0,0065	0,0065	0,0066	0,0066	0,01	0,0000	0,0000	0,01 ± 0,00
PPHM	0,0070	0,0060*	0,0074	0,0069	0,0070	0,01	0,0002	2,8169	0,01 ± 0,00
FACIM	0,0068	0,0065*	0,0065*	0,0068	0,0068	0,01	0,0000	0,0000	0,01 ± 0,00
AG	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN	0,0080	0,0090	0,0085	0,0084	0,0085	0,0085	0,0003	2,9411	0,01 ± 0,00

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valores rejeitados pelo teste Q

Tabela B - 3: Teores de óxido de sódio (% Na₂O)

Amostras	Réplicas					\bar{X}	S	%RSD	IC
HK	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,00 ± 0,00
BPHR	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,00 ± 0,00
PHR	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,00 ± 0,00
PPHM	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,00 ± 0,00
FACIM	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000	0,00 ± 0,00
AG	0,1600	0,1600	0,1600	0,1700*	0,1600	0,16	0,0000	0,0000	0,16 ± 0,00
PN	0,1700	0,1700	0,1680*	0,1590*	0,1710	0,17	0,0005	0,3398	0,17 ± 0,00

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valores rejeitados pelo teste Q

Tabela B - 4: Teores de óxido de potássio (% K₂O)

Amostras	Réplicas					\bar{X}	S	%RSD	IC
HK	0,1000	0,1100*	0,1000	0,1000	0,1000	0,10	0,0000	0,0000	0,10 ± 0,00
BPHR	0,0600	0,0600	0,0600	0,0500*	0,0600	0,06	0,0000	0,0000	0,06 ± 0,00
PHR	0,0800	0,0900*	0,0800	0,0800	0,0800	0,08	0,0000	0,0000	0,08 ± 0,00
PPHM	0,1800	0,1700*	0,1800	0,1800	0,1800	0,18	0,0000	0,0000	0,18 ± 0,00
FACIM	0,0700	0,0700	0,0700	0,0700	0,0800*	0,07	0,0000	0,0000	0,07 ± 0,00
AG	0,0700	0,0700	0,0800*	0,0700	0,0800*	0,07	0,0000	0,0000	0,07 ± 0,00
PN	0,0900	0,0900	0,0900	0,0800*	0,0900	0,09	0,0000	0,0000	0,09 ± 0,00

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valores rejeitados pelo teste Q.

Tabela B - 5: Teores de perda ao rubro (% de humidade)

Amostras	Réplicas					\bar{X}	S	%RSD	IC
HK	20,3896*	20,8112	20,8120	20,8200	20,8175	20,82	0,0042	0,0201	20,82±0,00
BPHR	18,7612*	17,9200	17,7623	17,7601	17,7700	17,80	0,0780	0,4381	17,80±0,00
PHR	22,1900	22,4500*	22,2105	22,2072	22,2049	22,20	0,0090	0,0405	22,20±0,00
PPHM	20,5400	20,1200*	20,5409	20,5398	20,5442	20,54	0,0020	0,0112	20,54±0,00
FACIM	17,7140	17,7930*	17,7202	17,7182	17,7199	17,72	0,0028	0,0158	17,72±0,00
AG	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valores rejeitados pelo teste Q.

Tabela B - 6: Teores de redução de alcalinidade (milimoles/dm³).

Amostras	Réplicas			\bar{X}	S	%RSC	IC
HK	210,00	210,00	210,00	210,00	0,0000	0,0000	0,00 ± 0,00
BPHR	205,42	205,42	205,43	205,42	0,0057	0,0027	205,42 ± 0,00
PHR	122,33	122,31	122,33	122,32	0,0115	0,0094	122,32 ± 0,02
PPHM	142,23	142,23	142,22	142,23	0,0057	0,0040	142,22 ± 0,00
FACIM	150,00	150,00	145,00*	150,00	0,0000	0,0000	150,00 ± 0,00
AG	70,00	70,00	60,00*	70,00	0,0000	0,0000	70,00 ± 0,00
PN	75,00*	142,00	142,00	142,00	0,0000	0,0000	142,00 ± 0,00

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valores rejeitados pelo teste Q.

