



Estudo de Argamassas com Cinza de Casca de Amêndoa

VERA ISABEL AMADO FIDALGO

Outubro de 2015

Estudo de Argamassas com Cinza de Casca de Amêndoa

Vera Isabel Amado Fidalgo

Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil – Ramo de
Construções

Orientador: Maria da Luz Garcia

ISEP – 15-10-2015

Índice Geral

Resumo	vii
Abstract	ix
Agradecimentos	xi
Índice de Texto.....	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xvii
Índice de Gráficos	xviii
1 Introdução	19
1.1 Considerações Gerais	19
1.2 Objetivos e Organização da Dissertação.....	22
2 Estado da Arte	25
2.1 O uso de resíduos na construção civil.....	25
2.2 Uso de resíduos agroindustriais.....	27
2.3 Cinzas agroindustriais utilizadas em matrizes de cimento Portland	31
2.3.1 Cinza da casca do arroz	31
2.3.2 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	36
2.3.3 Cinza de madeira	37
2.3.4 Cinza da castanha do caju	39
2.3.5 Cinza da casca de amêndoa	39
3 Programa Experimental.....	41
3.1 Introdução.....	41
3.2 Materiais utilizados.....	42
3.2.1 Cimento Portland	42
3.2.2 Água.....	43
3.2.3 Areia	44
3.2.4 Cinza da casca de amêndoa	47
3.2.4.1 Análise química por Fluorescência de Raios-X.	53
3.2.5 Adjuvante	60
3.3. Em pasta de ligante	62

3.3.1 Ensaio de determinação do tempo de presa	62
3.4 Em argamassas	63
3.4.1 Composição e confeção da argamassa	63
3.4.2 Avaliação da trabalhabilidade.....	65
3.4.3 Fabrico dos provetes	66
3.4.3 Resistências mecânicas	68
3.4.3.1. Ensaio à flexão	68
3.4.3.2 Ensaio à compressão.....	70
4 Apresentação e Discussão dos Resultados	73
4.1 Apresentação dos resultados	73
4.1.1 Tempo de início e fim de presa	73
4.1.2 Avaliação da trabalhabilidade.....	73
4.1.3 Ensaio aos 3 dias.....	74
4.1.4 Ensaio aos 7 dias.....	77
4.1.5 Ensaio aos 14 dias	80
4.1.6 Ensaio aos 28 dias	82
4.1.7 Ensaio aos 41 dias	85
4.1.8 Comparação e evolução dos ensaios a diferentes idades	88
4.2 Discussão dos resultados	89
5 Conclusões	93
5.1 Conclusões.....	93
5.2 Desenvolvimentos futuros	93
Referências Bibliográficas	95
Anexos	101
Anexo I – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 3 dias.	103
Anexo II – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 7 dias.	104
Anexo III – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 14 dias.	105
Anexo IV – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 28 dias.	106
Anexo V – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 41 dias.	107

Resumo

Perante o elevado consumo de materiais naturais no processo e produtos na área da construção civil, o reaproveitamento de resíduos é uma das soluções a ser estudada. As cinzas agroindustriais têm lugar de destaque entre estes resíduos, pois têm a possibilidade de aplicação em materiais cimentícios, reduzindo assim o consumo de cimento de Portland. O presente estudo debruça-se sobre a substituição parcial (1,5% e 5%) de cimento de Portland por cinzas de casca de amêndoa. Realizaram-se provetes com diferentes tipos de argamassas: (i) uma de controlo sem substituição de cimento (ARF); (ii) uma com 1,5% de substituição parcial de cimento por cinzas de casca de amêndoa (CCA 1,5%); (iii) e uma com 5% de substituição parcial de cimento por cinza de casca de amêndoa (CCA 5%). Executaram-se ensaios para resistências mecânicas aos 3, 7, 14, 28 e 41 dias de idade. A nível químico pode-se concluir que esta cinza de casca de amêndoa não apresentou qualquer potencial pozolânico. A trabalhabilidade na generalidade diminuiu ligeiramente, contendo cinza de casca de amêndoa, mas ainda assim considerando-se de fácil manuseamento. Em relação às resistências mecânicas, pode-se concluir que o ideal é a substituição parcial de cimento com 1,5%, pois as resistências diminuem com o uso de uma maior percentagem de substituição, ou seja, o ideal é substituir em pequenas percentagens. Com os dados obtidos, conclui-se que as cinzas testadas não apresentam características necessárias para serem consideradas pozolanas e se será viável a sua utilização mesmo como filler.

Palavras-Chave: Cinza de casca de amêndoa, argamassa, resistência.

Abstract

Given the high consumption of natural materials in the process and products, in the construction area field, the reuse of waste is one of the solutions being studied. The agro industrial ashes are highlighted among these residues, as they have the possibility of applying on cementitious materials, and hence reducing the Portland cement consumption. The present study focuses on the partial substitution (1.5% to 5%) of Portland cement per almond husk ash. Samples were used with different types of grout: (i) a control without cement substitution (ARF); (ii) one with 1.5% partial replacement of cement per almond husk ash (CCA 1.5%); (iii) and one with 5% partial replacement of cement by almond husk ash (CCA 5%). Tests were executed for mechanical strength at 3, 7, 14, 28 and 41 days of age. In a chemical level perspective it can be concluded that this almond husk ash showed no pozzolanic potential. Overall, the workability slightly decreased, containing almond husk ash, but still considering easy to handle. With regard to mechanical strength, it can be concluded that the ideal is the partial replacement of cement with 1.5% because the resistance decreased with the use of a higher percentage of substitution. That is, the ideal is to replace in small percentages. It can be concluded that the tested ashes do not present characteristics necessary to be considered pozzolan and the feasibility of its use even as filler.

Keywords: almond husk ash, grout, resistance.

Agradecimentos

Pela assistência e ajuda dispensada para concluir este trabalho, agradeço em especial:

À minha orientadora, Professora Maria da Luz Garcia, por todos os conselhos e propostas ao longo do meu trabalho e a sua permanente disponibilidade.

Aos técnicos do Laboratório de Química e de Geotecnia do Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela cedência dos laboratórios para a realização dos ensaios e respetiva ajuda nos mesmos.

À minha família, por todo o apoio que me deram ao longo deste trabalho.

Índice de Texto

1	Introdução.....	19
1.1	Considerações Gerais	19
1.2	Objetivos e Organização da Dissertação.....	22
2	Estado da Arte.....	25
2.1	O uso de resíduos na construção civil.....	25
2.2	Uso de resíduos agroindustriais	27
2.3	Cinzas agroindustriais utilizadas em matrizes de cimento Portland	31
2.3.1	Cinza da casca do arroz	31
2.3.2	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	36
2.3.3	Cinza de madeira	37
2.3.4	Cinza da castanha do caju	39
2.3.5	Cinza da casca de amêndoa.....	39
3	Programa Experimental	41
3.1	Introdução	41
3.2	Materiais utilizados.....	42
3.2.1	Cimento Portland	42
3.2.2	Água.....	43
3.2.3	Areia.....	44
3.2.4	Cinza da casca de amêndoa.....	47
3.2.4.1	Análise química por Fluorescência de Raios-X.....	53
3.2.5	Adjuvante	60
3.3	Em pasta de ligante	62
3.3.1	Ensaio de determinação do tempo de presa.....	62
3.4	Em argamassas	63
3.4.1	Composição e confeção da argamassa	63
3.4.2	Avaliação da trabalhabilidade.....	65
3.4.3	Fabrico dos provetes	66

3.4.3 Resistências mecânicas	68
3.4.3.1. Ensaio à flexão	68
3.4.3.2 Ensaio à compressão.....	70
4 Apresentação e Discussão dos Resultados.....	73
4.1 Apresentação dos resultados	73
4.1.1 Tempo de início e fim de presa.....	73
4.1.2 Avaliação da trabalhabilidade.....	73
4.1.3 Ensaio aos 3 dias.....	74
4.1.4 Ensaio aos 7 dias.....	77
4.1.5 Ensaio aos 14 dias	80
4.1.6 Ensaio aos 28 dias	82
4.1.7 Ensaio aos 41 dias.....	85
4.1.8 Comparação e evolução dos ensaios a diferentes idades.....	88
4.2 Discussão dos resultados	89
5 Conclusões	93
5.1 Conclusões	93
5.2 Desenvolvimentos futuros	93
Referências Bibliográficas.....	95
Anexos	101
Anexo I – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 3 dias.	103
Anexo II – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 7 dias.	104
Anexo III – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 14 dias.....	105
Anexo IV – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 28 dias.....	106
Anexo V – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 41 dias.....	107

Índice de Figuras

Figura 1 - Micrografia eletrônica de varredura de cinza de casca de arroz queimada a 560°C (Silveira & Ruaro, 1995)	32
Figura 2 - Agitador de Peneiros	44
Figura 3 - Material retirado em cada um dos peneiros	45
Figura 4 - Cascas de amêndoa.....	48
Figura 5 - Mufla sem exaustão	49
Figura 6 - Mufla onde foram queimadas as cascas de amêndoa	49
Figura 7 - Introdução do time 1	50
Figura 8 - Introdução do time 2	51
Figura 9 - Dessecador fechado.....	51
Figura 10 - Cinzas de casca de amêndoa	52
Figura 11 - Cinzas de casca de amêndoa moídas	53
Figura 12 - Peneiração de uma pequena amostra de cinzas	54
Figura 13 - Preparação da amostra de cinzas para a análise química	54
Figura 14 - Máquina de análise química.....	55
Figura 15 - Registo da composição química da amostra	55
Figura 16 - Ensaio de penetração.....	63
Figura 17 - Mapa de distribuição dos tempos de amassadura.....	64
Figura 18 - Medição do diâmetro de espalhamento.....	65
Figura 19 - Colocação da argamassa no molde troncocónico.....	65
Figura 20 - Enchimento do molde com a argamassa.....	66
Figura 21 - Compactação da argamassa no compactador	66
Figura 22 - Moldagem dos provetes	67
Figura 23 - Câmara de cura.....	67

Figura 24 – Ensaio à flexão	68
Figura 25 – Introdução dados na máquina para o ensaio.....	69
Figura 26 – Provetes após o ensaio à flexão	69
Figura 27 - Ensaio à compressão	71
Figura 28 - Ensaio à compressão	72

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação, composição e caracterização de materiais com características pozolânicas ou hidráulicas latentes (Almeida, 2008).....	29
Tabela 2 - Características Químicas e Físicas do cimento utilizado.....	42
Tabela 3- Características Mecânicas do cimento utilizado.....	42
Tabela 4 – Percentagem de retidos e passados acumulados.....	46
Tabela 5 – Rendimento das cascas de amêndoa.....	52
Tabela 6 - Composição química da cinza de casca de amêndoa.....	56
Tabela 7 - Composição média do cimento Portland I 42.5R produzido pela SECIL.....	57
Tabela 8 – Comparação dos valores dos elementos químicos do cimento de Portland e CCA.	57
Tabela 9 - Valores de desempenho do adjuvante.....	61
Tabela 10 – Composição das argamassas.....	64
Tabela 11 - Tempo de início e fim de presa.....	73
Tabela 12 – Valores da avaliação da trabalhabilidade das diferentes argamassas.....	74
Tabela 13 - Valores médios da massa volúmica aos 3 dias.....	75
Tabela 14 - Valores médios das resistências mecânicas aos 3 dias.....	76
Tabela 15 - Valores médios da massa volúmica aos 7 dias.....	77
Tabela 16 - Valores médios das resistências mecânicas aos 7 dias.....	78
Tabela 17 - Valores médios da massa volúmica aos 14 dias.....	80
Tabela 18 - Valores médios das resistências mecânicas aos 14 dias.....	81
Tabela 19 - Valores médios da massa volúmica aos 28 dias.....	83
Tabela 20 - Valores médios das resistências mecânicas aos 28 dias.....	83
Tabela 21 - Valores médios da massa volúmica aos 41 dias.....	85
Tabela 22 - Valores médios das resistências mecânicas aos 41 dias.....	86

Índice de Gráficos

Gráfico 1- Curva granulométrica.....	47
Gráfico 2 – Valores médios da massa volúmica aos 3 dias	75
Gráfico 3 - Valor médio da resistência à flexão aos 3 dias	76
Gráfico 4 - Valor médio da resistência à compressão aos 3 dias.....	76
Gráfico 5 - Valor médio da massa volúmica aos 7 dias.....	78
Gráfico 6 - Valor médio da resistência à flexão aos 7 dias	79
Gráfico 7 - Valor médio da resistência à compressão aos 7 dias.....	79
Gráfico 8- Valores médios da massa volúmica aos 14 dias	80
Gráfico 9 - Valor médio da resistência à flexão aos 14 dias	81
Gráfico 10 - Valor médio da resistência à compressão aos 14 dias	82
Gráfico 11 - Valores médios da massa volúmica aos 28 dias	83
Gráfico 12 - Valor médio da resistência à flexão aos 28 dias.....	84
Gráfico 13 - Valor médio da resistência à compressão aos 28 dias	84
Gráfico 14 - Valores médios da massa volúmica aos 41 dias	86
Gráfico 15 - Valor médio da resistência à flexão aos 41 dias.....	87
Gráfico 16 - Valor médio da resistência à compressão aos 41 dias	87
Gráfico 17- Comparação do ensaio à flexão das diferentes idades	88
Gráfico 19 - Comparação do ensaio à compressão das diferentes idades	89

1 Introdução

1.1 Considerações Gerais

O gasto excessivo dos recursos naturais e a poluição têm sido um dos principais problemas a nível mundial, exprimindo-se numa maior consciencialização sobre as suas consequências e efeitos nocivos (Pinto, 2013).

Na realidade com 6,1 biliões de pessoas a depender de recursos do mesmo pequeno Planeta, tem-se vindo a compreender que se está a “gastar” de uma conta finita. Neste momento, a quantidade de produtos agrícolas, animais e outros tipos de bio matéria que são extraídos da Terra anualmente, excede em cerca de 20% a quantidade que o Planeta é capaz de repor. De facto, verifica-se que a reposição dos recursos que se consomem em 12 meses demora cerca de 14.4 meses a efetuar-se, ou seja, está-se a gastar do “capital”. O desenvolvimento sustentável funciona invertendo esta situação, expandindo a base de recursos e ajustando o modo como se utiliza essa base de maneira a viver-se apenas de “juros” biológicos sem nunca se tocar no capital (Kluger & Dorfman, 2002).

A geração de resíduos é um dos fatores aliado à poluição atmosférica, pois, o consumo descontrolado das matérias-primas e dos recursos existentes no planeta geram quantidades avultadas de desperdícios. É estimado atualmente que só na Europa são gerados duzentos milhões de toneladas de resíduos, dos quais 40 milhões de toneladas são considerados perigosos (A EU e a gestão de resíduos, in Comissão europeia direção geral do ambiente, S.d.p.o.d.c. europeias, Editor 2000: Luxemburgo).

Existe, assim, uma maior consciencialização e um esforço para reaproveitar estes resíduos, apesar de a maioria sofrer outros destinos, tais como a incineração ou o depósito em aterro (Pinto, 2013).

Tanto a incineração como o depósito em aterro não são a melhor opção de destinos perfeitos, uma vez que podem conduzir a consequências graves para a saúde humana ou tornarem-se nocivos para o ambiente.

Atualmente, para combater a escassez de terras para depósito em aterro, a complexidade de tratamentos que tornem estes resíduos inofensivos para a eliminação em aterro e os elevados custos desses tratamentos, do transporte e eliminação tem-se apostado essencialmente na reciclagem. De facto, esta tem como benefícios a menor necessidade de recurso a matérias-primas e ainda a possibilidade de diminuir o volume total de resíduos a eliminar (A EU e a gestão de resíduos, in Comissão europeia direção geral do ambiente, S.d.p.o.d.c. europeias, Editor 2000: Luxemburgo).

O betão, a seguir à água é o produto mais consumido no mundo, logo é o material de construção mais utilizado (Pinto, 2013).

Em cada tonelada de clínquer de Portland produzida pela indústria do cimento, além do elevado consumo de energia, é gerada mais ao menos a mesma quantidade de gases com efeito de estufa, principalmente o dióxido de carbono (Samarin, 1999). Produz-se atualmente no mundo cerca de dois mil milhões de toneladas/ano de cimento (Naik, 2001), com tendência para crescer até cerca de 3,5 mil milhões de toneladas/ano em 2015 (Mehta, 1994). A nível mundial, a indústria do cimento tem contribuído em 6% de emissões de CO₂, sendo que este setor tem de encontrar soluções para diminuir estas emissões, daí a pressão para utilizar as adições no cimento e betão (Naik, 2001), (Worrell, 2001). Durante as últimas décadas, tem-se vindo a verificar que o sistema cimento Portland/adições pozolánicas apresentará um comportamento melhor ao sistema cimento Portland em termos de microestrutura e durabilidade. Assim sendo, existem argumentos e provas científicas de peso, do ponto de vista técnico e económico, para aumentar o grau de finura de subprodutos

industriais para serem utilizados em vez da finura do cimento de Portland, assegurando a durabilidade exigida em detrimento de resistência mecânica em betão estrutural (Swamy, 2007).

No entanto, a redução de CO₂ gerada no fabrico do cimento pode ser atenuada da seguinte forma (www.cimpor.pt):

- Diminuindo a quantidade de clínquer no fabrico do cimento (substituindo-se parte deste por outros materiais reativos adequados);
- Elevando a eficiência energética do processo de produção de clínquer (melhorar a tecnologia da linha de produção);
- Aumentando a percentagem de energia proveniente de combustíveis alternativos (substituir os combustíveis uma vez que são uma fonte de energia não renovável por produtos alternativos que sejam renováveis ou subprodutos industriais, como exemplo os pneus);
- Substituindo combustíveis com fatores de emissão de CO₂ elevados, por outros com fatores de emissão mais reduzidos (por exemplo o uso de pneus triturados ou coque de petróleo em detrimento do carvão).

Mundialmente já são utilizadas e normalizadas cinzas volantes ou escórias de alto-forno como adições provenientes de resíduos. Em resultado de estudos já realizados, o uso destas adições, minimizam o ataque ou a deterioração de determinadas reações que afetam o betão, aumentando assim a sua durabilidade. Estruturas de betão armado ou pré-esforçado com a utilização de adições podem-lhes conferir uma maior resistência a certas agressões de natureza química (Coutinho, 2012).

Assim sendo, o uso de materiais de substituição adequados (adições) no cimento é conhecido por contribuir significativamente para a sua durabilidade e muitas vezes em termos de

melhoria da sua trabalhabilidade. É de salientar que a investigação neste campo é de máxima importância, no sentido que o uso das adições traz vantagens económicas, técnicas e ambientais.

