



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Avaliação Experimental do Comportamento Mecânico de Materiais Ativados Alcalinamente

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Estruturas

Autor

Francisco José dos Santos Mota Ferreira Guerra

Orientadores

Prof. Sérgio Manuel Rodrigues Lopes (FCTUC)

**Prof. Amândio Luís Sanches Irache Teixeira Pinto (ISP -
Tundavala)**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2014

AGRADECIMENTOS

Ao longo da realização do presente estudo pude contar com um apoio incondicional de pessoas da qual não poderia deixar de prestar a minha homenagem e o meu agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Doutor Sérgio Lopes, por me ter proporcionado a oportunidade de realizar a presente dissertação e pelo constante apoio à realização desta, sempre manifestado de uma forma amigável.

Um reconhecimento particular merece da minha parte o Professor Doutor Adelino Lopes, por toda a dedicação a este trabalho experimental, por todas as horas de ajuda, marcando presença em todos os momentos, tendo eu conhecimento que por vezes foi difícil compatibilizar todos os compromissos que teria, pelos ensinamentos prestados, não só no âmbito deste trabalho, mas também durante a minha vida académica.

Ao Professor Doutor Amândio Teixeira Pinto do ISP – Tundavala, pelos esclarecimentos práticos sobre o material em estudo. Foi uma honra tê-lo como orientador deste trabalho exploratório.

À Professora Doutora Isabel Pinto, por toda a disponibilidade que sempre revelou para comigo, por todas as oportunas sugestões dadas para a presente dissertação.

Ao Professor Doutor Emim Erdem, Docente na Universidade de Pamukkale na Turquia agradeço-lhe a gentileza com que partilhou importante material bibliográfico e por todos os esclarecimentos do ponto de vista químico.

À Professora Doutora Lídia Catarino do Departamento de Ciências da Terra da FCTUC pela ajuda na realização da análise elementar dos vários materiais utilizados.

Um especial agradecimento ao Senhor José António Marques Lopes, ao Senhor José Edmundo de Almeida Pais, ao Senhor Luís Gaspar, ao Senhor Ilídio Santos, ao Carlos Martins e ao André Marques, pelos seus conselhos, apoio e auxílio prestado no desenvolvimento da campanha experimental no Laboratório de Estruturas e no Laboratório de Geotecnia do DEC-FCTUC.

Ao Senhor Manuel Santiago, da fábrica *F. Santiago*, pela disponibilidade de fornecer as cinzas resultantes do processo de fabrico do tijolo, assim como ao Senhor Jorge Louro, da fábrica *Deartis*, por ter fornecido os diferentes tipos de cerâmica.

Ao meu colega Mário Oliveira, meu colega de laboratório por toda a amizade demonstrada, pelo companheirismo e por toda a cooperação laboratorial.

Aos meus pais, Manuel e Maria José e à minha irmã, Raquel, pelo apoio incondicional, pela paciência e pelo incentivo que sempre me deram ao longo destes anos.

Obrigado.

RESUMO

As estruturas betão armado à base de cimento Portland Normal apresentam muitas vezes uma deterioração rápida relevante, que tem implicações, tanto a nível económico, com despesas de reabilitação não previstas, como em termos de impacto ambiental associado a essas intervenções de reabilitação. Para além disso, durante o processo de fabrico do cimento Portland Normal são geradas grandes quantidades de CO_2 , ao mesmo tempo que é consumida uma enorme quantidade de energia, o que representa um grande impacto ambiental.

A presente dissertação é dedicada ao estudo de aplicação de cinzas resultantes da produção de tijolo e de material cerâmico na incorporação de ligante, substituindo-se assim parte deste. É também avaliada a influência da sua granulometria, sendo para isso analisados 3 tipos distintos. Assim, é abordada uma nova via de desenvolvimento de materiais obtidos por ativação alcalina, os quais podem atingir uma elevada durabilidade como o comprovam algumas construções muito antigas que duraram até aos nossos dias.