Tabela B – 6.1: Teores de concentração em sílica (milimoles/dm³)

Amostras	Réplicas			\bar{X}	S	%RSD	IC
HK	347,82	347,78	347,85	347,82	0,0351	0,0100	347,82 ± 0,02
BPHR	421,09	421,10	421,13	421,11	0,0208	0,0049	421,11 ± 0,01
PHR	302,10	302,11	302,10	302,10	0,0057	0,0018	302,10 ± 0,00
PPHM	502,35	502,33	502,35	502,34	0,0115	0,0022	502,34 ± 0,01
FACIM	587,56	587,57	587,50	587,54	0,0378	0,0064	587,54 ± 0,02
AG	33,33	33,33	35,69*	33,33	0,0000	0,0000	33,33 ± 0,00
PN	29,97	29,97	29,97	29,97	0,0000	0,0000	29,97 ± 0,00

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valor rejeitado pelo teste Q.

Tabela B - 7: Resultados da análise do cimento

Parâmetros	Réplicas					\bar{X}	S	%RSD	IC
RI	2,0501	1,9811	1,9322	2,1011	1,9706	2,01	0,0676	3,3631	2,01 ± 0,02
SO ₃	1,9321	1,9236	1,6109*	1,9420	1,9802	1,94	0,0249	1,2835	1,94 ± 0,01
Cl ⁻	0,0400*	0,0302	0,0302	0,0303	0,0409*	0,03	0,0000	0,0000	0,03 ± 0,00
Na ₂ O	0,0200	0,0200	0,0300	0,0300	0,0300	0,03	0,0020	7,6923	0,03 ± 0,00
K ₂ O	0,2100	0,2400	0,2400	0,2400	0,2400	0,23	0,0030	1,2820	0,23 ± 0,00
PR	11,4702	12,0422*	11,3845	11,4021	10,4505	11,43	0,4856	4,2484	11,43 ± 0,18
SiO ₂	18,1332	18,0032*	18,1425	18,1214	18,1509	18,14	0,0126	0,0694	18,14 ± 0,00
Fe ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	59,4000	59,8625*	60,1436*	59,4554	60,8645*	59,43	0,0391	0,0659	59,43 ± 0,01
MgO	1,7222	1,6998	1,6923	1,7320	1,7333	1,72	0,0188	1,0956	1,72 ± 0,01

\bar{X} – média das réplicas de cada amostra; S – desvio padrão das amostras; %RSD – percentagem do desvio padrão relativo; IC – intervalo de confiança; (*) – valores rejeitados pelo teste Q.

Tabela B – 8: Resultados quantitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra BPHR.

Composição granulométrica dos provetes		Massa inicial (gr)	Massa final (gr)	Perda de massa (gr)	Perda de massa de cada provete (%)	Perda de massa de cada agregado (%)
Malha (mm)	(% retida)					
25,4 / 19,0	66,01	1017,60	606,79	410,81	40,37	26,65
19,0 / 12,7	33,99	523,98	325,60	198,38	37,86	12,87
Total	100,00	Perda total de massa				39,52

Tabela B-9: Resultados qualitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra BPHR.

Composição granulométrica dos provetes	Número inicial de partículas	Número de partículas que sofreram alteração				
		Fissuração	Esfoliação	Fragmentação	Esfarelamento	Total
25,4 / 19,0	23	0	2	3	9	14
19,0 / 12,7	38	0	0	2	8	10

Tabela B – 10: Resultados quantitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra PHR.