1.2 Objetivos e Organização da Dissertação

A presente dissertação apresenta como principal objetivo geral a análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias, tendo como estudo de caso a cinza da casca de amêndoa.

A dissertação divide-se em 5 capítulos.

O capítulo I (Introdução), apresenta o enquadramento do tema do trabalho, explanando as considerações acerca do fabrico do cimento e betão e a poluição que daí resulta, lançando assim o tema sobre o uso de adições.

O capítulo II (Estado da Arte), apresenta um resumo de investigações sobre esta temática que serviram de base de conhecimento para esta dissertação, assim como os ensaios e resultados que serviram para compreender a sua aplicabilidade como adição.

O capítulo III (Programa Experimental), apresenta a caracterização dos materiais utilizados, bem como os ensaios realizados. Foram produzidos três tipos de argamassas: (i) uma de referência (ARF) com 100% de cimento; (ii) uma contendo cinza de casca de amêndoa em substituição parcial do cimento em 1,5% (CCA 1,5%) e; (iii) uma outra com 5% de substituição parcial do cimento (CCA 5%).

No capítulo IV (Apresentação e Discussão dos Resultados), é analisado o desempenho da CCA em termos de argamassa por comparação dos resultados da cada propriedade analisada

nas argamassas CCA 1,5% e CCA 5% com os resultados da argamassa ARF. De acordo com os resultados obtidos foi também possível proceder à discussão dos mesmos com os resultados obtidos por diversos autores em estudos semelhantes.

No capítulo v (Conclusões), são apresentadas, as conclusões gerais deste estudo e sugestões de desenvolvimentos futuros para o uso da CCA como substituto parcial do cimento em betão.

2 Estado da Arte

2.1 O uso de resíduos na construção civil

Tudo aquilo que nos rodeia um dia será resíduo: casas, automóveis, pontes, aviões, etc. A estes resíduos soma-se ainda aqueles que fazem parte do processo de extração de matérias-primas e de produção de bens. Chega-se, deste modo, à conclusão que a quantidade de resíduos gerados por qualquer sociedade ultrapassa a quantidade de bens consumidos (Rocha, 2003).

Em Portugal, no ano 2000, em reunião de conselho de ministros estabeleceram-se algumas regras para o tratamento de resíduos industriais perigosos, face às consequências ambientais emergentes.

A Portaria n.º209/2004, de 3 de março estabelece uma Lista Europeia de Resíduos (LER). De acordo com o Decreto-Lei n.º178/2006 de 5 de setembro, o termo “resíduos” é definido por: “Qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer, nomeadamente os identificados na Lista Europeia de Resíduos”. Segundo este Decreto-Lei, os produtores de resíduos são responsabilizados pelo destino final destes e pelos seus custos de gestão e transporte. Além disso, proíbe igualmente a queima a céu aberto o enterramento e abandono dos mesmos. É necessário que todas as entidades envolvidas assumam um compromisso para a sensibilização dos agricultores.

Como um dos maiores consumidores individuais de recursos naturais encontram-se as atividades da indústria da construção civil. Estas são causadoras de um grande impacto ambiental. Para além de neste setor serem utilizados cerca de 20% a 50% do total de recursos naturais, esta é também uma atividade produtora de muitos resíduos sólidos (Lima, 2008).

Existem várias indústrias responsáveis pela geração de grandes quantidades de CO₂ e de partículas de poeira, através dos processos de produção de materiais e componentes. A Construção Civil é uma das principais consumidoras de resíduos provenientes destas indústrias. Assim sendo, aumenta a necessidade de reduzir a quantidade de matéria-prima consumida e a grande diversidade de produtos consumidos durante a produção. Importa, desta forma, explorar uma vasta lista de opções de uso de resíduos com diversas funções na edificação (Nolasco, 1993).

Para a diminuição do impacto ambiental causado pela construção civil, existe a necessidade de reciclar os resíduos. Além da diminuição da extração de matérias-primas, a redução do consumo de energia, minimizar os custos de transporte e da redução do volume de aterros, existe a possibilidade de adquirir materiais com características técnicas competitivas em relação aos produtos atuais.

Analisando o conceito dos “3R’S” (Reduzir, Reutilizar e Reciclar), conclui-se que a redução de resíduos é a primeira fase a ser tomada em conta quando se aborda a gestão de resíduos. Verifica-se que existe uma necessidade de estudar alternativas para a reciclagem, mas também para a redução, tornando o custo final da construção de uma habitação economicamente mais competitiva para as atividades industriais.

O desenvolvimento de novos materiais e componentes a partir de resíduos normalmente requer um elevado período de investigação, o que necessita que haja um esforço considerável neste sentido (Lima, 2008).

2.2 Uso de resíduos agroindustriais

Na agricultura pode-se encontrar uma grande geração de resíduos agroindustriais provenientes desta atividade. A alternativa mais comum para o aproveitamento destes resíduos é a sua utilização para a produção de energia, usando-os como biomassa (Campos et al., 2014). Esta é uma fonte renovável de produção de energia sob a forma de eletricidade, calor ou combustível. A biomassa tem como principais vantagens: reduzir a dependência energética, regular a produção e possibilidade de modulação, possibilidade de gestão integradas das florestas, possibilidade de aproveitamento de resíduos industriais e balanço de emissões de CO₂ (<http://www.apren.pt/>).

Tudo que seja convertido em energia utilizável através de todas as formas de plantas e derivados como, por exemplo, madeira, resíduos de indústrias agroalimentares (laticínios, matadores, lagares, indústrias de transformação de frutos secos), resíduos urbanos e florestais, grãos, talos, óleos vegetais e lodo de tratamento biológico e efluentes é biomassa.

Os resíduos agrícolas têm uma alta capacidade de gerar calor, são de baixo custo e não existe lugar para os armazenar, o que contribui para que estes sejam usados como biomassa em fornos e caldeiras, convertendo-se em energia térmica e elétrica. Mas como existe uma grande quantidade de biomassa produzida, existe uma grande geração de toneladas de cinzas como subproduto, tornando-se atualmente o principal problema ambiental do setor agroindustrial.

Uma das formas de minimizar o impacto causado pela deposição de grande quantidade de cinzas é aproveitá-las para a construção civil, por exemplo, adição mineral no fabrico do betão e argamassas (Campos et al., 2014).

As cinzas minerais provenientes das diferentes atividades agroindustriais têm destaque entre os diferentes tipos de resíduos, pois apresentam altas percentagens de sílica e de outros óxidos que podem ser utilizados como pozolanas (Paula et al., 2009).

Os materiais pozolânicos segundo a norma NP4220:2010 podem definir-se como: “ As pozolanas são materiais que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes hidráulicas, são capazes de se combinar com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e em presença de água, e formar compostos semelhantes aos originados na hidratação dos constituintes do cimento Portland. Consistem essencialmente em óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e outros óxidos em pequena proporção, como o óxido de cálcio (CaO).”

Na regulamentação atual já são consideradas alguns tipos de adições, como por exemplo, as cinzas volantes, escórias de alto-forno e sílica de fumo, sendo estas alvo de estudos mais aprofundados (Coutinho, 2011).

Tabela 1 - Classificação, composição e caracterização de materiais com características pozolânicas ou hidráulicas latentes (Almeida, 2008)

	Classificação	Composição química e mineral	Características das partículas
Pozolanas com propriedades hidráulicas	Escórias de alto-forno	Constituídas essencialmente por silicatos, contendo maioritariamente cálcio, magnésio, alumínio e sílica. Compostos cristalinos do grupo da melilita podem ser encontradas em pequenas quantidades.	O material não tratado possui o tamanho da areia e contém cerca de 10 a 15% de fração não sólida. Antes de ser usada, é seca e moída em partículas de dimensões inferiores a 45µm (geralmente com cerca de 500m ² /Kg Blaine). As partículas possuem uma textura rugosa.
	Cinza volante com elevado teor de cálcio	Constituídas por silicatos amorfos de cálcio, magnésio, alumínio e alcalinos. A pequena quantidade de matéria cristalina consiste geralmente em quartzo e C ₃ A: poderá também ocorrer cal livre e perclases; CS e C ₄ A ₃ S podem também ocorrer no caso de serem utilizados arrefecimentos rápidos com sulfuretos.	As partículas moídas correspondem de 10 a 15% de partículas com dimensões superiores a 45µm usualmente de 200-300m ² /Kg Blaine. A maior parte das partículas são esferas sólidas com diâmetro médio inferior a 20µm. As partículas apresentam uma textura lisa mas não tanto como nas cinzas volantes de baixo teor de cálcio.
Pozolanas de elevada	Sílica de fumo	Consistem essencialmente em sílica pura no estado amorfo.	Extremamente fina de forma esférica com diâmetros médios de 0,1µm (superfície específica de aproximadamente 20m ² /g por adsorção de nitrogénio).
	Cinza de casca de arroz	Consistem essencialmente em sílica pura no estado amorfo.	Partículas de dimensão geralmente inferiores a 45µm e extremamente celulares (superfície específica de aproximadamente 60m ² /g por adsorção de nitrogénio)
Pozolanas normais	Cinza volante de baixos valores de cálcio	Constituídas maioritariamente por silicatos amorfos de alumínio, ferro e alcalinos. A pequena parte da matéria cristalina consiste, geralmente, em quartzo, hematite e magnetite. A presença de carbono é geralmente inferior a 5% podendo, no entanto, ser superior a 10%.	15 a 30% de partículas com dimensões superiores a 45µm (usualmente de 200-300m ² /Kg Blaine). A maior parte das partículas são esferas sólidas com diâmetro médio de 20µm. As partículas apresentam uma textura lisa.
Pozolanas	Escórias e cinzas de arrefecimentos lentos	Consistem essencialmente em minerais de sílica cristalina e apenas uma pequena quantidade de matéria não cristalina	Os materiais devem ser pulverizados de modo a obter-se partículas muito finas e conferir-lhes alguma atividade pozolânica. As partículas moídas apresentam uma textura lisa.

De acordo com NP EN 197-1 em vigor, as adições que podem ser utilizadas como constituintes de um cimento são: escória de alto forno, sílica de fumo, pozolana natural, pozolana calcinada, cinza volante siliciosa, cinza volante calcária, xisto cozido e filer calcário.

As adições mais utilizadas em Portugal são o filer calcário e as cinzas volantes. O filer calcário é utilizado como constituinte do cimento na produção de cimentos compostos (fábricas cimenteiras).

As cinzas volantes são frequentemente utilizadas em centrais de betão pronto como substituto parcial do cimento, como constituinte da mistura de ligantes de betões.

A NP EN 206-1:2007 define adição como “material finamente dividido utilizado no betão com a finalidade de lhe melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais”. A utilização de adições está regulamentada, apenas podendo ser utilizadas na produção de um cimento, argamassa ou betão, aquelas que cumpram as respetivas exigências normativas.

As adições podem substituir parcialmente o clínquer na produção do cimento. Neste caso, a mistura é realizada na fábrica de cimento, sendo a adição considerada como constituinte principal do cimento.

Quando a mistura da adição é realizada na central de betão pronto, no momento da amassadura do betão, a adição é considerada como sendo utilizada em substituição do cimento.

Como exemplos de ecologia industrial na redução do impacto ambiental de várias indústrias já são considerados os cimentos de Portland compostos com adições, contendo um elevado volume de cinzas volantes provenientes de centrais termoelétricas, ou de escória granulada de alto-forno da indústria do aço (Mehta & Monteiro, 2006).

Anteriormente à invenção do cimento Portland, as adições minerais na construção civil já eram utilizadas no período de 1500 a.C., na Grécia (Malhotra & Mehta, 1996).

Na Europa, os ligantes com cimento Portland e 50% a 70% de escória de alto-forno já são notórios pela sua durabilidade a longo prazo contra o ataque por sulfatos e ataque pela água do mar. Através de um estudo realizado na América do Norte, demonstrou-se que, com materiais e tecnologia convencionais, é possível produzir betão de alto desempenho com cimento contendo entre 50% a 60% (em massa) de cinza volante. Esta cinza encontra-se disponível já em grandes quantidades em muitas partes do mundo. Na China e na Índia são produzidas mais de 300 milhões de toneladas por ano de cinza volante e estes países são aqueles em que se prevê um maior consumo de cimento para atender às necessidades de construção de edificação e infraestruturas (Mehta & Monteiro, 2006).

2.3 Cinzas agroindustriais utilizadas em matrizes de cimento Portland

A seguir, são apresentados alguns estudos encontrados na literatura científica sobre a aplicação de cinzas de origem vegetal, bem como os resultados mais relevantes obtidos, analisando assim a sua viabilidade no uso destes resíduos em materiais cimentícios.

2.3.1 Cinza da casca do arroz

A cinza da casca do arroz (CCA) como adição mineral em materiais cimentícios é o resíduo agroindustrial mais utilizado. Esta cinza é um subproduto agrícola que, se produzido por combustão controlada, pode apresentar elevada atividade pozolânica, sendo constituída sobretudo por sílica amorfa e apresentando uma superfície específica elevada resultante da estrutura celular da casca.

Os componentes principais da casca de arroz são aproximadamente: 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra, sendo esta caracterizada por ter uma capa lenhosa do grão, dura e com alto teor de sílica (Mehta, 1992). Esta casca contém como componentes a lignina e a celulose, verificando-se ao queimar-se a remoção dos mencionados componentes, originando uma estrutura celular e porosa de acordo com a figura 1 (Silveira & Ruaro, 1995).

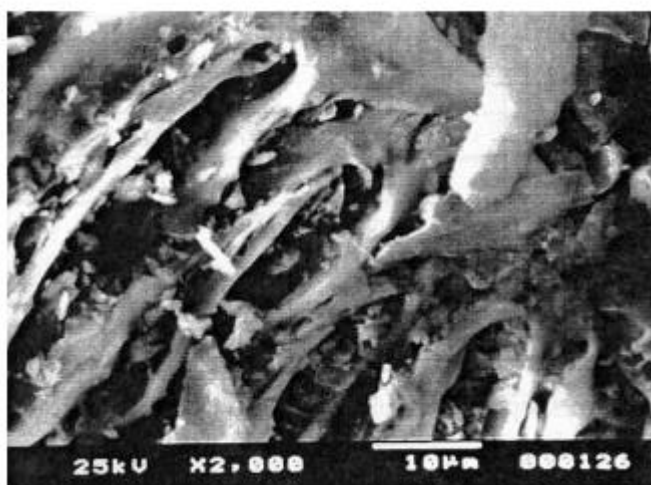


Figura 1 - Micrografia eletrônica de varredura de cinza de casca de arroz queimada a 560°C (Silveira & Ruaro, 1995)

A casca do arroz é bastante atrativa como fonte de energia renovável por possuir metade do poder calorífico do carvão (Lima, 2008). Até à década de 70 do século passado, a cinza de casca de arroz era utilizada na produção de blocos de cimento e o primeiro trabalho científico publicado que investigava o potencial aglomerante dessas cinzas foi registado em 1973. O uso desta cinza como material pozolânico tem vindo a ser investigado desde essa altura, principalmente na Índia e nos EUA. Só a partir do ano de 1980, com o desenvolvimento da tecnologia do betão de elevado desempenho, é que a preocupação de elevar a pozolanicidade do material passou a ser permanente (Mehta, 1992).

A cinza de casca de arroz é um resíduo agrícola muito abundante na China e na Índia, servindo de alimento a metade da população mundial. Esta cinza é uma pozolana de elevada

reatividade produzida por queima controlada da casca de arroz e que pode apresentar diversas vantagens, tais como, aumento das resistências e da durabilidade, redução de custos nos materiais por economia do cimento e benefícios ambientais. A reatividade desta é atribuída ao elevado teor em sílica não cristalina (Coutinho, 2003).

A casca de arroz é um dos resíduos mais abundantes a nível mundial, mas ainda sem aplicação direta e, sob a forma de cinza, contém propriedades pozolânicas, aproveitando-se como substituto parcial do cimento de Portland (Sampaio, Coutinho & Sampaio, 2000) (Monteiro, 2001).

Produzida por queima controlada, esta cinza têm várias vantagens, como por exemplo, aumento da resistência e durabilidade, redução de custo dos materiais devido ao menor consumo de cimento de Portland e benefícios ambientais. (Ganesan, Rajagopal & Thangavel, 2007).

Existem várias alternativas para o uso da cinza de casca de arroz, mas uma das mais prometedoras será a sua utilização na indústria cimenteira como constituinte principal com o clínquer moído, devido ao alto teor de sílica que as cascas possuem (Alex, 1981).

Apesar de, num futuro a médio prazo, nunca se poder dispensar o uso do cimento, os substitutos, tais como, a cinza de casca de arroz irão certamente proporcionar um recurso útil em países produtores deste alimento e com poucas capacidades económicas para o fabrico ou mesmo para a importação de cimento. Para além do mais, é inequívoca a vantagem deste constituinte do betão, pois pode ser facilmente produzido, quase artesanalmente (Monteiro, 2001).

É de salientar que já foram realizados vários trabalhos na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) com a base no uso deste resíduo agrícola (Coutinho, 2003).

Devidamente processada, a CCA pode-se tornar mais reativa com o cimento Portland que a cinza volante, mesmo sabendo que a temperatura na qual a casca de arroz é queimada modifica a estrutura dos seus compostos, modificando gradualmente a sílica do estado amorfo para cristalino (Malhotra & Metha, 1996).

Estudos sugerem que esta temperatura não deva ultrapassar os 800°C ao longo de 1h (Chandra, 1996), mas outros autores sugerem variações nessa temperatura, evidenciando que esta não deva ultrapassar 700°C (Santos, 1997) (Santos & Prudêncio, 1998) (Rêgo et al., 2004). Na Universidade da Califórnia, foram realizados estudos que indicam que a temperatura de queima de casca de arroz para que a sílica se mantenha na fase amorfa encontra-se compreendida entre 500°C e 700°C (Metha, 1992).

A cinza de casca de arroz aplicada em matrizes de cimento Portland mostra ganho de desempenho em relação à sílica ativa, aos 3 dias de idade. Esta cinza é um material potencialmente ativo, utilizado como pozolana artificial que contém teor considerável de SiO₂ (acima de 90%), no qual a reatividade depende de dois fatores, a cristalinidade e a área específica (Oda & Libório, 2002).

Em relação á resistência de compressão obtida nas argamassas com diferentes teores de CCA, constatou-se ser de 15% o teor ótimo de substituição para um máximo de resistência aos 28 dias, e 40% o teor de substituição para uma resistência equivalente aquela apresentada pela argamassa de referência com um traço de 1:3:0,52 (cimento: areia: água) em massa.