Neste contexto, esta dissertação consiste na caracterização das propriedades resistentes de materiais obtidos por recurso a quatro tipos distintos de ligantes ativados alcalinamente. Estes ligantes são compostos, tendo por base o metacaulino, ao qual se adicionou posteriormente cinzas provenientes do fabrico de tijolo cerâmico, ou cerâmica cozida, ou cerâmica não cozida. Em todos os casos, foram analisadas duas composições diferentes, com substituições de 30% e de 70% de metacaulino. Posteriormente, são comparadas estas características com as que resultam da mistura base, só com metacaulino, e ainda com os resultados obtidos a partir de uma argamassa construída com um ligante hidráulico.

Neste trabalho exploratório, os resultados permitem concluir que existe uma possibilidade muito forte de se substituir o cimento Portland Normal, garantindo propriedades estruturais equivalentes e apresentando na sua produção menores emissões de dióxido de carbono, tornando a indústria da construção mais sustentável para o meio ambiente.

ABSTRACT

The reinforced concrete structures based on Ordinary Portland cement often have a quick, relevant deterioration that has implications not just at the economical level, with rehabilitation or anticipated expenses but also in terms of environmental impacts associated with these rehabilitation interventions. In addition, during the process of manufacture of Ordinary Portland cement large amounts of CO_2 are generated at the same time being consumed a huge amount of energy, which represents a major environmental impact.

This dissertation is devoted to the study of application of ash from the production of ceramic brick and its incorporation into the binder, thus replacing some of it. It was also evaluated the influence of the particle size hence 3 distinct types were analyzed . So, it is a new approached via the development of new materials obtained by alkaline activation, which can achieve high durability as evidenced by some very old buildings that have lasted to the present day.

In this context, this dissertation aims at characterizing the mechanical materials obtained by use of four different types of activated alkali binders. These binders are composed, based on metakaolin, which is subsequently ash from the manufacture of ceramic bricks or baked or unbaked ceramic tile added. In all cases, two different compositions, with substitution of 30% to 70% metakaolin were analyzed. Subsequently, these characteristics are compared with those resulting from the mixture based only on metakaolin and also with the results obtained from a mortar constructed with a hydraulic binder.

In this exploratory work, we conclude that there is a very strong possibility to replace Ordinary Portland cement, ensuring equivalent structural properties and performing in their production lower emissions of carbon dioxide, making the construction industry more sustainable for the environment.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE.....	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Sustentabilidade ambiental e económica.....	4
2.2 Materiais incorporados como ligante	7
2.3 Ativação Alcalina	12
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	15
3.1 Materiais	15
3.1.1 Metacaulino	15
3.1.2 Areia	16
3.1.3 Silicato de sódio	17
3.1.4 Hidróxido de sódio	17
3.1.5 Cinza.....	18
3.1.6 Cerâmica não cozida.....	19
3.1.7 Cerâmica cozida	21
3.1.8 Cimento	21
3.1.9 Água	21
3.2 Procedimento experimental	22
3.2.1 Procedimento experimental base e misturas.....	22
3.2.2 Anormalidades dos provetes.....	27
3.3 Procedimentos de ensaio	28
3.3.1 Ensaio de flexão em fase elástica	30
3.3.2 Ensaio de rotura à tração por flexão	31
3.3.3 Ensaio de rotura à compressão	32
4 RESULTADOS	35
4.1 Ensaio de flexão em fase elástica	35
4.2 Ensaio de rotura à tração por flexão	43
4.3 Ensaio de rotura à compressão	50
4.4 Extensão de tração e módulo de elasticidade semi-estático	58
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	60
5.1 Trabalhos futuros	61
BIBLIOGRAFIA	63
ANEXO	69

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria ligada à construção civil depende muito de minérios naturais e de derivados de combustíveis fósseis. Na globalidade do processo de construção, todas as indústrias produzem uma elevada quantidade de resíduos, muitos deles não reciclados.

O betão armado constituído à base do cimento Portland, material de aplicação estrutural por excelência, e o mais utilizado na construção nos países desenvolvidos, está associado ao tipo de indústrias referidas, sendo um elemento bastante poluente no processo de construção. Naturalmente, o betão armado tem vindo a ser alvo de inúmeros estudos científicos e tecnológicos no intuito de conhecer melhor o seu comportamento e de apurar cada vez mais os seus processos construtivos. Sabe-se que a longo prazo apresenta problemas de durabilidade e de degradação. Na sua aplicação também apresenta algumas dificuldades, sendo necessário dotar a mistura da trabalhabilidade e plasticidade necessária, através da incorporação de adjuvantes, plastificantes, superplastificantes. Por vezes utilizam-se controladores de obtenção de presa. Na constante procura de outros tipos de betão surgiu como alternativa um material com características estruturais semelhantes às obtidas com recurso do cimento Portland, o betão geopolimérico que poderá ter vantagens interessantes de natureza ambiental, económica e estrutural.