Composição granulométrica dos provetes		Massa inicial (gr)	Massa final (gr)	Perda de massa (gr)	Perda de massa de cada provete (%)	Perda de massa de cada agregado (%)
Malha (mm)	(% retida)					
25,4 / 19,0	66,37	1015,18	948,96	66,22	6,52	4,33
19,0 / 12,7	33,63	514,30	442,26	72,04	14,01	4,71
Total	100,00	Perda total de massa				9,04

Tabela B-11: Resultados qualitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra PHR.

Composição granulométrica dos provetes	Número inicial de partículas	Número de partículas que sofreram alteração				
		Fissuração	Esfoliação	Fragmentação	Esfarelamento	Total
Malha (mm)						
25,4 / 19,0	24	0	0	2	17	19
19,0 / 12,7	32	0	0	0	10	10

Tabela B – 12: Resultados quantitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra HK.

Composição granulométrica dos provetes		Massa inicial (gr)	Massa final (gr)	Perda de massa (gr)	Perda de massa de cada provete (%)	Perda de massa de cada agregado (%)
Malha (mm)	(% retida)					
25,4 / 19,0	66,38	1005,97	371,61	634,36	63,06	41,86
19,0 / 12,7	33,62	509,42	252,01	257,41	50,53	16,99
Total	100,00	Perda total de massa				58,85

Tabela B -13: Resultados qualitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra HK.

Composição granulométrica dos provetes	Número inicial de partículas	Número de partículas que sofreram alteração				
		Fissuração	Esfoliação	Fragmentação	Esfarelamento	Total
Malha (mm)						
25,4 / 19,0	37	5	0	0	9	14
19,0 / 12,7	38	4	0	0	12	16

Tabela B – 14: Resultados quantitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra FACIM.

Composição granulométrica dos provetes		Massa inicial (gr)	Massa final (gr)	Perda de massa (gr)	Perda de massa de cada provete (%)	Perda de massa de cada agregado (%)
Malha (mm)	(% retida)					
25,4 / 19,0	66,30	1026,34	565,43	460,91	44,91	29,77
19,0 / 12,7	33,70	521,71	286,79	234,92	45,03	15,18
Total	100,00	Perda total de massa				44,95

Tabela B – 15: Resultados qualitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra FACIM.

Composição granulométrica dos provetes	Número inicial de partículas	Número de partículas que sofreram alteração				
		Fissuração	Esfoliação	Fragmentação	Esfarelamento	Total
25,4 / 19,0	32	0	0	12	10	22
19,0 / 12,7	33	0	0	9	11	20

Tabela B – 16: Resultados quantitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra PPHM.

Composição granulométrica dos provetes		Massa inicial (gr)	Massa final (gr)	Perda de massa (gr)	Perda de massa de cada provete (%)	Perda de massa de cada agregado (%)
Malha (mm)	(% retida)					
25,4 / 19,0	66,11	1030,32	874,94	155,38	15,08	9,97
19,0 / 12,7	33,62	528,02	47,86	57,16	10,82	3,64
Total	99,73	Perda total de massa				13,11

Tabela B – 17: Resultados qualitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra PPHM.

Composição granulométrica dos provetes	Número inicial de partículas	Número de partículas que sofreram alteração				
		Fissuração	Esfoliação	Fragmentação	Esfarelamento	Total
25,4 / 19,0	31	0	0	10	10	20
19,0 / 12,7	38	0	0	10	15	25

Tabela B – 18: Resultados quantitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra PN-riolito.

Composição granulométrica dos provetes		Massa inicial (gr)	Massa final (gr)	Perda de massa (gr)	Perda de massa de cada provete (%)	Perda de massa de cada agregado (%)
Malha (mm)	(% retida)					
25,4 / 19,0	43,96	523,16	475,18	47,98	9,17	4,03
19,0 / 12,7	56,03	666,81	629,94	36,87	5,53	3,09
Total	98,99	Perda total de massa				7,13

Tabela B – 19: Resultados qualitativos em cinco (5) ciclos de imersão: Amostra PN-riolito.