Apesar de este assunto ser discutido e analisado há bastante tempo e também dos resultados das pesquisas apontarem para um grande potencial do uso da CCA como pozolanas, as cinzas resultantes da queima da casca do arroz não têm sido muito utilizadas para a produção do betão. Poder-se-á, eventualmente, atribuir tal facto aos elevados índices de

carbono residual na cinza (acima de 5%) que produz uma coloração cinza-escura no betão, tornando-o pouco aceite pelo mercado consumidor. Para além disso, a CCA com alto teor de carbono gera argamassas e betões com elevado índice de coesão (Prudêncio et al., 2003).

O insignificante uso da CCA pela indústria de construção civil deve-se, principalmente, ao processo de queima das cascas, ainda pouco eficaz e sem controlo industrial (Rêgo et al., 2004).

No seguimento de uma série de investigações levadas a cabo pela FEUP, foi produzido betão numa indústria de pré-fabricação de betão. Após a obtenção das cinzas a partir de cascas de arroz portuguesas incineradas de forma controlada, foram produzidas as “boxes Culverts” seguindo os procedimentos usuais da indústria. Foram comparadas em termos de resistência e principalmente de durabilidade, o betão com 7% de substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz com betão equivalente só com cimento (betão controlo). Os resultados obtidos provaram, mais uma vez, que a utilização da cinza de casca de arroz melhora a durabilidade do betão sem uma redução significativa da resistência mesmo com ocorrência de erros de produção.

Como já foi referido, a cinza da casca de arroz (RHA) a utilizar como substituto parcial do cimento Portland, deve resultar da incineração controlada de casca de arroz, conseguindo quase sílica pura (podendo conter até 95% de sílica), amorfa, e com grande superfície específica devido à sua estrutura celular enrugada, sendo um material altamente reativo (Sousa, 2005).

O uso da RHA tem efeitos no betão semelhantes aos da sílica de fumo mas as partículas da cinza de casca de arroz diferem das de sílica de fumo apresentando uma estrutura celular que é responsável pela elevada superfície específica e as partículas não são de tamanho muito

reduzido (Coutinho, 2002), ao contrário das de sílica de fumo que são esféricas e muito pequenas (cerca de 100 vezes inferiores às do cimento).

Em resumo, a RHA é um produto que tem elevadas potencialidades no sector da construção, contribuindo para a sustentabilidade, cooperando para estruturas de betão armado ou esforçado mais duráveis. A RHA já foi usada com êxito em aplicações, como por exemplo, betão de cofragem de permeabilidade controlada e betão compactado com cilindros (Chindaprasirt et al., 2007; Sousa, 2005), demonstrando um resultado positivo nas propriedades do betão.

2.3.2 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) tem sido estudada essencialmente no Brasil como substituto parcial do cimento Portland em argamassa e betões, contribuindo deste modo para a redução CO_2 proveniente da produção do cimento. O rendimento obtido de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar é cerca de 10%, composta essencialmente por 84% de SiO_2 e 5% de Carbono. Os estudos realizados apresentaram valores de reatividade pozolânica elevada, assim como viabilidade de aplicação de cinza de bagaço de cana-de-açúcar até cerca de 20% de substituição do cimento em betão em termos de resistência mecânica (Paula et al., 2009).

Também tem sido alvo de estudo como adição em materiais cimentícios, principalmente pelo aumento da geração desse resíduo em função da alta produção de álcool combustível e de açúcar nos últimos anos (Freitas, 1996; Hernandez et al., 1998; Cordeiro et al., 2005).

Um dos problemas atualmente enfrentado pelos administradores das fábricas é a produção de cinzas residuais, provenientes da queima do bagaço, e a sua disposição, pode ser temporária ou definitiva no ambiente (Souza et al., 2007).

Pesquisas sugerem a possibilidade de utilizar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição mineral para betão. Existe uma semelhança entre as composições químicas de uma cinza residual do bagaço, originária de Cuba, e de uma cinza da casca de arroz, adição mineral de reconhecida reatividade (Hernandez et al., 1998). Estudos apresentam a viabilidade do uso da cinza residual do bagaço em conjunto com o cimento de Portland (Freitas, 1996; Singh et al., 2000; Cordeiro et al., 2005; Souza et al., 2007).

Um inconveniente da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) está na “contaminação” por partículas de quartzo provenientes da areia que aderem à cana-de-açúcar e não são totalmente retiradas durante a etapa de lavagem da cana. A reatividade da cinza pode-se comprometer por este tipo de contaminação, uma vez que o quartzo, ao contrário da sílica em estado amorfo, é um material quimicamente estável (Cordeiro et al., 2005).

Considerando a contaminação por quartzo proveniente da areia, obtiveram-se resultados bastante satisfatórios nos testes de pozolanicidade com a cal e com o cimento, comparando também com o quartzo moído (Cordeiro et al., 2005). No fim deste estudo, verificou-se que a cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar pode apresentar reatividade com o cimento Portland e com a cal quando comparado com o quartzo.

2.3.3 Cinza de madeira

O resíduo proveniente da madeira é denominado de serragem. Esta pode causar danos tanto à saúde quanto ao meio ambiente quando o seu armazenamento final for feito corretamente.

Atualmente, a serragem é usada principalmente como combustível e uma pequena quantidade como material filler ou agregados para betão. A utilização da cinza da serragem como substituto parcial do cimento de Portland é recente e pode contribuir para dois aspetos, a redução da eliminação deste resíduo no meio ambiente e a diminuição da quantidade/custo de cimento utilizado em argamassas e betões (Elinwah & Mahmood, 2004).

O estudo supramencionado, expôs, através da análise química, que a cinza da serragem tem um teor de sílica de 67,20% e 9,98% de cálcio, sendo estes os elementos predominantes. Apesar do alto teor de sílica, o ensaio de resistência à compressão demonstrou que a resistência diminui à medida que se aumenta a substituição do cimento pela cinza.

Outros estudos concluíram que, após a análise da cinza da serragem, quer na trabalhabilidade, quer na resistência à compressão a mesma teve os seus valores a decrescer em relação ao exemplar de cimento de Portland. (Udoeyo & Dashibil, 2002; Udoeyo et al., 2006).

Em Portugal foi realizado um estudo em que se substituiu parcialmente o cimento de Portland em 10% e 20% por cinzas de madeira resultantes da combustão de resíduos de madeira provenientes da indústria de pellets. Concluiu-se que as argamassas contendo as cinzas de madeira (WWA) diminuem ligeiramente a trabalhabilidade e apresentam menores resistências mecânicas do que a argamassa de controlo para qualquer percentagem de substituição e em qualquer idade. Com estes dados, pode-se considerar que as cinzas de resíduos de madeira, não apresentam características para serem consideradas “pozolana para betão” (Pinto, 2013).

2.3.4 Cinza da castanha do caju

Realizou-se um estudo para analisar a viabilidade do uso de cinza das cascas da castanha de caju (CCCC) como substituto parcial do cimento de Portland. As CCCC é o resíduo que se recolhe no fundo das grelhas da caldeira, resultante da queima das cascas de castanhas de caju. Este resíduo é usado como adubo em plantações de caju, sendo uma pequena parte destinada a aterros sanitários comuns. Realizaram-se ensaios para analisar a composição físico-química da CCCC, o potencial pozolânico, a retração por secagem e da profundidade de carbonatação das argamassas confeccionados com CCCC e determinar a capacidade de estabilização/solidificação da CCCC pela matriz cimentícia. Depois da análise destes ensaios, concluiu-se que a CCCC não apresenta potencial pozolânico, favorece a incorporação de ar em matrizes cimentícias e contribui para o aumento da retração por secagem e da carbonatação em argamassas. Por estas considerações, a CCCC não apresentou viabilidade técnica para o uso em matrizes cimentícias (Lima, 2008).

2.3.5 Cinza da casca de amêndoa

Foram realizados no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), dois estudos sobre a utilização da casca de amêndoa em betão. No ano letivo 2004/2005, na disciplina de seminário foi realizado um trabalho sobre a “Comparação da resistência mecânica entre um betão corrente e um betão com casca de amêndoa e Leca”, elaborado pelos alunos, António Gadelho, Pedro Fonseca e Joana Machado. O trabalho foi orientado pela Engenheira Maria da Luz Garcia. O segundo trabalho foi realizado neste Instituto, no mesmo ano letivo e para a mesma disciplina, com o tema “Análise das características físicas e mecânicas de betão leve usando casca de amêndoa”, orientado pelo Engenheiro Ângelo Jacob. Ambos os estudos

chegaram às mesmas conclusões, ou seja, que a casca de amêndoa não aderiu muito bem à pasta de cimento, devido ao óleo por ela libertada.

Assim sendo, na presente dissertação, optou-se por usar a cinza da casca de amêndoa em vez da sua casca.

3 Programa Experimental

3.1 Introdução

A determinação da viabilidade de substituição parcial do cimento Portland por cinzas de casca de amêndoa, CCA, considerou-se inicialmente esta substituição apenas em argamassa, por ser mais económico numa primeira abordagem neste tipo de estudos. Realizaram-se três tipos de argamassas, uma argamassa com 1,5% de substituição em massa do cimento Portland por cinzas de casca de amêndoa, a segunda argamassa com 5%, de substituição em massa do cimento Portland por cinzas de casca de amêndoa, designando-se assim, CCA 1,5% e CCA 5%, respetivamente cada argamassa, por último, a terceira argamassa o cimento Portland não sofreu nenhuma substituição parcial por nenhum resíduo, denominada, ARF, para termos de comparação com duas argamassas anteriores.

Os constituintes das argamassas em estudo foram os seguintes:

- Cimento de Portland (CEMI) da classe 42,5R;
- Água potável;
- Areia proveniente de um areeiro do Porto;
- Cinza de casca de amêndoa (CCA);
- Adjuvante superplastificante/forte redutor de água da Woerment FM 697.

Para o estudo da viabilidade de substituição parcial do cimento por CCA, foram realizados os seguintes ensaios:

- Análise química das cinzas de casca de amêndoa por Fluorescência de Raios-X;
- Avaliação da trabalhabilidade (ASTM C 109/90e ASTM 230);
- Ensaios das resistências mecânicas – flexão e compressão (NP EN 196-1).

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CEM I 42,5 R, de acordo com a NP EN 197-1. Este cimento é constituído por Clínquer Portland (95% a 100%) e outros constituintes (0% a 5%), e são facultados em sacos de 40Kg. As características químicas e físicas do cimento utilizado encontra-se na tabela 2.

Tabela 2 - Características Químicas e Físicas do cimento utilizado

	Propriedades	Valor especificado
Características Químicas	Perda ao Fogo	$\leq 5,0 \%$
	Resíduo insolúvel	$\leq 5,0 \%$
	Teor de sulfatos (em SO_3)	$\leq 4,0 \%$
Características Físicas	Teor de cloretos	$\leq 0,10 \%$
	Princípio de presa	$\geq 60 \text{ min}$
	Expansibilidade	$\leq 10 \text{ mm}$

Na tabela 3 encontram-se os valores das características mecânicas do cimento.

Tabela 3- Características Mecânicas do cimento utilizado

Resistência à compressão (Mpa)	
Resistência aos 2 dias	Resistência aos 28 dias
20,0	42,5

3.2.2 Água

A água utilizada na amassadura é a mesma que se deve adicionar à mistura da argamassa durante esta.

As regras estabelecidas no LNEC E-372 em relação à qualidade são as seguintes:

- Características físico-químicas que a água deve apresentar para poder ser utilizada na amassadura de betões, argamassas e caldas de injeção;
- Critérios de conformidade com vista à sua utilização.

De acordo com a sua origem, a água antes de ser usada na amassadura das argamassas necessita de ser analisada garantindo a sua composição:

- **Águas potáveis:** normalmente não precisam ser analisadas;
- **Águas superficiais e subterrâneas:** devem ser analisadas antes da sua primeira utilização, mas normalmente são consideradas adequadas;
- **Águas residuais industriais:** embora sejam normalmente consideradas adequadas, devem ser analisadas previamente e durante o decorrer dos ensaios;
- **Águas residuais domésticas:** não são consideradas adequadas.

Regra geral, a maior parte das águas potáveis e ainda aquelas que apesar de não o serem, mas não tendo cheiro nem cor, podem ser utilizadas como água de amassadura para as argamassas.

Neste estudo foi utilizada água potável procedente da rede normal de Abastecimento das Águas do Porto.

3.2.3 Areia

A areia utilizada foi uma areia proveniente de um areeiro do Porto, cedido pela empresa EUROMODAL,SA. A análise granulométrica foi feita pelo método da peneiração a seco. Esta análise consiste simplesmente em separar uma amostra do agregado em frações, cada uma contendo partículas com dimensões entre limites correspondentes às aberturas dos peneiros da série base mais a série 1.

Foram utilizados peneiros encaixados uns nos outros de modo a formarem uma coluna de peneiração, arranjados por ordem tal que a malha mais larga esteja na parte superior e os de malha mais apertada na inferior, com fundo e tampa. Foram escolhidos os peneiros da séries base mais série 1, ou seja os peneiros 5,6 mm, 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,250mm, 0,125mm e 0,063mm de abertura.

Efetuiu-se a pesagem total da amostra sujeita á peneiração, sendo esta de 1008g. De seguida passou-se a amostra pela coluna de peneiração e esta foi agitada por um aparelho vibratório, designado por “agitador de peneiros”. Esta imprime aos peneiros movimentos de elevada frequência que viabilizam a peneiração das partículas.



Figura 2 - Agitador de Peneiros

Após a peneiração pesou-se cuidadosamente o material retido em cada um dos peneiros.



Figura 3 - Material retirado em cada um dos peneiros

A seguir às pesagens obtiveram-se os dados pretendidos para o cálculo dos passados acumulados em cada peneiro, o seu registo encontra-se na tabela 4 e o traçado da curva granulométrica no gráfico 1.

Tabela 4 – Percentagem de retidos e passados acumulados

Abertura da malha (mm)	Resíduo no peneiro		Retidos acumulados (%)	Passados acumulados (%)
	g	%		
6,3	1,5	0,15	0,15	99,85
5,6	6	0,6	0,74	99,26
4	50	4,96	5,7	94,3
2	218	21,63	27,33	72,67
1	310	30,75	58,09	41,91
0,5	264	26,19	84,28	15,72
0,25	120	11,9	96,18	3,82
0,125	34	3,37	99,55	0,47
0,063	4	0,4	99,95	0,05
Fundo	0,5	-	-	-

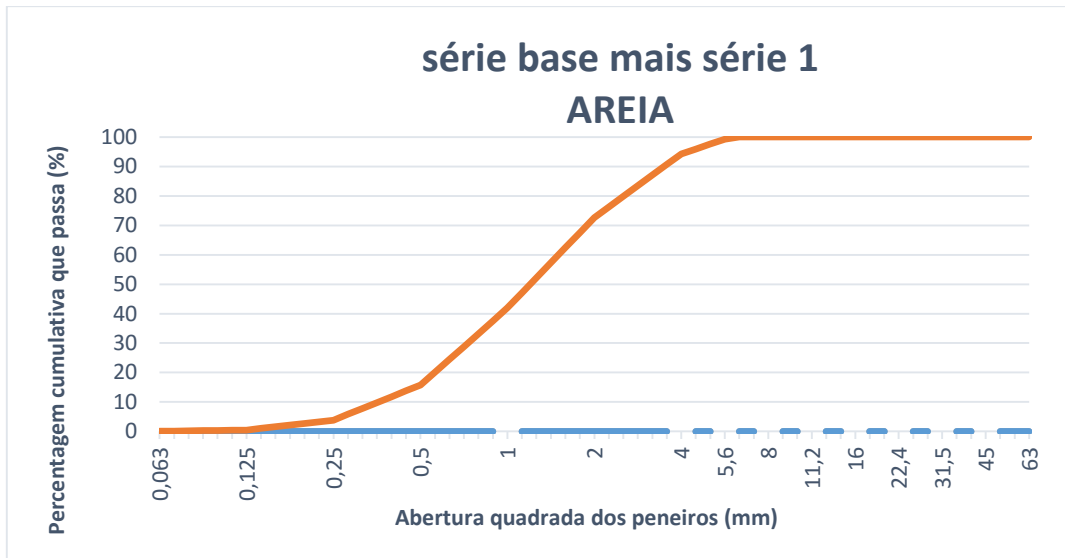


Gráfico 1- Curva granulométrica

3.2.4 Cinza da casca de amêndoa

As cascas de amêndoa foram fornecidas por familiares e agricultores da zona de Torre de Moncorvo. Convém referir que esta é uma zona de produção de amêndoa por excelência apresentando-se como principal fonte de rendimento da população agrícola, consequentemente originando a sua casca como subproduto.



Figura 4 - Cascas de amêndoa

A queima das cascas de amêndoa foi efetuada no Laboratório de Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto. A norma seguida para a realização da queima foi a EN 14775-2009. Inicialmente, pesou-se a amostra de casca de amêndoa que se pretendia queimar. Num primeiro ensaio tentou-se fazer a queima das cascas numa diferente mufla, mas como se pode ver na figura 5, a sua queima provocava muito fumo e foi necessário alterar-se para uma queima com recurso a um sistema com exaustão, figura 6.



Figura 5 - Mufla sem exaustão



Figura 6 - Mufla onde foram queimadas as cascas de amêndoa

Após serem colocadas as cascas de amêndoa na mufla, esta pede um primeiro tempo (time 1) como se verifica na figura 7. Este é o tempo que demora a atingir a temperatura que se pretende. Neste caso colocaram-se 45 minutos, seleccionando os botões de + ou -.



Figura 7 - Introdução do time 1

De seguida, teve-se de escolher a temperatura de combustão (T1). Em primeiro lugar começou-se por 500°C, mas chegou-se à conclusão que não era suficiente, por tentativas seleccionou-se 900°C. Este valor como já era mais que suficiente, usou-se então a temperatura de 850°C para a combustão das cascas. Posteriormente é pedido um segundo tempo (time 2), que é o tempo que as cascas se vão encontrar em combustão, figura 8.



Figura 8 – Introdução do time 2

Foi pedido a seguir um tempo de espera para o arrefecimento da mufla, neste caso, o tempo selecionado foi 0. Por fim carregou-se no botão de START e no botão de extração de vapor e iniciou-se a combustão.

Após a combustão, retiraram-se as cascas da mufla e deixou-se arrefecer num dessecador fechado, figura 9. Um dessecador é um recipiente fechado que contém um agente de secagem chamado dessecante. As cinzas foram pesadas (figura 10), para depois se calcular o rendimento das cascas como se pode verificar na tabela 5.