Com o facto de cada vez mais o betão de cimento Portland evidenciar certas dificuldades de durabilidade a muito longo prazo, a comunidade científica virou a sua atenção para as estruturas construídas pelo Homem que ainda hoje perduram em bom estado de conservação e começou a analisar a constituição dos seus materiais. Nas pesquisas efetuadas foi possível descobrir que as argamassas ou betões utilizados eram obtidos através de argilas calcinadas moídas, materiais cerâmicos moídos e compostos à base de cal, formando um composto semelhante ao atual ligante, utilizado nas misturas de betão armado. Estes foram os primeiros compostos realizados com base na ativação alcalina. Os materiais ativados alcalinamente apresentam ao longo do seu tempo resultados que justificam em muitos casos, serem uma excelente alternativa estrutural ao betão armado.

Cada vez mais, é importante analisar as propriedades mecânicas de misturas em que o ligante usado tenha a função de substituir o cimento Portland e que não apresente resultados inferiores e, em simultâneo, um processo de obtenção mais eficiente, menos poluente e mais económico. Assim estudaram-se misturas sem o recurso ao cimento Portland, criando-se a possibilidade de substituição deste em elementos estruturais aplicados na Engenharia Civil.

A composição de materiais em estudo teve como base uma receita inicial anteriormente usada no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de

Coimbra. Esta mistura tem como ligante o metacaulino em pó, em substituição do cimento Portland, e um ativador composto por Silicato de Sódio e Hidróxido de Sódio, para além dos agregados, neste caso areia. Devido ao recurso recorrente de aditivação de cinzas volantes nas misturas betuminosas por parte da indústria cimenteira, estudou-se nesta situação a incorporação de cinzas, com composição semelhante às da cinza volante na mistura base, sendo estas consideradas como um resíduo inerte.

A cinza utilizada é um material resultante do processo de cozedura de tijolo cerâmico, a qual foi dividida em 3 tipos de granulometria distintas para estudar também a influência desta nas misturas. Assim, substituiu-se na mistura base, 30% e 70% de metacaulino, por cada granulometria de cinza diferente, com vista a estudar a influência destes dois parâmetros nas alterações das propriedades resistentes da mistura. Também se abordou a influência da cerâmica moída nas mesmas proporções, 30% e 70% na substituição de metacaulino. Foi estudada a cerâmica não cozida e a cerâmica cozida, sendo que a granulometria utilizada foi a mais fina.

Para aplicação estrutural, o betão requer diversas características, sendo as mais importantes a resistência à compressão, a resistência à tração, a resistência a estados limites múltiplos de tensão, o módulo de elasticidade, a fluência e a retração.

Como estudo experimental, com vista a avaliar as características e os parâmetros mais relevantes para o dimensionamento estrutural, pensando assim na aplicação prática deste material em estruturas de Engenharia Civil, os provetes com as misturas foram sujeitos a ensaios de tração por flexão em fase elástica, de rotura à tração por flexão e de rotura por compressão, sendo assim possível estimar os valores para o módulo de elasticidade estático e semi-estático, resistência à tração por flexão, extensão última de tração e resistência à compressão.

Devido ao material em estudo ser um material recente, com incorporação de materiais também escassamente estudados, para a realização dos ensaios não houve nenhuma norma específica. Contudo, os procedimentos laboratoriais e os ensaios foram realizados com base nas normas dedicadas ao betão armado.

A presente dissertação está organizada em duas partes, ambas importantes. Na primeira parte é apresentada uma revisão bibliográfica, onde são justificadas as linhas de orientação deste trabalho de investigação, ao mesmo tempo que são apresentados conhecimentos de diversos investigadores sobre temas semelhantes ao estudado. Já na segunda parte é apresentada uma descrição de todo o processo laboratorial e os resultados destes com comentários. Esta apresentação termina com as principais conclusões e com sugestões para trabalhos futuros.