Composição granulométrica dos provetes	Número inicial de partículas	Número de partículas que sofreram alteração				
		Fissuração	Esfoliação	Fragmentação	Esfarelamento	Total
Malha (mm)						
25,4 / 19,0	41	0	0	10	10	36
19,0 / 12,7	138	0	0	10	15	131

Anexo 3 - Fórmulas usadas

1 - Determinação de cloretos solúveis em ácido

$$\frac{V_{eb} - V_A}{m_a} \times 0,1773 \quad (1)$$

Onde:

V_{eb} – volume gasto no ensaio em branco

V_A – volume gasto na determinação

m_a – massa da amostra pesada para análise

0,1773 – factor de correcção

2 - Determinação de cloretos solúveis em água

$$\frac{W}{V_g} \times 0,03545 \quad (1.1)$$

Onde:

W – relação água/agregado

V_g – volume gasto na titulação

0,01 e 0,03545 – factores de correcção

3 - Determinação de sulfatos solúveis em ácido

$$\frac{m_r}{m_a} \times 34,3 \quad (2)$$

Onde:

m_r – massa do resíduo após a calcinação

m_a – massa da amostra

34,3 – Factor de correcção de SO₃/ BaSO₄

4 - Determinação de sulfatos solúveis em água

$$\%S_{s} = \frac{W}{m_r} \times 0,343 \times 2 \quad (2.1)$$

Onde:

W – relação água/agregado

m_r – massa do resíduo calcinado

0,343 – factor de correcção

2 – constante

5 – Determinação da perda ao rubro

$$\%P.R = \frac{P_1 - P_2}{m_a} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

P.R – Perda ao rubro

P₁ – peso inicial do cadinho com amostra

P₂ – peso final do cadinho com amostra calcinada

m_a – massa da amostra

6 - Determinação de redução da alcalinidade

$$\%R.A = \frac{V_{eb} - V_g}{20} \times f \times 1000 \quad (4)$$

Onde:

V_{eb} – Volume gasto no ensaio em branco

V_g – Volume gasto na amostra

f – factor de normalidade do ácido clorídrico usado para titulação (0,05)

20 – Volume pipetado da amostra a analisar

20 – constante

1000 – factor de redução

7 - Determinação da concentração de sílica

$$S_i = \frac{(m_{r1} - m_{r2})}{m_{eb}} \times 3330 \quad (5)$$

Onde:

m_{r1} – massa do resíduo após a primeira calcinação

m_{r2} – massa do resíduo após a segunda calcinação

m_{eb} – massa do ensaio em branco

3330 – factor de correção

8 - Determinação de resistência à acção pelo sulfato de sódio

$$P = \frac{(m_i - m_f)}{m_f} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

p_i – perda de massa de cada provete

m_i – massa inicial da amostra

m_f – massa final da amostra

$$P = \frac{\sum g_i}{100} \quad (7)$$

Onde:

P – percentagem final do agregado

g_i – percentagem de massa retida em cada provete

p_i – perda de massa de cada provete

$$S_i = \frac{(m_{a2} - m_{a1})}{m_a} \quad (8)$$

Onde:

m_{a2} – massa da amostra antes da calcinação

m_{a1} – massa da amostra depois da calcinação

m_a – massa da amostra

9 - Determinação do teor de álcalis

$$\% \text{ Álcalis} = (\% \text{ Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{ K}_2\text{O}) \quad (9)$$

10 - Média das réplicas

$$\bar{X} = \frac{\sum xi}{n} \quad (10)$$

Xi – teor de uma determinação

n – nº de réplicas

11 - Desvio padrão da amostra

$$S = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (11)$$

12 - Desvio padrão relativo

$$\%RSD = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (12)$$

13 - Intervalo de confiança

$$IC = \bar{X} \pm t_{n-1} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

14 - Teste Q

$$Q_{\text{calculado}} > Q_{\text{tabelado}} \quad (14)$$