Figura 9 - Dessecador fechado



Figura 10 - Cinzas de casca de amêndoa

Tabela 5 – Rendimento das cascas de amêndoa

Cascas de amêndoa (g)	Cinzas de cascas de amêndoas (g)	Rendimento (%)
249,62	2,51	1,01
272,29	29,78	10,94
240,84	2,35	0,98
274,63	3,52	1,28
300,54	3,92	1,30
305,6	10,43	3,41
259	7,1	2,74
252,3	4,1	1,63
234,5	4,3	1,83
256,8	5,3	2,06

Como de pode verificar na tabela 5, o rendimento das cascas de amêndoa em cinza é muito baixo.

Posteriormente, moeram-se as cinzas produzidas na combustão (figura 11).



Figura 11 - Cinzas de casca de amêndoa moídas

3.2.4.1 Análise química por Fluorescência de Raios-X.

A análise química foi efetuada no Laboratório de Geotecnia do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

A análise por fluorescência de raios-X, FRX, é um método de análise química elementar, isto é, apenas dá informação sobre os elementos químicos constituintes da amostra e nada sobre análise estrutural da amostra, ou seja, sobre a forma como os elementos químicos constituintes da amostra se organizam em cristais ou outros compostos químicos.

Esta análise consistiu na peneiração de uma pequena amostra de cinzas como ilustra a figura 12. As cinzas foram moídas uma segunda vez para poderem passar nas malhas dos peneiros. Os peneiros utilizados foram 2mm, 250 μ m e 125 μ m. Posteriormente colocaram-se num recipiente e compactaram-se, figura 13. Este foi então introduzido na máquina para a avaliação da sua composição química, figura 14.

Apesar da análise por FRX ser um método pouco informativo, é muito usado porque permite detetar com uma só análise os diferentes elementos químicos presentes na amostra, além disso envolve equipamento relativamente acessível.



Figura 12 - Peneiração de uma pequena amostra de cinzas



Figura 13 - Preparação da amostra de cinzas para a análise química



Figura 14 - Máquina de análise química



Figura 15 - Registo da composição química da amostra

Após a análise, foram registados os valores da composição química. Estes foram inseridos numa folha de Excel confeccionada para o efeito, para que estes elementos constituintes da cinza nos mostrem a sua percentagem em óxidos. Foram realizados duas análises com duas diferentes amostras de cinza de casca de amêndoa. Os valores obtidos encontram-se na tabela 6. Na tabela 7, encontra-se os valores dos elementos químicos presentes no cimento de Portland, fornecida pela SECIL. A tabela 8, mostra a comparação dos elementos químicos presentes no cimento de Portland e na CCA.

Tabela 6 - Composição química da cinza de casca de amêndoa

Elementos Químicos	CCA (%)	CCA 1 (%)	CCA Média (%)	Desvio Padrão
CdO	0,000	0,002	0,001	0,001
WO	0,000	0,009	0,005	0,005
NiO	0,000	2,420	1,210	1,210
Cr ₂ O ₃	0,000	0,086	0,043	0,043
CaO	5,898	5,154	5,526	0,372
CuO	0,033	0,024	0,029	0,005
Fe ₂ O ₃	0,407	0,889	0,648	0,241
K ₂ O	41,896	27,328	34,612	7,284
MnO	0,057	0,043	0,050	0,007
P ₂ O ₅	2,060	1,444	1,752	0,308
Rb ₂ O	0,019	0,009	0,014	0,005
SO ₃	0,734	0,392	0,563	0,171
SiO ₂	3,220	2,706	2,963	0,257
SrO	0,050	0,021	0,036	0,015
TiO ₂	0,033	0,035	0,034	0,001
V ₂ O ₅	0,009	0,000	0,005	0,005
Cl	0,000	0,061	0,031	0,031

Tabela 7 - Composição média do cimento Portland I 42.5R produzido pela SECIL

Perda ao fogo	3.08%
SiO₂	20.06%
Al₂O₃	4.93%
Fe₂O₃	3.11%
CaO	61.71%
MgO	2.20%
SO₃	3.26%
Cloretos	0.003%
Resíduo insolúvel	1.60%

Tabela 8 – Comparação dos valores dos elementos químicos do cimento de Portland e CCA.

	Elementos do Cimento de Portland (%)	Elementos da CCA (%)
SiO₂	20,060	2,963
Fe₂O₃	3,110	0,648
CaO	61,710	5,526
SO₃	3,260	0,563
Cloretos	0.003	0,031

Como se pode verificar na tabela 8, as quantidades dos elementos que constituem o cimento de Portland somando as percentagens dos diferentes elementos dá 100%, já em relação aos elementos constituintes das cinzas de casca de amêndoa que constituem a CCA a soma das percentagens dá aproximadamente 43%. Apesar da CCA conter quase todos os elementos que o cimento Portland possui, em termos de quantidades fica muito aquém do esperado.

Analisando a tabela 5, a percentagem de sílica (SiO₂) é muito reduzida, encontrando-se abaixo dos valores recomendados pela norma de adição das cinzas volantes, assim como

outras pesquisas (Cincotto, 1988; Prudêncio & Santos, 1997; Jonh et al., 2003) para que uma cinza apresente reatividade pozolânica. Na avaliação da reatividade pozolânica de uma adição mineral é fundamental realizar uma análise química completa, e na sua constituição o material deverá sempre apresentar a sílica como elemento predominante (Jonh et al., 2003).

Pela análise química pode-se verificar que existe uma grande quantidade de potássio (K_2O), 41.90%. Este elemento designado de alcalino, pode prejudicar o desempenho dos produtos à base de cimento (Neville, 1997; Mehta & Monteiro, 1994). Podem provocar a decomposição do betão e influenciar a velocidade do aumento da resistência mecânica desse material. No entanto, pode-se dizer que quanto maior o teor de material alcalino, menor a evolução da resistência mecânica. Na generalidade, aumentam as resistências iniciais e diminuem as finais.

Um dos maiores problemas relativos à presença de álcalis no ligante está relacionado com a reação álcalis-sílica. Para que esta reação se verificar, têm de se constatar três condições:

- Humidade suficiente;
- Fluido que circula nos poros com álcalis (Na;K) e iões de cálcio (Ca_2^+) suficientes;
- Quantidade mínima de sílica reativa.

A reação inicia com uma ataque à sílica não perfeitamente cristalizada pelos hidróxidos alcalinos da solução intersticial que circula nos poros e fendas do betão. É formado um gel de silicatos alcalinos como resultado, quer em planos de debilidade ou nos poros do agregado onde existe sílica reativa, ou então, à superfície das partículas do agregado. O gel de silicatos alcalinos é expansivo permitindo a passagem para o seu interior de molécula de água. Assim sendo, encontrando-se este gel confinado pela pasta de cimento, advêm tensões internas cada vez mais elevadas até, eventualmente, provocarem expansões, fissurações e roturas na pasta

de cimento. A criação deste gel de silicatos alcalinos, pensa-se que só se deve verificar na presença de iões cálcio. Apesar de a reação álcalis-sílica possa assumir proporções consideráveis, esta pode levar bastante tempo a manifestar-se em termos de deterioração do betão (Coutinho, 2006).

Deve-se salientar que a análise química só por si só não permite avaliar a qualidade da cinza. É necessário por exemplo, que a sílica e o alumínio sejam reativos, devendo estes elementos ácidos fixar o CH libertado na hidratação do cimento Portland (Petrucci, 1995).

Pode-se afirmar portanto, que para a análise química elementar seria necessário fazer uma análise química segundo a norma NP EN 196-1, às CCA.

No entanto outra possibilidade seria analisar as CCA como filer devido á sua granulometria e superfície específica. O filer é um material com uma granulometria inferior a 63 μm , sensivelmente com a mesma finura que o cimento de Portland, contribuindo deste modo para uma melhoria da trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade ou exsudação da argamassa e /ou betão (Neville 1997).

Segundo a NP EN 197-1, o filer calcário presente nos cimentos correntes obedece aos seguintes requisitos:

- O teor de carbonato de cálcio (CaCO_3), calculado a partir do teor de óxido de cálcio, deve ser pelo menos 75 % em massa;
- O teor de argila, determinado pelo ensaio do azul de metileno, segundo a NP EN 933-9, não deve exceder 1,20 g/100 g. (Para este ensaio, o calcário deve ser finamente moído a uma finura de aproximadamente 500 m^2/kg determinada como superfície específica segundo a NP EN 196-6, *Blaine*);

- O teor de carbono orgânico total (TOC), quando ensaiado de acordo com EN 13639, deve estar conforme com um dos seguintes critérios:
 - LL: não deve exceder 0,20 % em massa;
 - L: não deve exceder 0,50 % em massa (NP EN 197-1, 2012).

Estes requisitos teriam que ser confirmados. Este seria um trabalho a fazer no futuro.

3.2.5 Adjuvante

Foi utilizado um adjuvante fornecido pela empresa Euromodal do tipo superplastificante com designação Woerment FM 697. O desempenho deste encontra-se na tabela 9. Este é adicionado à água da mistura, durante a amassadura da argamassa.

Tabela 9 - Valores de desempenho do adjuvante

Características essenciais	Desempenho
Teor de Cloretos	$\leq 0,1\%$ em massa
Teor de álcalis	$\geq 1,2\%$ em massa
Comportamento à corrosão	Contém apenas componentes aprovados da EN 934-1; 2008, Anexo A.1
Resistência à compressão	Q 3.1 (2) Para igual consistência A.1 d: resistência à compressão do betão de ensaio $\geq 140\%$ da do betão de controlo; Aos 28 d: resistência à compressão do betão de ensaio $\geq 115\%$ da do betão de controlo.
	Q 3.2 (3) Para igual razão A/C Aos 28 d: resistência à compressão do betão de ensaio $\geq 90\%$ da do betão de controlo.
Redução de água	Redução da quantidade de água do betão de ensaio ≥ 125 da quantidade de água do betão de controlo.
Teor de ar do betão fresco (ar induzido)	Teor de ar do betão de ensaio é $\leq 2\%$ (em volume) acima do teor de ar do betão de controlo.
Consistência	Q 3.2 (1) Para igual consistência Aumento do abaixamento $\geq 120\text{mm}$ em relação aos (30 ± 10) mm iniciais; Aumento do espalhamento $\geq 160\text{mm}$ em relação aos (350 ± 20) mm iniciais.
	Q 3.2 (2) para igual razão A/C 30 min após adicionar o adjuvante, a consistência do betão de ensaio não desce abaixo da consistência inicial do betão de controlo.
Substâncias perigosas	NPD (Desempenho não declarado)

3.3. Em pasta de ligante

3.3.1 Ensaio de determinação do tempo de presa

Com o objetivo de avaliar a influência dos substitutos parciais do cimento, realizou-se o ensaio de determinação do tempo de presa. Este é normalizado pela norma NP EN 196-3. Consiste em medir a distância de uma pasta de cimento à penetração de uma agulha com 1 mm² de seção, sob ação de um peso de 30g. São identificados dois períodos para o tempo de presa: início e fim. O primeiro é o tempo que passa entre a amassadura e a perda de plasticidade, e o fim de presa é o tempo que se precisa para que a pasta adquira firmeza suficiente para resistir a uma determinada pressão (Coutinho, 2006).

Em primeiro lugar, antes de avaliar o início e fim de presa realizou-se a pasta de consistência normal seguindo a norma NP EN 196-3. Através de tentativas, adicionou-se diferentes quantidades de água até a pasta colocada no molde tronco-cônico resistir à penetração de uma sonda normalizada (10 mm de diâmetro) sobreposta ao aparelho de Vicat para que a sonda penetre na pasta até uma distância de 6 ± 1 mm da base.

Após obtida a pasta de consistência normal, determina-se o início de presa. Foram realizadas leituras em intervalos de tempo sucessivos, com o aparelho de Vicat dotado da agulha de Vicat, até ao momento em que a agulha não conseguiu perfurar a pasta até ao fundo, ficando a 6 ± 1 mm da base. Nesse instante, registou-se o tempo decorrido, que é considerado o tempo de início de presa. Em relação ao tempo de fim de presa, para o determinar é usada uma agulha idêntica à utilizada anteriormente mas dotada de um anel de 5mm de diâmetro de maneira a deixar a extremidade da agulha a 0,5 mm para além da aresta do anel. A partir do momento que a agulha assenta na superfície do bloco de ensaio e deixa a sua marca sem o anel deixar qualquer sinal, significa que a agulha penetrou menos de 0,5 mm. Esse tempo decorrido é o tempo de fim de presa.



Figura 16 – Ensaio de penetração

3.4 Em argamassas

3.4.1 Composição e confecção da argamassa

O presente trabalho, centrou-se na realização de três tipos de argamassas: ARF (argamassa de controlo), CCA 1,5% (1,5% de substituição do cimento por cinza de casca de amêndoa) e CCA 5% (5% de substituição do cimento por cinza de casca de amêndoa). Para tal, calcularam-se as composições de água, areia e cimento para um traço de 1:3:0,5, encontrando-se as quantidades obtidas de materiais necessários para cada amassadura na tabela 10. Manteve-se esse traço em peso constante, para ser possível comparar o desempenho das argamassas e a razão entre água/ligante e trabalhabilidade também aproximadamente iguais à de argamassa de controlo de modo a obter-se um maior rigor de resultados.

Tabela 10 – Composição das argamassas

Material	ARF	CCA 1,5%	CCA 5%
Cimento CEM I 42,5R, (g)	450	443,25	427,5
Cinza de casca de amêndoa, CCA, (g)	-	6,75	22,5
Areia fina (g)	1350	1350	1350
Água (ml)	225	225	225
Adjuvante	1,35	1,35	1,35
W/C	0,5	0,5	0,5

Para cada tipo de argamassa foram confeccionados provetes prismáticos normalizados (40×40×160 mm). O procedimento de fabrico dos provetes foi baseado na norma NP EN 196-1. A confeção das amassaduras das argamassas a testar foi realizada em 4 minutos de acordo com a norma. Logo após a amassadura destas procedeu-se ao ensaio de avaliação da trabalhabilidade. A figura 17 ilustra a distribuição dos tempos de amassadura.

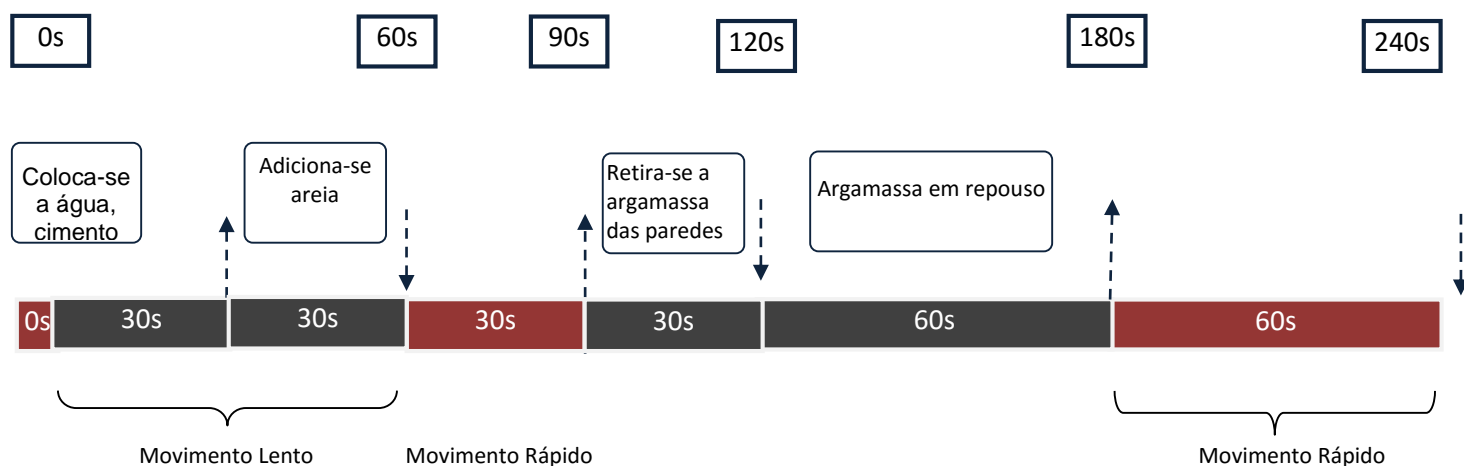


Figura 17 - Mapa de distribuição dos tempos de amassadura

3.4.2 Avaliação da trabalhabilidade

O conceito de trabalhabilidade está relacionado com a maior ou menor facilidade de execução do betão (transporte, colocação, compactação e acabamento) e a maior ou menor facilidade de segregação durante essas operações (Coutinho, 2010).

Esta avaliação de trabalhabilidade, seguiu o procedimento descrito nas normas ASTM C 190/90 e a NP EN 12350-5.

O ensaio em causa consiste na colocação da argamassa normalizada num molde troncocónico em duas camadas, sendo cada uma destas compactada com um pilão com 20 pancadas. Em seguida, e retirado o molde troncocónico, submeteu-se a argamassa ao espalhamento, com 25 quedas da mesa de espalhamento durante 15 segundos. Posto isto, foram medidos 3 diâmetros de espalhamento em 3 direções diferentes. A média aritmética destas 3 medições é designada por diâmetro de espalhamento.

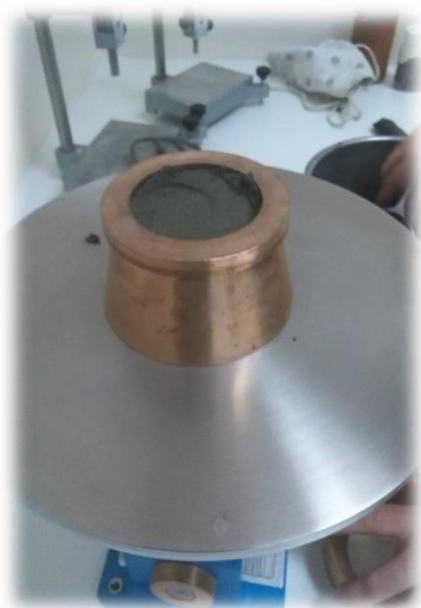


Figura 19 - Colocação da argamassa no molde troncocónico



Figura 18 – Medição do diâmetro de espalhamento

3.4.3 Fabrico dos provetes

Para o fabrico dos provetes, encheu-se o molde em duas camadas aproximadamente iguais. Cada camada foi compactada no compactador com 60 pancadas (figura 21). Quando cada camada acaba de ser compactada, a superfície é regularizada com movimentos de serrilha com o auxílio de uma régua.