Detalhadamente esta dissertação está organizada em 5 capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução geral onde se apresenta a razão do tema, a importância no futuro da sociedade e os objetivos pretendidos para este trabalho experimental exploratório.

No capítulo 2 é apresentada uma nota bibliográfica onde estão presentes os conhecimentos de diversos autores sobre os materiais aqui estudados, é abordada a urgência de mudar a indústria do cimento, os materiais que hoje são massivamente incorporados no ligante das misturas com vista a tornar o ligante mais económico, a química dos materiais utilizados e a sua influência e por fim são apresentadas as razões para o crescente recurso a materiais ativadas alcalinamente em detrimento dos materiais compostos à base de cimento Portland.

No capítulo seguinte, no 3, apresenta-se a descrição de todo o processo experimental, desde a mistura dos compostos até estes serem analisados para obtenção das suas propriedades mecânicas.

No capítulo 4 são expostos os resultados obtidos através dos ensaios realizados e é feita uma comparação dos resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões desta tese, assim como são expostos conhecimentos que levam à sugestão de trabalhos futuros sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica referem-se os contrastes entre os impactes ambientais e os recursos económicos para a obtenção de cimento Portland, assim como o seu fabrico e as alterações possíveis na sua composição, uma vez que na composição do betão armado não se utiliza apenas cimento Portland. Os compostos que são adicionados são abordados no subcapítulo referente aos materiais. Também é descrito o material usado neste trabalho experimental, o metacaulino. Paralelamente, são apresentados os compostos químicos relevantes na obtenção da resistência mecânica por parte do cimento Portland e são analisadas as semelhanças com as misturas à base de metacaulino. Por fim, é abordado o vasto tema de ativação alcalina, sendo apresentadas as suas características e as vantagens do uso dos geopolímeros. De salientar que, alguns dos temas aqui referidos e abordados encontram-se detalhados no documento intitulado “Complementos teóricos sobre materiais ativados alcalinamente” (Guerra, 2014).

2.1 Sustentabilidade ambiental e económica

A sustentabilidade ambiental e a sustentabilidade económica passaram a fazer parte dos compromissos de muitas empresas, exploradoras de recursos naturais e minerais, nos anos 70 devido à crise petrolífera (Mateus, 2009). Nessa altura, a indústria da construção, com a razão de ser uma das indústrias mais dependentes desses recursos, teve que criar soluções com vista a não depender em excesso destes materiais (Mateus, 2009). Também com a grande influência do desenvolvimento tecnológico e científico, surgiram no mercado materiais diversificados que podem ser incluídos na construção de edifícios. Simultaneamente a toda esta diversificação industrial, surgiu o marketing associado à produção dos produtos de construção, mostrando muitas vezes a influência do facto de ser ecológico e ambientalmente sustentável na decisão de aplicação de uma inovação em obra, ou em fase de projeto. Apesar de tudo, desde a sua descoberta que o cimento Portland é o material estrutural mais utilizado, tendo diversas aplicações construtivas. Contudo, na antiguidade histórica existia uma extensa aplicação de ligantes hidráulicos, compostos anteriores ao cimento Portland.

Nos dias de hoje, tal como foi revelado pelo The Earth Institute da Universidade de Columbia dos Estados Unidos da América em 2012, o cimento é o segundo produto mais consumido no mundo, sendo o primeiro a água. Com efeito, mais de 70% da população mundial habitam numa estrutura construída com cimento Portland. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (United States Environmental Protection Agency) foram produzidas em 2004, 2 biliões de toneladas de cimento Portland no mundo; cerca de um terço desta quantidade é produzida na China.

Devido à falta de alternativa para este material estrutural e devido à sua diversa aplicação, é necessário encontrar a forma de tornar o cimento Portland menos poluente, ao nível do seu processo de fabrico. Apenas é ultrapassado pela produção de aço e alumínio, dentro da indústria da construção. Expressando conclusões expostas pela fundação Canadiana ECOSMART, por cada tonelada produzida de cimento Portland são utilizadas duas toneladas de rocha calcária, 131 metros cúbicos de gás natural, produzida uma tonelada de CO_2 e 3 quilogramas de óxido nítrico. Este último composto é um importante componente da criação de chuvas ácidas e do famoso “*smog*”.