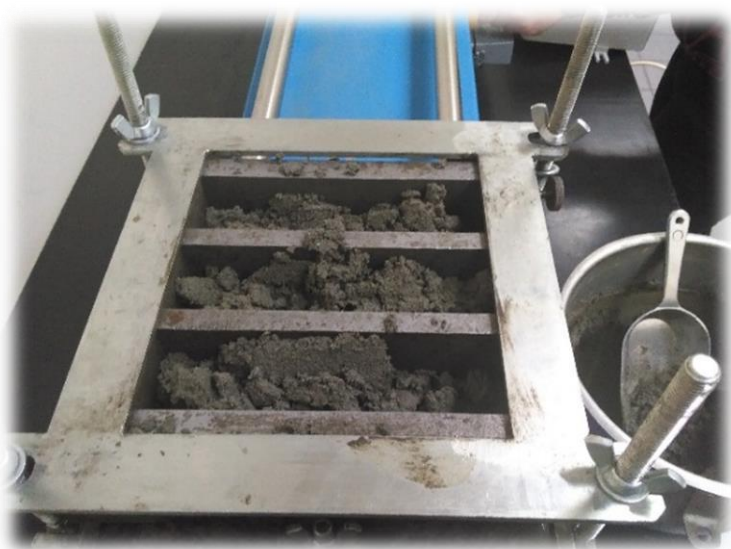


Figura 20 - Enchimento do molde com a argamassa



Figura 21 - Compactação da argamassa no compactador

Depois de moldar os respetivos moldes, estes permaneceram cerca de 24 ± 2 horas, de acordo com a norma NP EN 196-1, nos mesmos. Terminado este prazo, os provetes foram desmoldados e colocados na câmara de cura à temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.



Figura 22 – Moldagem dos provetes



Figura 23 – Câmara de cura

3.4.3 Resistências mecânicas

Os ensaios de resistências mecânicas são importantes para a caracterização do material do ponto de vista estrutural. Foram realizados ensaios de resistência mecânica à flexão e compressão de acordo com a norma NP EN 196-1. Os provetes foram inicialmente ensaiados à flexão de modo a obter-se os meios primas e posteriormente realiza-se o ensaio à compressão. Foram realizados ensaios para idades de 3,7,14, 28 e 41 dias.

3.4.3.1. Ensaio à flexão

Inicialmente cada um dos provetes foi pesado para se poder calcular a massa volúmica da argamassa endurecida. Posto isto, ligou-se a máquina para iniciar os ensaios e posiciona-se a alavanca na posição de flexão. Ligou-se o aparelho e configura-se para o ensaio à flexão. O provete foi colocado no prato correspondente e ajustou-se o prato superior com a ajuda da alavanca. Elevou-se esta para dar início ao ensaio. Durante o ensaio a velocidade foi controlada de modo a esta não exceder 50 ± 10 N/s. No fim do ensaio foram registados os valores obtidos para a resistência e força máximas.



Figura 24 – Ensaio à flexão

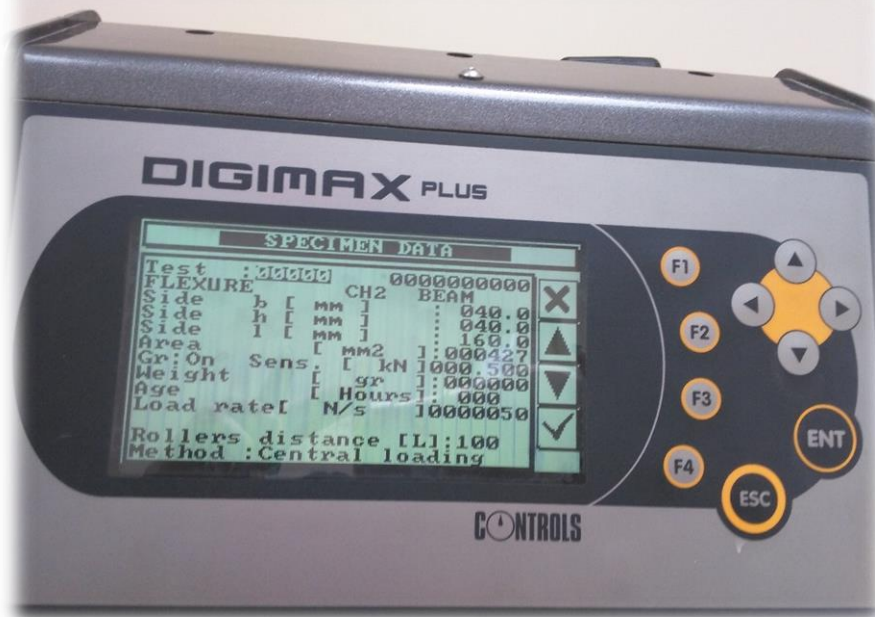


Figura 25 – Introdução dados na máquina para o ensaio



Figura 26 – Provetes após o ensaio à flexão

Recorreu-se á seguinte fórmula, estabelecida na norma NP EN 196-1:2006 pra o cálculo da tensão máxima à flexão de cada provete:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

R_f – Resistência à flexão, em Newtons por milímetro quadrado;

F_f – Carga aplicada ao centro do prisma na rotura, em Newtons;

l – Distância entre os apoios, em milímetros;

b – Lado da secção quadrada do prisma, em milímetros.

3.4.3.2 Ensaio à compressão

No fim do ensaio à flexão é realizado o ensaio à compressão de acordo com a norma NP EN 196-1:1996 para a determinação da resistência máxima em cada metade do provete de argamassa utilizado no anterior ensaio.



Figura 27 - Ensaio à compressão

O processo é igual ao ensaio de flexão, mas tem que se posicionar a alavanca na posição de compressão e configurar o aparelho para este ensaio. O provete foi colocado no prato e ajustou-se o prato superior com o auxílio da alavanca. Deu-se início ao ensaio com o elevar da alavanca. No decorrer deste ensaio a velocidade é controlada de modo a que esta não exceda 2000 N/s. Os valores obtidos no final do ensaio são posteriormente anotados para a resistência e força máximas de compressão.

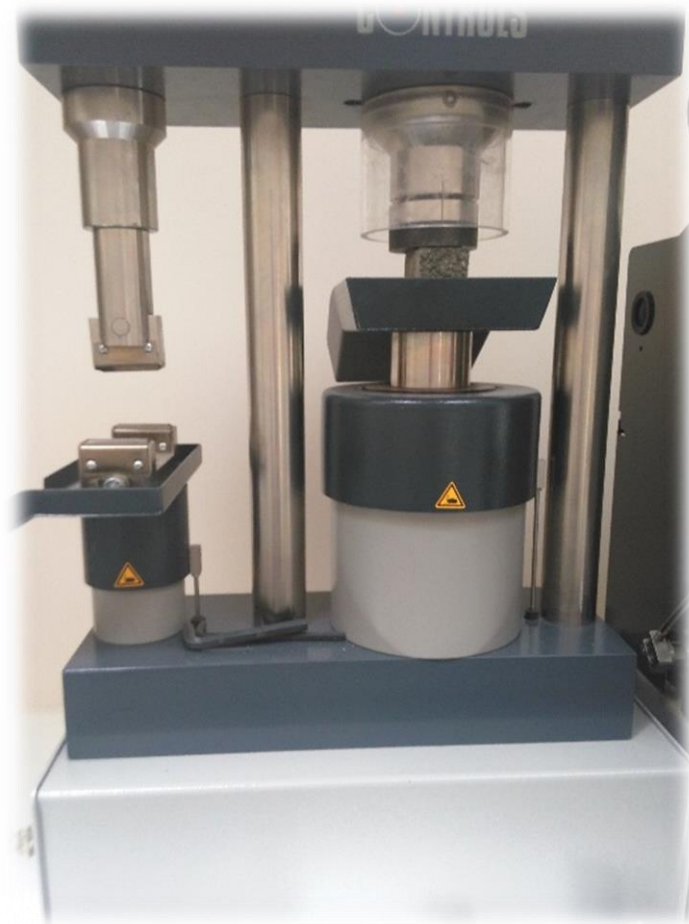


Figura 28 - Ensaio à compressão

Para o cálculo da tensão máxima à compressão de cada provete foi utilizada a também a seguinte fórmula estabelecida na norma NP EN 196-1:2006:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

R_c – Resistência à compressão, em Newtons por milímetro quadrado;

F_c – Carga máxima na rotura, em Newtons;

1600 – Área dos pratos ou das placas auxiliares, em milímetros quadrados.

4 Apresentação e Discussão dos Resultados

4.1 Apresentação dos resultados

4.1.1 Tempo de início e fim de presa

A Tabela 11, apresenta os tempos de presa obtidos para a argamassa CCA com 1,5% de substituição de cimento.

Tabela 11 - Tempo de início e fim de presa

Pasta	W/C	Tempo de início de presa	Tempo de fim de presa
CCA 1,5%	0,355	4h48min	6h20min

Apenas foi possível determinar o tempo de início e fim de presa para uma pasta CCA 1,5%, devido à falta de material.

4.1.2 Avaliação da trabalhabilidade

Os resultados obtidos no ensaio de avaliação da trabalhabilidade para as diferentes argamassas foram os seguintes:

Tabela 12 – Valores da avaliação da trabalhabilidade das diferentes argamassas

Argamassa	Ensaio	Diâmetros de espalhamento (mm)			Trabalhabilidade	Desvio Padrão
ARF	04-05-2015	19,50	20,00	20,50	20,00	0,50
ARF	04-05-2015 (com plastificante)	27,00	26,40	27,00	26,80	0,35
CCA 1,5 %	04-05-2015 (com plastificante)	23,00	22,70	22,50	22,70	0,25
CCA 1,5%	04-05-2015 (com plastificante)	15,40	15,00	15,00	15,10	0,23
CCA 5 %	04-05-2015	22,00	22,30	22,00	22,10	0,17
ARF	05-05-2015	28,00	28,00	28,00	28,00	0,00
ARF	05-05-2015	27,50	29,00	28,50	28,30	0,76
CCA 1,5%	05-05-2015	22,50	22,40	22,40	22,40	0,06
CCA 1,5%	05-05-2015	29,00	28,00	29,50	28,80	0,76
CCA 5 %	05-05-2015	16,80	16,60	17,00	16,80	0,20
CCA 5 %	05-05-2015	26,50	27,00	27,50	27,00	0,50
ARF	06-05-2015	28,00	28,40	28,20	28,20	0,20
CCA 1,5 %	06-05-2015	28,00	29,00	28,00	28,67	0,58
CCA 5 %	06-05-2015	27,00	27,00	27,00	27,00	0,00

Através da análise da tabela 12, pode-se concluir que o uso de CCA como adição em cimento no fabrico de argamassas quase não interfere na trabalhabilidade destas. Verifica-se que na generalidade a trabalhabilidade diminui ligeiramente. Visto que a trabalhabilidade demonstrada pelas amassaduras com CCA é bastante semelhante às confirmadas pela ARF, conclui-se que é de fácil manuseamento.

4.1.3 Ensaio aos 3 dias

Realizaram-se os provetes conforme o procedimento descrito na norma NP EN 196-1:2006, referido anteriormente. Em anexo encontram-se os valores das resistências mecânicas da ARF, CCA 1,5% e CCA 5%. O quadro e os gráficos a seguintes resumem os valores obtidos. A tabela 13 apresenta os valores da massa volúmica média de cada provete, bem como o

gráfico 2. A tabela 14 e os gráficos 3 e 4 apresentam os valores médios das resistências mecânicas aos 3 dias. A confeção dos provetes foi realizada dia 4/5/15 e o ensaio foi realizado dia 6/05/15.

Tabela 13 - Valores médios da massa volúmica aos 3 dias

Provete	Massa volúmica média (kg/m ³)
ARF	2284,74
CCA 1,5 %	2216,25
CCA 5,0%	2153,984

O maior registo de massa volúmica foi na ARF (2284,740 kg.m⁻³), vindo a diminuir com aumento de percentagem de cinza, como se pode confirmar pelo gráfico 2.

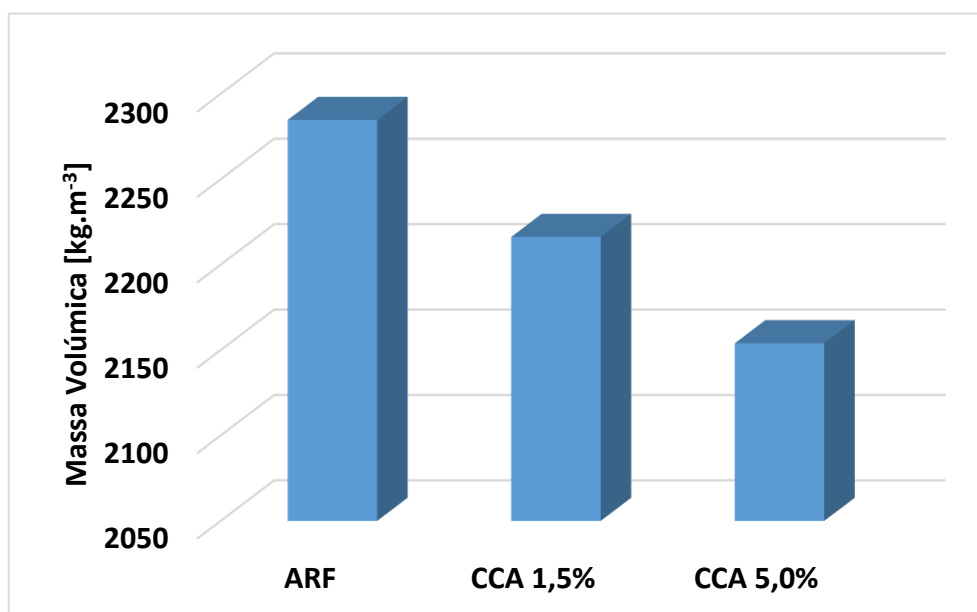


Gráfico 2 – Valores médios da massa volúmica aos 3 dias

Tabela 14 - Valores médios das resistências mecânicas aos 3 dias

Provete	Resistência à flexão (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
ARF	4,216	23,805
CCA 1,5 %	4,575	24,379
CCA 5%	4,654	18,041

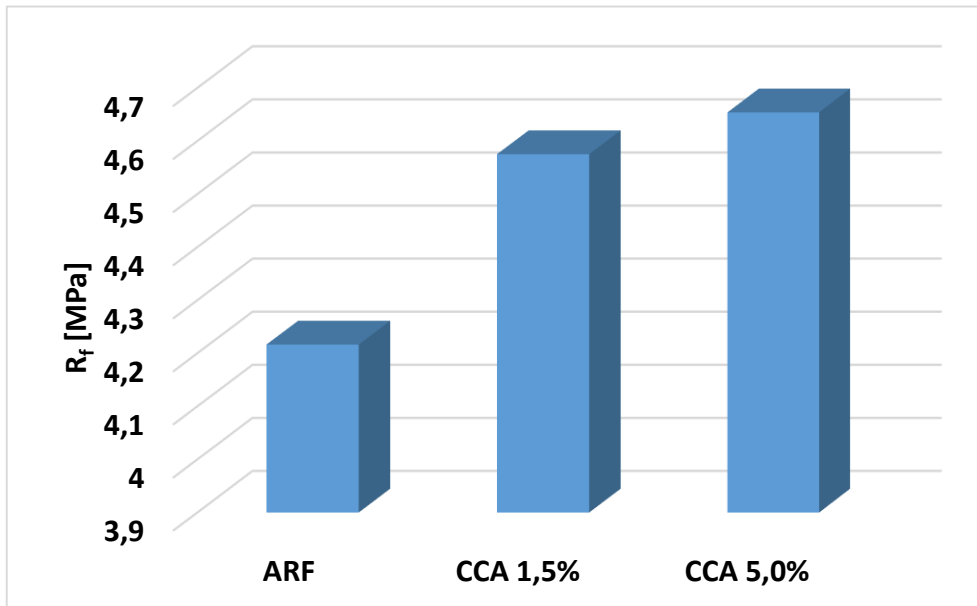


Gráfico 3 - Valor médio da resistência à flexão aos 3 dias

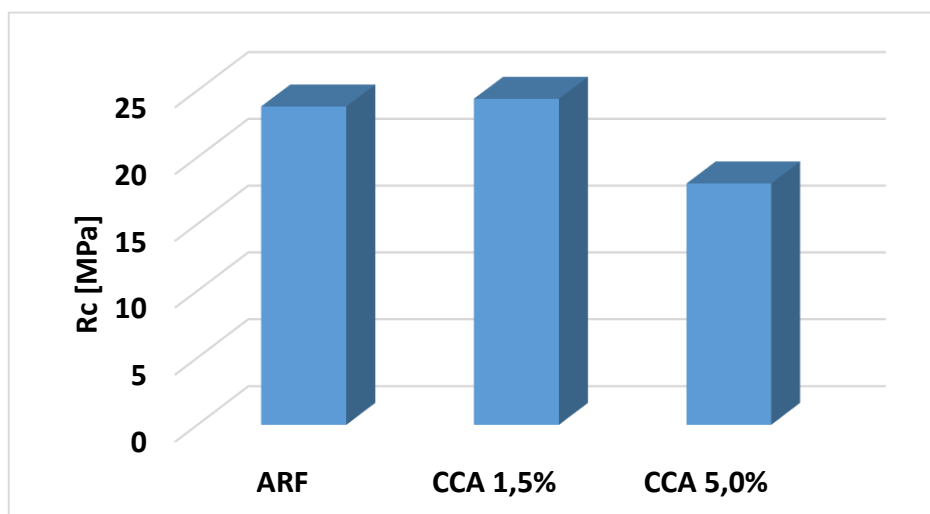


Gráfico 4 - Valor médio da resistência à compressão aos 3 dias

A CCA 5% apresentou os maiores valores de resistência à flexão (4,654 MPa), seguida da CCA 1,5% (4,575 MPa) e da ARF (4,216 MPa).

Já em relação à resistência à compressão a CCA 1,5% apresentou o menor valor (18,041MPa), enquanto a CCA 5,0% registou a maior resistência (24,370 MPa), seguida da ARF (23,805 MPa).

4.1.4 Ensaio aos 7 dias

Aqui são apresentados os resultados obtidos no ensaio para as resistências mecânicas e massas volúmicas aos 7 dias, para os 3 tipos de argamassas. A tabela 16 e os gráficos 5 e 6 apresentam os valores médios das resistências mecânicas aos 7 dias. A tabela 15 apresenta a massa volúmica dos diferentes provetes, bem como o gráfico 5. A confeção dos provetes foi realizada dia 5/5/15 e o ensaio foi realizado dia 12/05/15.