Na obra de Teixeira Pinto (2006), intitulada Introdução ao Estudo de Geopolímeros, é revelado que até ao ano 2015, a produção de cimento Portland deverá ser adaptada devido às questões ambientais e às de poupança energética, existindo um incentivo à inclusão de compostos alternativos no cimento, como por exemplo as cinzas volantes, e deverá ser limitada a produção de clínquer a um bilião de toneladas a nível mundial. De acordo com Khater (2011), se durante a produção de clínquer for introduzido material resultante de demolições, ou material cerâmico, a quantidade necessária de calcário irá ser reduzida, o que poderá representar uma poupança considerável de matérias-primas, de recursos naturais e redução de consumo de energia. Atualmente, também a indústria cerâmica produz resíduos, não tão poluentes nem em quantidades tão massivas como o betão, mas que não são reutilizados, como no caso da produção de argilas-calcinadas. Devido, também, às crescentes preocupações ambientais para a criação de aterros sanitários, e tratamento de resíduos vindos das mais variadas tarefas da indústria, torna-se necessário incluir novamente ou reaproveitar estes materiais na construção civil. A indústria cimenteira tem um processo de fabricação que permite que sejam incluídos recursos cerâmicos ou outros sem ser necessário adaptar a produção para englobar esses produtos, ao mesmo tempo que estes materiais não serão depositados em aterros. Mehta (2001) sugere que a melhor maneira da indústria da construção se tornar mais sustentável e económica consiste na inclusão de resíduos provenientes de outras indústrias como materiais de construção.

Até ao momento presente, têm sido propostas várias alterações às composições de betões realizadas com cimento Portland, com o propósito de melhorar as suas propriedades e as características em função das condições de aplicação e exposição da estrutura de betão. No geral, estas alterações ou se baseiam em substituir parcialmente um componente, por exemplo o cimento por cinzas, ou em adicionar determinados materiais à tradicional mistura de betão. Estes materiais que são aditivados, tem a função de ser: plastificantes, ou superplastificantes; aceleradores, ou retardadores de presa; controladores de viscosidade; controladores de hidratação; controladores de retração ou expansão; e inclusive controladores de aderência com o aço. Assim, é possível obter betões: com uma elevada trabalhabilidade; com uma

otimização do módulo de elasticidade; com controlo da resistência à tração. Deste modo, aumenta-se de modo substancial a durabilidade do betão. Grande parte destes aditivos são derivados, compostos ou de aplicação isolada de materiais pozolânicos ou de materiais cerâmicos.

Nas últimas décadas, têm-se verificado que as estruturas de betão armado realizadas apresentam uma degradação prematura, conduzindo à necessidade de manutenção e reparação com vista a garantir o período de vida útil de projeto. Esta operação de controlo representa custos elevados para o dono da obra. Atualmente, cada vez mais, têm sido aplicados betões com elevado desempenho em obras com elevada importância. Contudo, estes betões são produzidos maioritariamente através da inclusão de sílica de fumo, ou cinzas volantes, com qualidade elevada, aumentando em grande parte os custos, pois estes aditivos são mais caros que o cimento Portland (Azevedo, 2002). Neste contexto, é de extrema importância, para a produção de estruturas de betão armado duráveis, ter em atenção diversos fatores na escolha do material a aplicar como ligante. A corrosão do aço constitui uma das causas que mais originam danos nas estruturas, devido ao teor de cloreto livre que existe no material [(Dhinakaran, 2012), (Yang, 2002), (Chindaprasirt, 2007), (Montemor, 2003)]. Existem outras justificações, por exemplo recobrimento insuficiente, que, em casos de pontes, prejudicam o funcionamento destas estruturas. Não depende da opção estrutural em si. Mas também aqui, o ataque dos cloretos que penetra nos poros de betão armado poderá ser diminuído através da adição de cinzas volantes, sílica de fumo, metacaulino ou resíduos [(Dhinakaran, 2012), (Gruber, 2001), (Basheer, 2002), (Seshasayi, 2004)].

Neste paradigma, a atitude da comunidade científica foi sendo, cada vez mais, a de procurar um novo material que deve ser discutido a partir de uma base científica consistente, através de propriedades mecânicas estruturais exigidas, através de técnicas excecionais de aplicação e realização em obra, e, ao mesmo tempo, uma componente comercial atrativa e com forte contribuição para o meio ambiente. As propriedades mecânicas exigidas são as que, analisadas na conceção de estruturas à luz dos Eurocódigos Estruturais apresentam segurança na sua aplicação. As técnicas de aplicação e realização em obra são também importantes, sendo que têm influência nas capacidades resistentes.