Tabela 15 - Valores médios da massa volúmica aos 7 dias

Proвете	Massa volúmica média (kg/m ³)
ARF	2218,422
CCA 1,5 %	2136,871
CCA 5,0%	2192,743

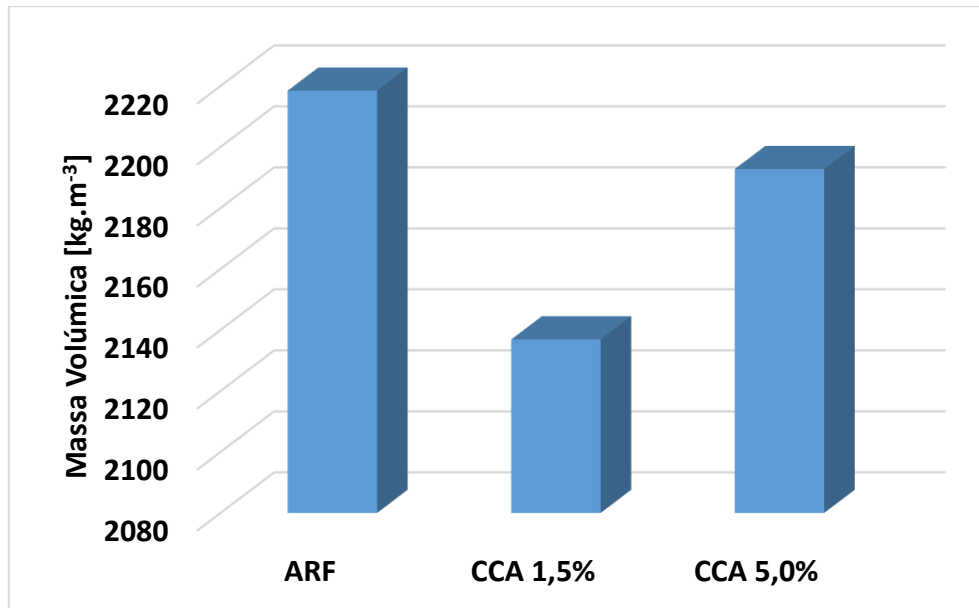


Gráfico 5 - Valor médio da massa volúmica aos 7 dias

Verifica-se que a maior massa volúmica é na ARF (2218,422kg.m⁻³), registando o valor mais baixo com CCA1,5% (2136,871).

Tabela 16 - Valores médios das resistências mecânicas aos 7 dias

Provede	Resistência à flexão (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
ARF	4,008	23,414
CCA 1,5 %	6,124	24,717
CCA 5%	4,33	33,218

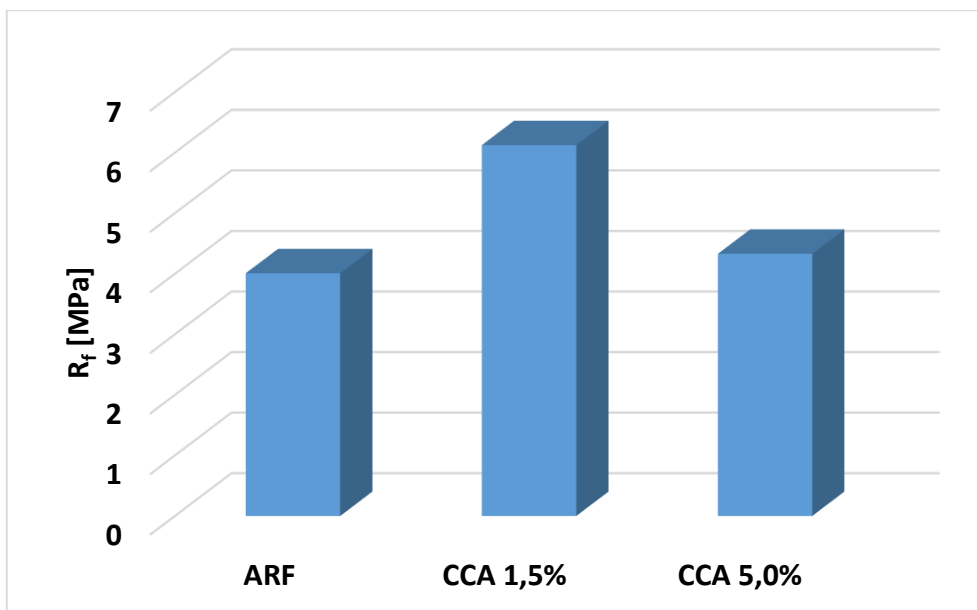


Gráfico 6 - Valor médio da resistência à flexão aos 7 dias

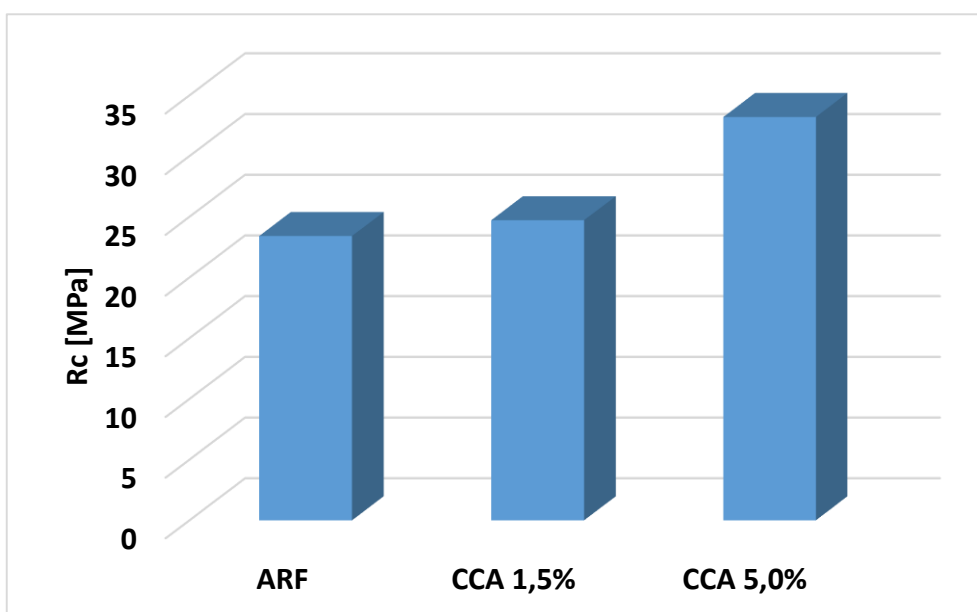


Gráfico 7 - Valor médio da resistência à compressão aos 7 dias

A argamassa ARF apresenta a menor resistência à flexão (4,008 MPa), seguida do CCA 5% (4,330MPa) e por fim com uma maior resistência à flexão a CCA 1,5% (6,124MPa). Em

relação à resistência à compressão a ARF apresentou o menor valor (23,414 MPa), enquanto a CCA 5% registou a maior resistência (33,218 MPa), seguida da CCA 1,5% (24,717 MPa).

4.1.5 Ensaio aos 14 dias

Na tabela e nos gráficos a seguir encontram-se os resultados das resistências mecânicas obtidos para os 3 tipos de argamassas realizadas aos 14 dias. A tabela 17 e o gráfico 8 apresentam as massas volúmicas dos diferentes provetes. A tabela 18 e os gráficos 9 e 10 apresentam os valores médios das resistências mecânicas aos 14 dias. A confecção dos provetes foi realizada dia 5/5/15 e o ensaio foi realizado dia 19/05/15.

Tabela 17 - Valores médios da massa volúmica aos 14 dias

Provete	Massa volúmica média (kg/m ³)
ARF	2226,121
CCA 1,5 %	2202,815
CCA 5,0%	2248,626

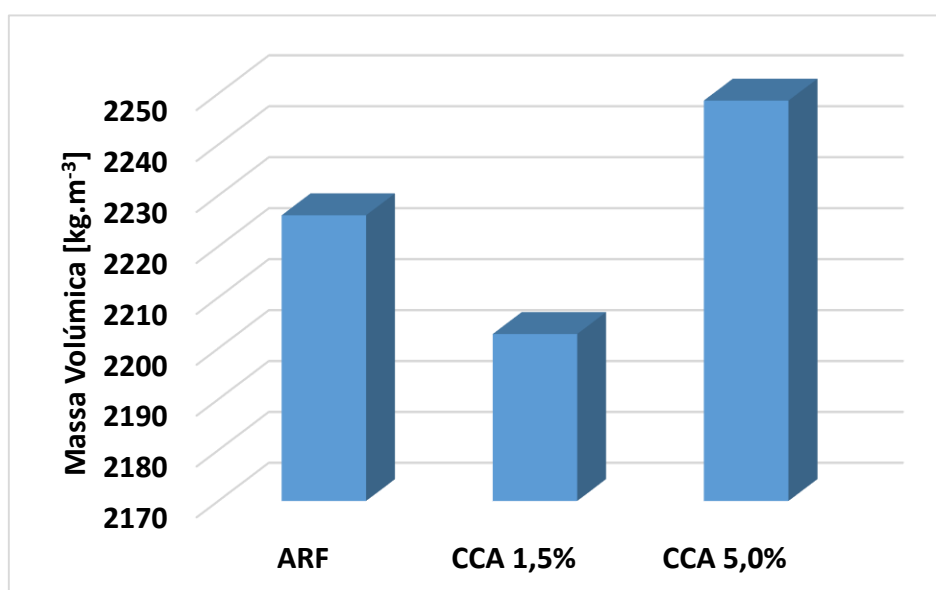


Gráfico 8- Valores médios da massa volúmica aos 14 dias

Verifica-se uma maior massa volúmica na CCA 5% (2248,626 kg.m⁻³).

Tabela 18 - Valores médios das resistências mecânicas aos 14 dias

Provete	Resistência à flexão (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
ARF	4,909	26,977
CCA 1,5 %	6,15	27,224
CCA 5%	5,584	22,725

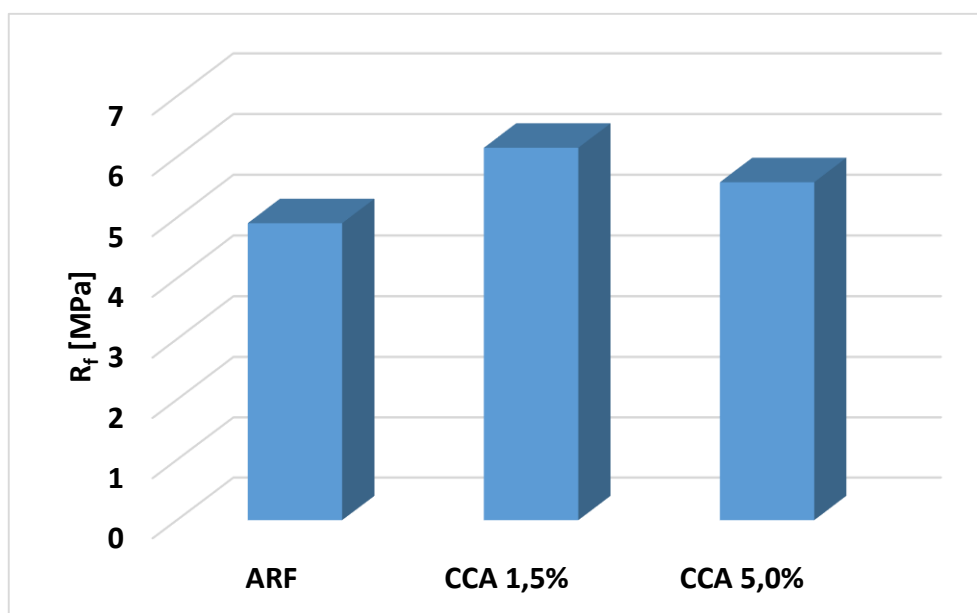


Gráfico 9 - Valor médio da resistência à flexão aos 14 dias

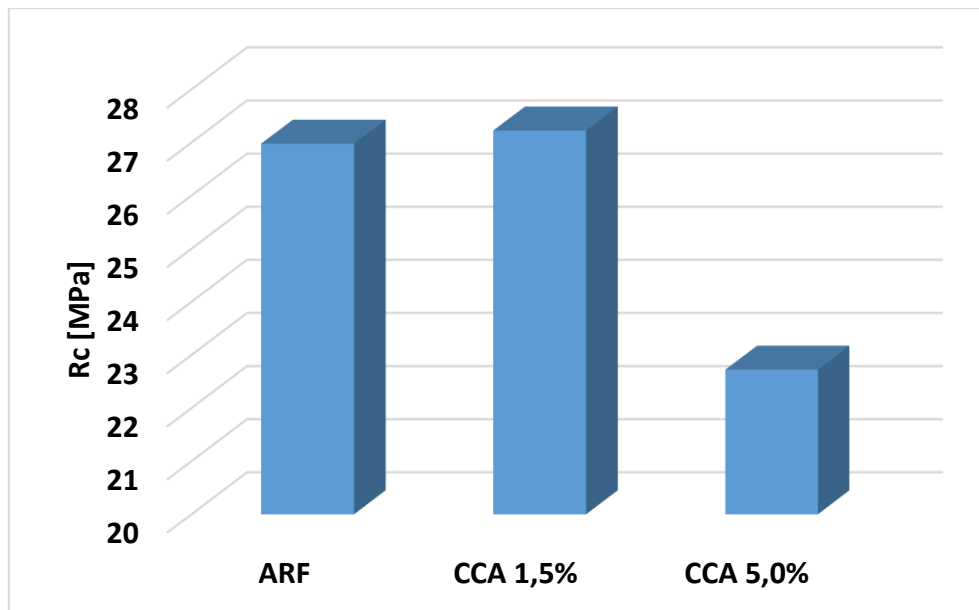


Gráfico 10 - Valor médio da resistência à compressão aos 14 dias

A argamassa CCA 1,5% apresentou os maiores valores de resistência à flexão (6,150 MPa), seguida da CCA 5% (5,584 MPa) e da ARF (4,909 MPa). Já em relação à resistência à compressão a CCA 5% apresentou o menor valor (22,725 MPa), enquanto a CCA 1,5% registrou a maior resistência (27,224 MPa), seguida da ARF (26,977 MPa).

4.1.6 Ensaio aos 28 dias

A seguir encontram-se os resultados obtidos dos ensaios das resistências mecânicas aos 28 dias para os 3 tipos de argamassas confeccionadas. A tabela 20 e os gráficos 12 e 13 apresentam os valores médios das resistências mecânicas aos 28 dias. A tabela 19 e o gráfico 11, apresentam os valores médios das massas volúmicas para os diferentes provetes. A confecção dos provetes foi realizada dia 5/5/15 e o ensaio foi realizado dia 3/06/15.

Tabela 19 - Valores médios da massa volúmica aos 28 dias

Provete	Massa volúmica média (kg/m ³)
ARF	2197,824
CCA 1,5 %	2222,557
CCA 5,0%	2147,561

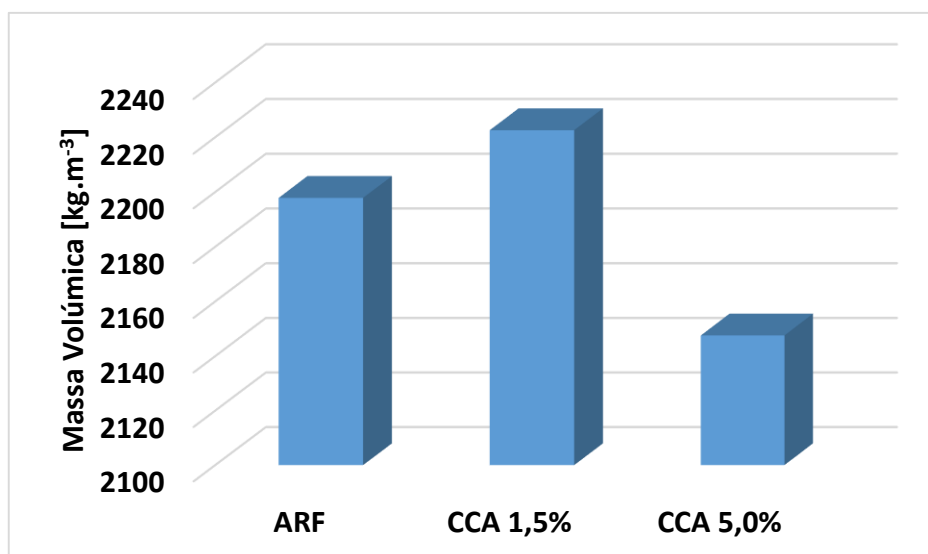


Gráfico 11 - Valores médios da massa volúmica aos 28 dias

Neste caso, o maior valor de massa volúmica registou-se na CCA 1,5% (2222,557 Kg.m⁻³).

Tabela 20 - Valores médios das resistências mecânicas aos 28 dias

Provete	Resistência à flexão (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
ARF	7,702	34,744
CCA 1,5 %	5,759	32,202
CCA 5%	5,642	24,265

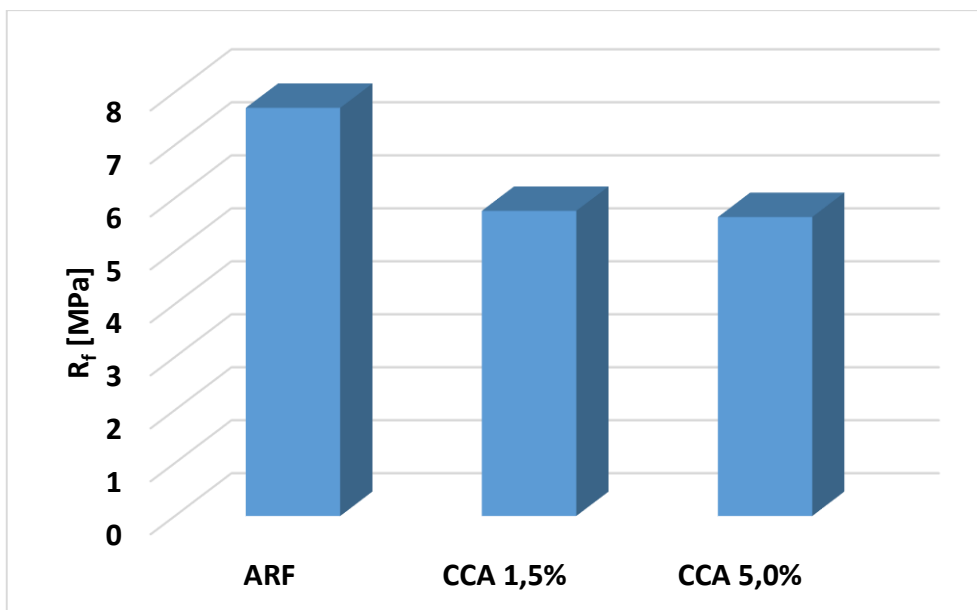


Gráfico 12 - Valor médio da resistência à flexão aos 28 dias

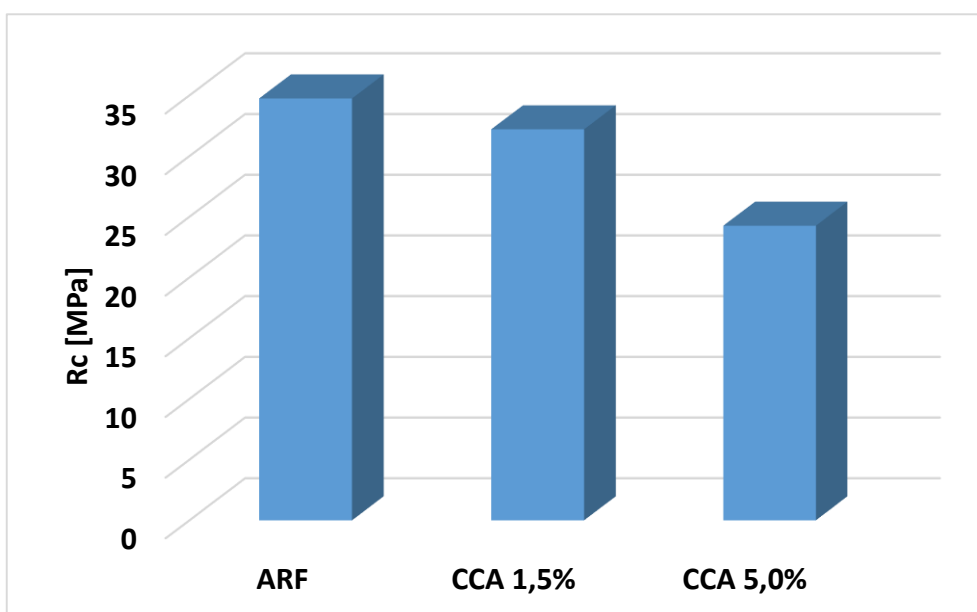


Gráfico 13 - Valor médio da resistência à compressão aos 28 dias

A argamassa ARF apresentou os maiores valores de resistência à flexão (7,702 MPa), seguida da CCA 1,5% (5,759 MPa) e da CCA 5% (5,642 MPa). Já em relação à resistência à

compressão a CCA 5% apresentou o menor valor (24,265MPa), enquanto a ARF registou a maior resistência (34,744 MPa), seguida da CCA 1,5% (32,202 MPa).

4.1.7 Ensaio aos 41 dias

A seguir encontram-se os resultados obtidos dos ensaios das resistências mecânicas aos 41 dias para os 3 tipos de argamassas confeccionadas. A tabela 21 e o gráfico 14 apresentam os valores das diferentes massas volúmicas dos provetes. A tabela 22 e os gráficos 15 e 16 apresentam os valores médios das resistências mecânicas aos 41 dias. A confeção dos provetes foi realizada dia 5/5/15 e o ensaio foi realizado dia 15/06/15.

Tabela 21 - Valores médios da massa volúmica aos 41 dias

Provete	Massa volúmica média (kg/m ³)
ARF	2209,474
CCA 1,5 %	2239,378
CCA 5,0%	2124,467

O maior valor de massa volúmica registou-se na CCA 1,5% (2239,378 Kg.m⁻³).

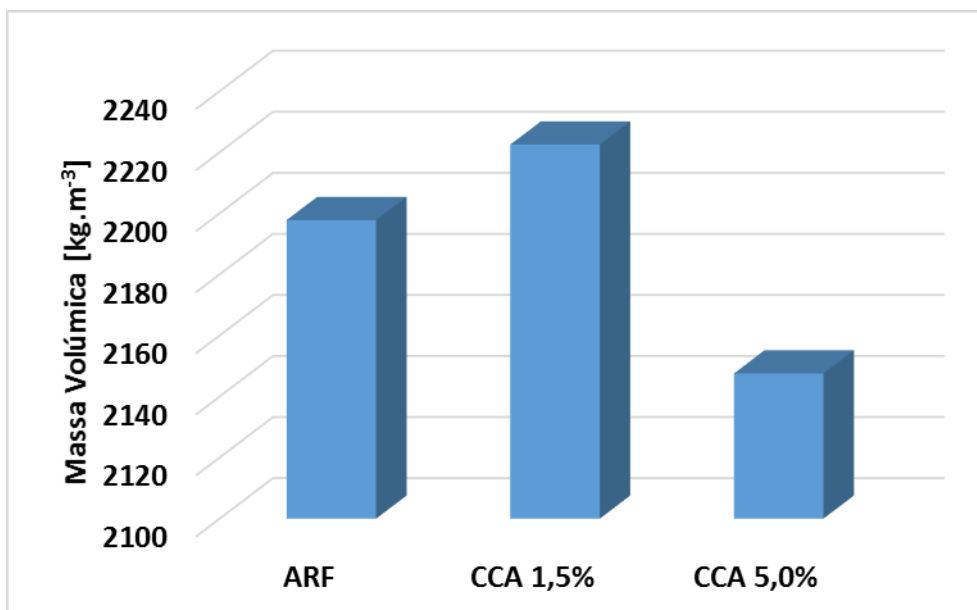


Gráfico 14 - Valores médios da massa volúmica aos 41 dias

Tabela 22 - Valores médios das resistências mecânicas aos 41 dias

Provete	Resistência à flexão (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
ARF	4,377	34,119
CCA 1,5 %	7,987	33,685
CCA 5%	5,881	21,121

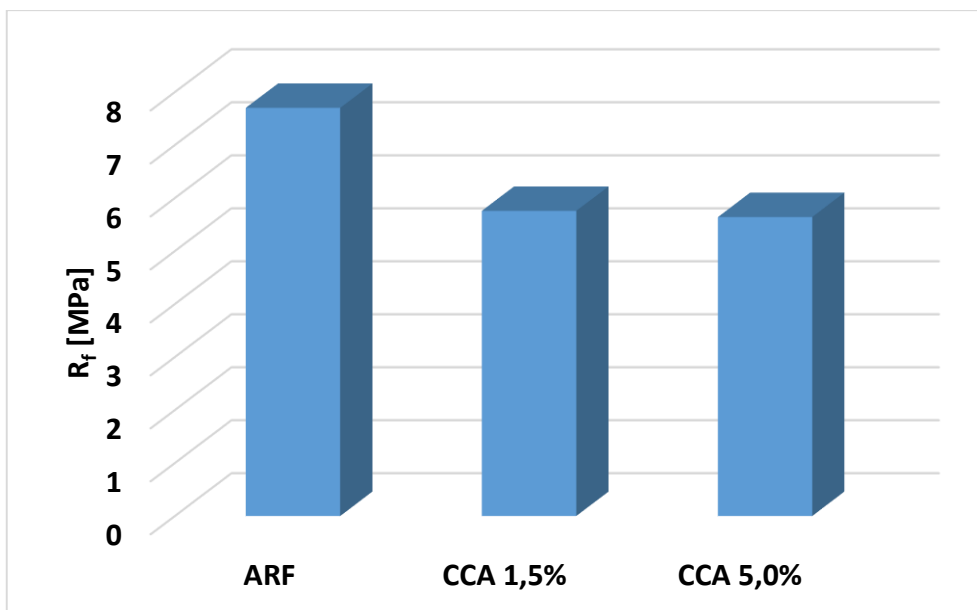


Gráfico 15 - Valor médio da resistência à flexão aos 41 dias

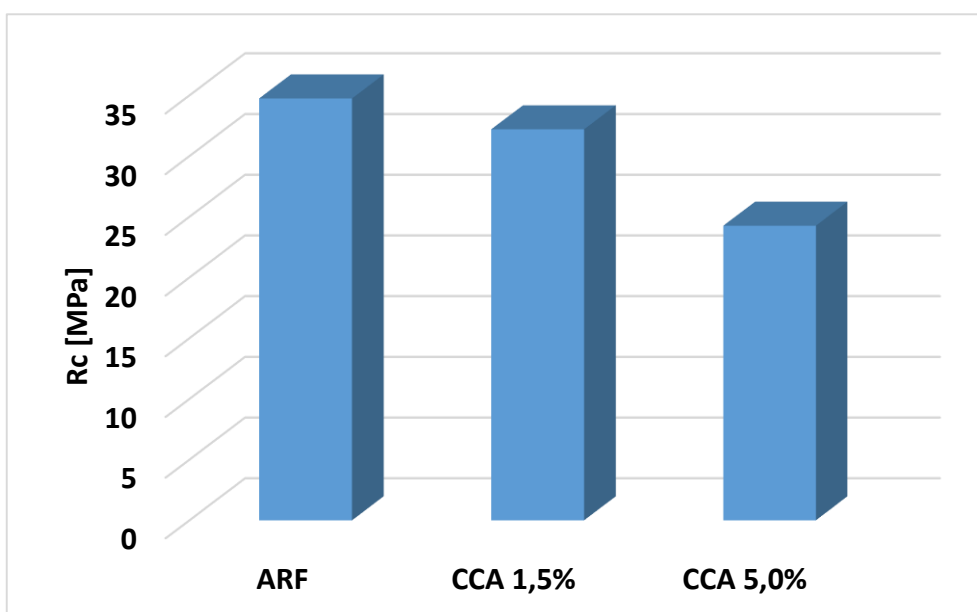


Gráfico 16 - Valor médio da resistência à compressão aos 41 dias

A argamassa CCA 1,5% apresentou os maiores valores de resistência à flexão (7,987 MPa), seguida da CCA 5% (5,881 MPa) e da ARF (4,377 MPa). Já em relação à resistência à

compressão a CCA 5% apresentou o menor valor (21,121MPa), enquanto a ARF registou a maior resistência (34,119 MPa), seguida da CCA 1,5% (21,121 MPa).

4.1.8 Comparação e evolução dos ensaios a diferentes idades

No gráfico 17 que se encontra a seguir são apresentadas a comparação e a evolução dos diversos valores obtidos nos ensaios à flexão nas diferentes idades dos provetes. Verifica-se que a resistência à flexão da CCA 5% diminui em relação à de 1,5% consoante a idade. A ARF aumenta consoante a idade diminuindo a sua resistência ao 41 dias.

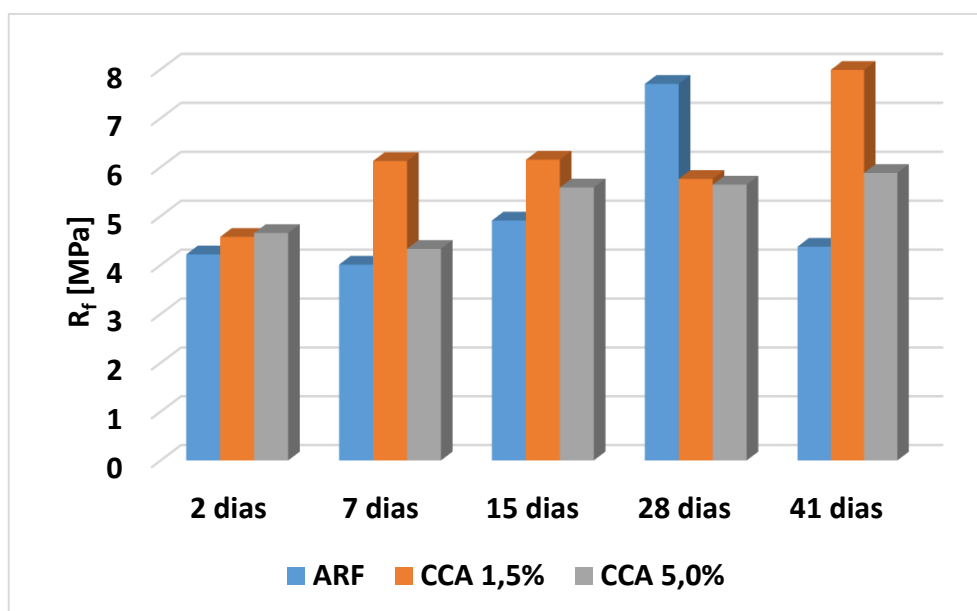


Gráfico 17- Comparação do ensaio à flexão das diferentes idades

No gráfico 19 que se encontra a seguir, são apresentadas a comparação e a evolução dos diversos valores obtidos nos ensaios à compressão nas diferentes idades dos provetes. Verificou-se que a resistência à compressão da argamassa CCA 5% só obteve um maior valor aos 7 dias. As argamassas de 1,5% e ARF tiveram em geral tendência a aumentar com a idade.

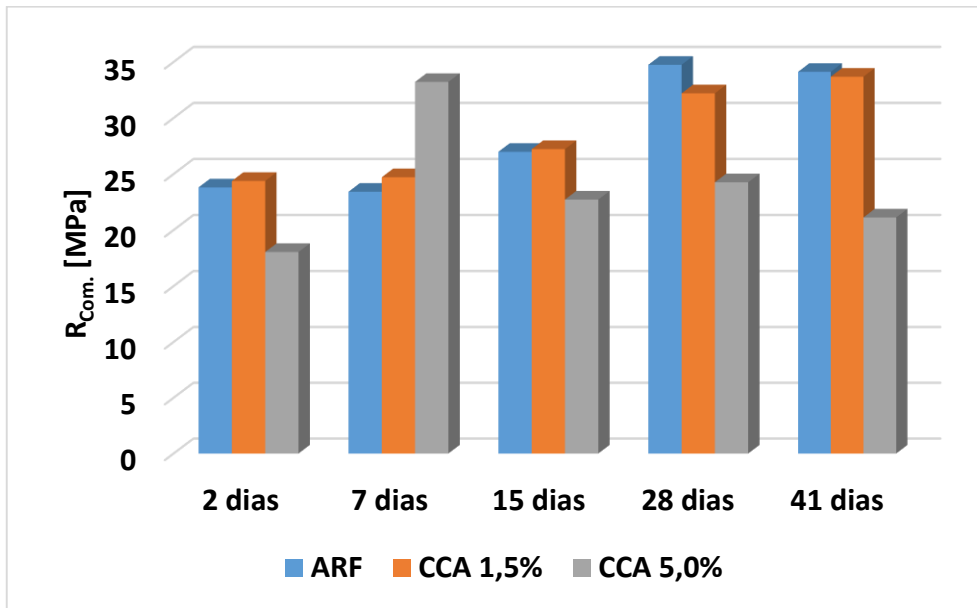


Gráfico 18 - Comparação do ensaio à compressão das diferentes idades

4.2 Discussão dos resultados

O principal objetivo deste estudo foi investigar a viabilidade à substituição parcial do cimento por cinzas de casca de amêndoa na produção de argamassas (1,5% e 5%), em relação às resistências mecânicas (resistência à flexão e resistência compressão) em diferentes idades (3, 7, 14, 28 e 41 dias).

De uma forma geral verificou-se que a resistência à flexão aumentou com a substituição parcial de cinza ao cimento, e a resistência à compressão diminuiu, em cada uma das idades analisadas. No entanto, para a resistência à flexão (exceto aos 3 dias) a substituição por 1,5% de cinza foi a que registou o valor mais elevado. Também para a resistência à compressão, verificou-se que aos 3 e aos 14 dias o menor valor registado foi com a substituição de 1,5% de cinza.

Relativamente ao efeito do tempo, para ambas as percentagens, verificou-se uma maior resistência tanto à flexão como à compressão com o aumento das idades (i.e. quanto maior a idade, maior a resistência).

Quando comparados com resultados da literatura (p.e. Coutinho, 2011; Lima, 2008; Pinto, 2013) os resultados esperados foram inferiores ao que se esperava. No presente estudo, quanto maior a substituição de cinza pelo cimento, maior a diminuição das resistências mecânicas. Contudo, poderá ser usada em baixas percentagens de substituição parcial de cimento (Coutinho, 2011). Verificou-se o que para a resistência à compressão, as resistências diminuíram com a substituição de cimento. Constatou-se apenas um aumento com a utilização parcial de 1,5% de substituição. Estes dados corroboram outros estudos de resíduos agrícolas em que certos casos, a substituição possa ser feita em pequenas quantidades.

Em relação à resistência à flexão esta revelou resultados positivos. No entanto, verificou-se que a resistência à flexão apresentou valores superiores para a concentração a 1,5% em comparação com 5%. Desta forma, e de acordo com os resultados apresentados, pode-se sugerir que a baixa utilização de substituição de cinza (nesta caso em particular a 1,5%) seja a melhor opção.

Ao longo do tempo verificou-se que em relação à resistência à flexão, em todas as argamassas houve um aumento de resistência, exceto aos 41 dias que a ARF apresentou um decréscimo. Em relação à compressão, esta ao longo do tempo aumentou para a argamassa ARF e de 1,5% CCA, enquanto para 5% diminuiu.

São consideradas limitações deste estudo:

- (i) Devia-se ter começado por realizar a análise química, mas tal não foi possível;
- (ii) Não foi realizado nenhum ensaio com percentagens entre 1,5% e 5% de substituição parcial de cinza;
- (iii) Não foi realizado nenhum ensaio com percentagens acima dos 5%.

Desta forma não se pode concluir com total exatidão, se as hipotéticas variações (aumentos ou diminuições) das resistências mecânicas.

5 Conclusões

5.1 Conclusões

Podia-se ter estudado outro tipo de análises químicas, pois a que foi utilizada não é a mais rigorosa, é apenas uma análise química elementar. Em face dos resultados, analisar em que tipo de adições se poderia aproximar de acordo com as normas em vigor.

O rendimento da cinza de casca de amêndoa foi muito baixo, o que pode não compensar a sua utilização.

Em relação á confecção das argamassas, devia-se ter usado outras percentagens de cinzas para novas argamassas, para compreender melhor o seu comportamento.

A argamassa 1,5% CCA, aos 41 dias de idade foi a que apresentou uma maior resistência à flexão. Em relação à compressão a que apresentou uma maior resistência foi a argamassa ARF aos 28 dias de idade sendo sempre superior em relação as outras argamassas até aos 41 dias.

As principais informações que se pode retirar do estudo do uso das cinzas de casca de amêndoa em argamassas são:

- Não apresenta potencial pozolânico em matrizes cimentícias;
- O uso de baixa percentagem de cinza (1,5%) de cinza de casca de amêndoa como substituo parcial do cimento é mais favorável do que se for maior.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Para um melhor estudo do comportamento da cinza de casca de amêndoa em argamassas, deve-se fazer um estudo mais exaustivo da análise química das cinzas, para ver se a sua utilização se enquadra como substituo parcial do cimento de Portland ou como um agregado

fino (tipo filer). Assim sendo, fazer novos estudos de resistência mecânica e posteriormente de durabilidade.