Para a valorização de um resíduo proveniente de um processo de fabrico específico, no contexto da sua utilização como material industrial, é necessário conhecer, em primeiro lugar, a influência no desempenho da mistura. É necessário também conhecer as quantidades produzidas de tal resíduo com o objetivo de prever a indispensabilidade deste na mistura final de compostos. Só assim é possível saber da viabilidade da solução encontrada.

2.2 Materiais incorporados como ligante

Materiais pozolânicos são compostos que na natureza se encontram em estado sólido e que são maioritariamente constituídos por aluminossilicatos de origem natural ou artificial, apresentando assim um alto teor de sílica em estado reativo. Os que são mais utilizados e que são alvo de mais pesquisa e trabalho académico são a sílica de fumo, as cinzas pozolânicas volantes de origem da queima do carvão para produção de energia termoelétrica e o metacaulino.

A sílica de fumo é um subproduto que é obtido durante o processo de fabricação de metais e ligas de silício. Neste processo, em alto forno são libertados gases que contêm um pó com partículas de reduzida dimensão e cuja composição química contém uma percentagem muito elevada de dióxido de silício, percentagem esta que é superior a 80% / 90%. Com a incorporação deste material na formulação de betão normal foi possível passar de um betão com uma resistência à compressão de 25 Mpa a 30 Mpa, nos anos 70, para os 100 Mpa, na atualidade, os designados betões de alta resistência.

As cinzas volantes resultam da queima do carvão em centrais termoelétricas. Nos anos 30, quando a quantidade deste resíduo era significativa, este material começou a ser incorporado nas misturas betuminosas com a tentativa de substituir parte da quantidade de cimento usada, tornando assim a mistura menos dispendiosa. A mistura resultante da sua incorporação apresentava melhorias em algumas propriedades do betão. Quando usado em substituição do cimento Portland apresenta variadas melhorias, entre elas, o aumento das forças de compressão após os 28 dias, o aumento da resistência ao ataque de sulfatos, a diminuição do calor de hidratação, o aumento da trabalhabilidade, a diminuição da permeabilidade, diminuição da quantidade de água usada e diminuição do custo (Camões, 2002).

A caulinite é um composto mineral que atualmente é usado para fins industriais diversos, desde o uso na construção civil, constituinte principal do cimento Portland branco, incorporação deste no gesso para revestimento de alvenarias, passando por ser a matéria-prima na indústria cerâmica (fabricação de porcelanas e louça sanitária) até ao uso na medicina (absorvente de toxinas no aparelho digestivo). Ao submeter este material a um aquecimento de 750°C, durante um determinado intervalo de tempo, irá transformá-lo numa metáfase amorfa, designada por metacaulino. Do ponto de vista químico, este produto apresenta uma forte potencialidade para ser combinado com outros elementos. De acordo com Courard (2003), ao misturar este produto com elementos maioritariamente compostos por materiais pozolânicos e alcalinos, como por exemplo o hidróxido de sódio e o silicato de sódio, o metacaulino irá ser ativado, criando assim, um processo reativo rápido de dissolução

e condensação onde se irão formar materiais que endurecem e adquirem uma notável resistência mecânica e química, isto a uma temperatura ambiente. Li, Z. e Ding, J. (2003a), mostraram que o metacaulino é um material muito útil para melhorar a qualidade do betão, aumentando a sua resistência, reduzindo o tempo de obtenção de presa, revelando-se assim um material promissor para o fabrico de betão com alto desempenho. Tipicamente, o metacaulino e as cinzas volantes são materiais atualmente incorporados no betão, substituindo entre 5% e 20% do peso de cimento Portland.