Por fim, também é de salientar que para além dos aspetos técnicos, alguns estudados neste trabalho, também os aspetos económicos e as regalias que pode vir a ter para o ambiente, devem ser analisados.

Referências Bibliográficas

A UE e a gestão de resíduos. In: Comissão europeia direção geral do ambiente, S.d.p.o.d.c. europeias. Editor 2000: Luxemburgo.

Alex B., 1981. Production of RHA and its applications in mortar and concrete. Asian Institute of Technology Bangkok, Thailand.

Almeida N.F., 2008. Argamassas de cal aérea e cinza de casca de arroz para alvenarias antigas. Instituto Superior Técnico de Lisboa. (Tese de Mestrado).

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis, xxxx. In: <http://www.apren.pt/>.

ASTM C 109/90 – ASTM Designation C109-90- Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.

ASTM C230 – ASTM Designation C230M-98- Standard Specification for Flow Table for Use In Tests of Hydraulic Cement.

Atividade Económica, Ambiental e Social, 2010. Cimpor, 2º Relatório de Sustentabilidade. In: <http://www.cimpor.pt/>.

Campos R.N., Silva R.B., Fontes C.M.A & Lima P.R.L., 2014. Avaliação da RAA em argamassa produzidas com cinza de biomassa com alto teor de álcalis. In: 1º Encontro Luso-Brasileiro de degradação em estruturas de concreto armado, Salvador, Bahia (Brasil).

Chandra S., 1996. Waste materials used in concrete manufacturing. Building Materials Science Series. Noyes Publications: New Jersey.

Chindaprasirt P.; et al, 2007. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. Construction and Building Materials, 21, pp. 1492-1499.

Cincotto M.A, 1988. Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: Tecnologia de Edificações. Pp. 71.74.

Cordeiro G.C.; et al, 2005. Avaliação da reatividade da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar com cimento de Portland e cal. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto-IBRACON.

Coutinho J.S., 2011. Betões Eco-Eficientes com Resíduos. In: 1ª Jornadas de Materiais na Construção, Porto (Portugal).

Coutinho J.S., 2006. Betão com cinza de casca de arroz. Estudo e investigação. 10pp.

Coutinho J.S., 2002. Ligantes. Materiais de Construção 2, DEC - FEUP, Porto. 157 pp.

Coutinho J.S., 2010. Materiais de Construção 2 – Ligantes. FEUP – Departamento de Engenharia Civil.

Coutinho J.S., 2003. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures – Cement and Concrete Composites. R.N. Swamy and A.E. Naaman, Elsevier, 25, pp. 51-59.

De Paula M.O., Tinôco I.F.F., Rodrigues C.S., Da Silva E.N. & Souza C.F., 2009. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento de Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 13 (3), pp.353-357.

Decreto-Lei 178/2006, 5 de setembro de 2006. Ministério do ambiente, do ordenamento do território e do desenvolvimento regional.

Elinwa A.U.; Mahmood Y.A., 2004. Ash from timber waste as cement replacement material. Cement and Concrete Composites, 24, pp. 219-222.

Freitas E.G.A., 1996. Obtenção de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana para o uso em construção civil. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro. (Dissertação de Mestrado).

Ganesan K., Rajagopal K. & Thangavel K., 2007. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites, 29.

Hernández J.F.M.; et al, 1998. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reactions. Cement and Concrete Research, 28, pp.1525-1536.

John V.M.; et al, 2003. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: Tecnologias e materiais alternativos de construção, Campinas, SP. UNICAMP, pp. 145-190.

Kluger J. and Dorfman A., 2002. The challenges we face. Time.

Lima S.A., 2008. Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo do caso da cinza da casca da castanha de caju. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. (Dissertação de Mestrado).

Malhotra V.M. & Mehta P.K., 1996. Pozzolanic and cementitious matérias. Advances in concrete technology. Volume 1.

Mehta P.K. & Monteiro P.J., 2006. Concrete, Microstructure, Properties and Materials. 3rd Edition. McGraw-Hill, USA.

Mehta P.K., 1994. Mineral admixtures for concrete – An overview of recent developments, Proceedings of an engineering foundation conference advances in cement and concrete, University of New Hampshire, Durham. ASCE, pp. 243-256.

- Mehta P.K., 1992. Rice husk ash – A unique supplementary cementing material. In: V.M. Malhotra (ed). *Advances in concrete technology*, 2ª edição. Ottawa, Canmet, pp. 407-431.
- Mehta P.K. & Monteiro P.J.M., 1994. *Concreto - estrutura, propriedades, materiais*. São Paulo, pp.290-309.
- Monteiro E., 2001. *Cimento fabricado das cascas de arroz*. Tubo de Ensaio, Público.
- Naik, T.R., 2001. Sustainability of cement and concrete industries, *Proceedings of the international conference on sustainable construction materials and technology*, Editors: Yoon-Moon Chun, et. al, Taylor and Francis Publishers, UK.
- Neville A.M., 1997. *Propriedades do concreto*. São Paulo.
- NP 4220:2010, Pozolanas para betão, argamassa e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade, Lisboa, IPQ.
- NP EN 197-1:2012, Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, Lisboa, IPQ.
- NP EN 206-1:2007, Betão - Especificações, desempenho, produção e conformidade, Lisboa, IPQ.
- NP EN 196-1:2006, Método de ensaios de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas, Lisboa, IPQ.
- Nolasco A.M. & Agnesini M.V., 1993. Utilização de resíduo da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil. In: *Encontro de tecnologia no ambiente construído*, São Paulo (Brasil).
- Oda G.A & Libório J.B.L.,2002. Estudo da sílica ativa da casca do arroz em matrizes de cimento Portland. In: *Simpósio da ciência e engenharia de materiais*, São Carlos.
- Paula M.O., Tinôco, I. de F.F., Rodrigues C.S., Silva E.N. & Souza C.F., 2009. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Volume 13, pp. 353-357.
- Petrucci E.G.R., 1995. *Materiais de construção / Eládio G.R. Petrucci*. 10º Edition. São Paulo: Globo, pp. 342-344.
- Pinto B., 2013. Cinza de madeira como adição em betão- resistências mecânicas e durabilidade. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Portaria n.º209/2004, 3 de março de 2004. Ministério da economia, da agricultura, desenvolvimento rural e pescas, da saúde e das cidades, ordenamento do território e ambiente.

Prudêncio Jr; et al, 2003. Cinza da casca de arroz. In: Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, Porto Alegre. Coleção Habitare. Volume 4.

Pudêncio Jr. L.R.; Santos S., 1997. Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz. In: Workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como Material de Construção Civil.

Rêgo J.H.S; et al, 2004. Estudo de aglomerantes compostos por cimento Portland comum (CPI) e as cinzas de casca de arroz (CCA) amorfa e cristalina. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Florianópolis.

Rocha J.C. & Cheriaf M., 2003. Aproveitamento de resíduos na construção. Coleção Habitare, v.4.

Samarin A., 1999. Wastes in concrete: Converting liabilities into assets, Proceeding of the International Seminar Exploiting wastes in concrete, University of Dundee, Editors: Ravindra K. Dhir and Tevor G. Jappy, Thomas Telford, Scotland, UK. ISBN 0-7277-2821-0.

Sampaio J., Coutinho J.S. & Sampaio M.N., 2000. Portuguese rice husk ash a partial cement replacement. Proceeding of the International Conference: Sustainable Construction into the next Millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials Ed. N.P. Barbosa, R.N. Swamy and C. Lynsdale, pp. 125-137.

Santos S., 1997. Estudo da viabilidade de utilização de cinza da casca de arroz residual em argamassas e concretos. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. (Dissertação de Mestrado).

Santos S. & Prudêncio JR., 1998. Estudo comparativo da pozolanicidade de cinza volante e cinza de casca de arroz residual. In: VII Encontro de Tecnologia no Ambiente Construído, Florianópolis-SC.

Seminário da disciplina de novos materiais. Curso Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Silveira A.A. & Ruaro P.A., 1995. A adição de cinza de casca de arroz em concretos – Estudo da influência do tipo de cinza na resistência à compressão e namicroestrutura do concreto.

Singh N.B.; et al, 2000. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 30, pp.1485-1488.

Soares Pinto B.M.P., 2013. Cinza de Madeira como adição em betão – resistências mecânicas e durabilidade. FEUP. (Dissertação de Mestrado).

Sousa S. P. B., 2005. Betão eco-eficiente com cinza de casca de arroz. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Souza G.N.; et al, 2007. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento de Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves, RS.

Swamy R.N., 2007. Sustainable concrete for the 21st century – Concept of strength through durability. *The Indian Concrete Journal*, 81 (12), pp.7-15.

Udoeyo F.F.; Dashibil P.U., 2002. Sawdust ash as concrete material. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Pp. 605-611.

Udoeyo F.F.; et al, 2006. Potencial of wood waste ash as an additive in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Pp. 605-611.

UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library Internet, 2007. In: <http://maps.grida.no/go/graphic/historical-trends-in-carbon-dioxide-concentrations-and-temperature-on-a-geological-and-recent-time-scale>.

Worrell E. [et al.], 2001. Carbon dioxide emissions from the global cement I, industry, *Annual review of energy and environment*. C. & Meida, L.O., Volume 26, pp.246-256.

Anexos

Anexo I – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 3 dias.

PROVETE	Peso (g)	Fflexão (kN)	Fcomp. (kN)	Fcomp. (kN)	Massa volúmica kg/m ³	Rf (MPa)	Rf (Mpa)	Re (Mpa)	Re (Mpa)	Remédio (Mpa)	Re (Mpa)	Índice de Atividade
ARF 1	578,83	2,120	-	40,480	2261	4,969	4,216	16,67	25,30	25,3	25,2	
ARF 2	589,21	1,740	44,330	39,810	2302	4,078		27,71	24,88	26,3		
ARF 3	586,64	1,537	39,880	37,360	2292	3,602		24,93	23,35	24,1		
CCA1,5.1	563,73	1,877	37,410	37,210	2202	4,399	4,575	23,38	23,26	23,3	24,4	97%
CCA1,5.2	564,03	-	36,980	38,400	2203	1,662		23,11	24,00	23,6		
CCA1,5.3	574,32	2,027	42,040	42,000	2243	4,751		26,28	26,25	26,3		
CCA5,0.1	553,23	2,027	27,090	28,990	2161	4,751	4,654	16,93	18,12	17,5	18,0	71%
CCA5,0.2	550,89	2,166	30,220	31,340	2152	5,077		18,89	19,59	19,2		
CCA5,0.3	550,14	1,764	27,050	28,500	2149	4,134		16,91	17,81	17,4		

	Massa volúmica média (kg/m ³)	Desvio Padrão
ARF	2285	21,38
CCA 1,5 %	2216	23,39
CCA 5,0%	2154	6,24

	Resistência á flexão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	4,22	0,69
CCA 1,5 %	3,60	1,69
CCA 5,0%	4,65	0,48

	Resistência á compressão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	23,10	5,74
CCA 1,5 %	24,26	1,76
CCA 5,0%	17,58	1,14

Anexo II – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 7 dias.

PROVETE	Peso (g)	Fflexão (KN)	Fcomp. (KN)	Fcomp. (KN)	Massa volumica kg/m ³	Rf (Mpa)	Rf (MPa)	Rc (Mpa)	Rc (Mpa)	Remédio (Mpa)	Rc (Mpa)	Índice de Atividade
ARF 1	569,216	-	-	38,250	2224	1,652	4,008	10,31	23,91	23,9	23,4	
ARF 2	569,471	2,2110	34,330	38,740	2224	5,182		21,46	24,21	22,8		
ARF 3	565,061	2,2140	41,070	34,120	2207	5,189		25,67	21,33	23,5		
CCA1,5.1	546,89	2,4940	36,200	39,650	2136	5,845	6,124	22,63	24,78	23,7	24,7	106%
CCA1,5.2	548,529	2,6830	39,370	40,180	2143	6,288		24,61	25,11	24,9		
CCA1,5.3	545,698	2,6620	39,810	42,070	2132	6,239		24,88	26,29	25,6		
CCA5,0.1	562,094	2,8990	52,940	55,830	2196	6,795	4,330	33,09	34,89	34,0	33,2	142%
CCA5,0.2	563,009	2,6430	53,900	53,400	2199	6,195		33,69	33,38	33,5		
CCA5,0.3	558,924	0,0000	53,300	49,520	2183	0,000		33,31	30,95	32,1		

	Massa volúmica média (kg/m ³)	Desvio Padrão
ARF	2218,33	9,81
CCA 1,5 %	2137	5,57
CCA 5,0%	2192,67	8,50

	Resistência á flexão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	4,01	2,04
CCA 1,5 %	6,12	0,24
CCA 5,0%	6,50	0,42

	Resistência á compressão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	19,15	7,94
CCA 1,5 %	24,04	1,23
CCA 5,0%	33,36	0,30

Anexo III – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 14 dias.

PROVETE	Peso (g)	Fflexão (KN)	Fcomp. (KN)	Fcomp. (KN)	Massa volumica kg/m ³	Rf (Mpa)	Rf (MPa)	Re (Mpa)	Re (Mpa)	Rcmédio (Mpa)	Re (Mpa)	Índice de Atividade
ARF 1	571,11	2,2020	45,410	40,420	2231	5,161	4,909	28,38	25,26	26,8	27,0	
ARF 2	568,938	2,1320	47,420	40,510	2222	4,997		29,64	25,32	27,5		
ARF 3	569,613	1,9490	44,42	40,800	2225	4,568		27,76	25,50	26,6		
CCA1,5.1	564,973	2,7490	47,180	42,440	2207	6,443	6,150	29,49	26,53	28,0	27,2	101%
CCA1,5.2	566,028	2,6020	47,420	40,180	2211	6,098		29,64	25,11	27,4		
CCA1,5.3	560,761	2,5210	44,090	40,040	2190	5,909		27,56	25,03	26,3		
CCA5,0.1	586,38	2,5670	37,970	35,240	2291	6,016	5,584	23,73	22,03	22,9	22,7	84%
CCA5,0.2	563,671	2,1480	37,940	36,120	2202	5,034		23,71	22,58	23,1		
CCA5,0.3	576,894	2,4320	35,600	35,270	2253	5,700		22,25	22,04	22,1		

	Massa volúmica média (kg/m ³)	Desvio Padrão
ARF	2226	4,58
CCA 1,5 %	2202,67	11,15
CCA 5,0%	2248,67	44,65

	Resistência á flexão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	4,91	0,31
CCA 1,5 %	6,15	0,27
CCA 5,0%	5,58	0,50

	Resistência á compressão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	28,59	0,96
CCA 1,5 %	28,90	1,16
CCA 5,0%	23,23	0,85

Anexo IV – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 28 dias.

PROVETE	Peso (g)	Fflexão (KN)	Fcomp. (KN)	Fcomp. (KN)	Massa volumica kg/m ³	Rf (Mpa)	Rf (MPa)	Rc (Mpa)	Rc (Mpa)	Remédio (Mpa)	Rc (Mpa)	Índice de Atividade
ARF 1	563,16	2,4880	52,770	57,400	2200	5,831	7,702	32,98	35,88	34,4	34,7	
ARF 2	560,96	3,6830	52,000	57,420	2191	8,632		32,50	35,89	34,2		
ARF 3	563,809	3,6870	56,55	57,400	2202	8,641		35,34	35,88	35,6		
CCA1,5.1	570,059	3,5960	50,760	50,010	2227	8,428	5,759	31,73	31,26	31,5	32,2	93%
CCA1,5.2	571,234	1,1310	49,340	52,210	2231	2,651		30,84	32,63	31,7		
CCA1,5.3	565,631	2,6440	52,980	53,840	2209	6,197		33,11	33,65	33,4		
CCA5,0.1	547,683	2,3280	37,380	40,170	2139	5,456	5,642	23,36	25,11	24,2	24,3	70%
CCA5,0.2	552,024	2,5490	38,130	38,950	2156	5,974		23,83	24,34	24,1		
CCA5,0.3	549,62	2,3450	38,920	39,390	2147	5,496		24,33	24,62	24,5		

	Massa volúmica média (kg/m ³)	Desvio Padrão
ARF	2197,67	5,86
CCA 1,5 %	2222,33	11,72
CCA 5,0%	2147,33	8,50

	Resistência á flexão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	7,70	1,62
CCA 1,5 %	5,75	2,91
CCA 5,0%	5,64	0,29

	Resistência á compressão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	33,61	1,52
CCA 1,5 %	31,89	1,14
CCA 5,0%	23,84	0,49

Anexo V – Tabelas de valores das resistências mecânicas aos 41 dias.

PROVETE	Peso (g)	Fflexão (KN)	Fcomp. (KN)	Fcomp. (KN)	Massa volumica kg/m ³	Rf (Mpa)	Rf (MPa)	Rc (Mpa)	Rc (Mpa)	Rcmédio (Mpa)	Rc (Mpa)	Índice de Atividade
ARF 1	564,813		57,880	52,340	2206	0,000		36,18	32,71	34,4		
ARF 2	563,038	2,6850	53,640	51,810	2199	6,293	4,373	33,53	32,38	33,0	34,1	
ARF 3	569,025	2,9120	51,77	60,100	2223	6,825		32,36	37,56	35,0		
CCA1,5.1	558,999	2,9610	50,660	53,710	2184	6,940		31,66	33,57	32,6		
CCA1,5.2	574,008	3,5480	54,080	57,100	2242	8,316	7,987	33,80	35,69	34,7	33,7	99%
CCA1,5.3	586,835	3,7140	57,070	50,760	2292	8,705		35,67	31,73	33,7		
CCA5,0.1	539,284	2,4700	39,910	39,640	2107	5,789		24,94	24,78	24,9		
CCA5,0.2	544,839	2,4540	38,650	7,240	2128	5,752	5,881	24,16	4,53	14,3	21,1	62%
CCA5,0.3	547,468	2,6040	38,730	38,590	2139	6,103		24,21	24,12	24,2		

	Massa volúmica média (kg/m ³)	Desvio Padrão
ARF	2209,33	12,34
CCA 1,5 %	2239,33	54,05
CCA 5,0%	2124,67	16,26

	Resistência á flexão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	6,56	0,38
CCA 1,5 %	7,99	0,93
CCA 5,0%	5,88	0,19

	Resistência á compressão média (MPa)	Desvio Padrão
ARF	34,02	1,96
CCA 1,5 %	33,71	2,01
CCA 5,0%	24,44	0,44