Também Fernandes (2013) e Gonçalves (2009), revelam que o desenvolvimento de novos ligantes obtidos através da calcinação do caulino, e inclusão destes nas misturas de cimento, tem o mesmo desempenho e qualidade, ao mesmo tempo que permitem, durante o processo de fabrico uma redução acentuada da produção de CO₂, poupando assim o ambiente e a energia. Tendo as características apresentadas, e sabendo que este material é regularmente utilizado para modificar parcialmente algumas composições de betões, neste trabalho usou-se o metacaulino como ligante. Existem em Portugal vários jazigos de caulino, situados numa faixa granítica entre Viana do Castelo e Peniche. Também se sabe que a sua composição química é semelhante, sendo possível assim obter metacaulino português com qualidade (Fernandes, 2013), caso haja a possibilidade de criação de uma indústria ligada à produção deste material.

Na Tabela 2.1 mostram-se, resumidamente, as características dos materiais mais habituais de serem adicionados ao cimento Portland com vista a melhorar as propriedades do ligante. Esta tabela foi adaptada a partir doutra elaborada pela empresa americana Monolithic.

Tabela 2.1 - Características de materiais aditivados ao betão.

	Cinza volante	Sílica de fumo	Metacaulino
Reatividade	<i>Moderada</i>	<i>Elevada</i>	<i>Elevada</i>
Aumento de resistência no betão	<i>Ganho significativo (a longo prazo)</i>	<i>Significativo aumento (a curto e a longo prazo)</i>	<i>Significativo aumento desde o momento em que a mistura começa a ganhar presa. (a poucos dias de cura e a longo prazo)</i>
Aumento da durabilidade no betão	<i>Moderado</i>	<i>Aumento significativo</i>	<i>Aumento significativo</i>
Trabalhabilidade	<i>Elevado</i>	<i>Reduzida trabalhabilidade. Presa lenta, requer o uso plastificantes.</i>	<i>Boa trabalhabilidade. Em comparação com a sílica de fumo apresenta uma consolidação mais rápida e menos retração plástica.</i>
Aparência	<i>Cinzento</i>	<i>Escura (Preto)</i>	<i>Branco e brilhante</i>
Sustentabilidade no fabrico	<i>Na mistura apenas substituí o betão até uma quantidade determinada</i>	<i>Na mistura apenas substituí o betão até uma quantidade determinada</i>	<i>Na mistura apenas substituí o betão até uma quantidade determinada</i>
Qualidade no fabrico	<i>Recolha natural Subproduto da produção elétrica através da inceneração de carvão</i>	<i>Subproduto da fundição de silício</i>	<i>A norma ISO 9002 é uma norma dedicada à sua produção que assegura as suas qualidades</i>

Na Tabela 2.2 apresentam-se os elementos químicos dos diferentes tipos de ligantes estudados nesta dissertação: metacaulino (Met); cinza da cozedura do tijolo (Cinza); cerâmica não cozida (Cnc); cerâmica cozida (Cc) e cimento Portland (CP). Também são apresentados valores para as cinzas volantes (Cv) e sílica de fumo (Sf), largamente utilizados neste tipo de estudos.

Tabela 2.2 – Elementos químicos dos diferentes ligantes.

	Met	Cinza	Cnc	Cc	CP	Cv	Sf
SiO ₂	53,0%	39,6%	76,1%	77,2%	21,0%	55,3%	92,9%
Al ₂ O ₃	43,8%	7,45%	20,4%	19,8%	6,0%	25,7%	0,69%
K ₂ O	0,19%	3,38%	1,12%	1,1%	0,75%	0,60%	1,19%
TiO ₂	1,70%	0,69%	0,51%			1,30%	
Fe ₂ O ₃	0,43%	2,87%	0,85%	0,09%	3,0%	5,30%	1,25%
CaO	0,02%	29,7%			61,5%	5,60%	0,4%
MgO	0,03%	2,51%			4,0%	2,10%	1,73%
SO ₃	0,03%	12,2%	0,16%	0,17%	2,75%	1,40%	
LOI	0,46%					1,90%	1,19%
Cor	Branco	Preto	Bege	Branco	Cinza	Preto	Preto

Os valores dos compostos químicos para o metacaulino, a cinza, a cerâmica não cozida e a cerâmica cozida foram determinados através de uma análise elementar realizada no Departamento de Ciências da Terra da FCTUC. Os valores apresentados para a cinza volante foram consultados na referência Rafat Siddique (2003); os valores dados para a sílica de fumo são os revelados por Li, Z. e Ding, J. (2003a); e os valores para o cimento foram descritos pelo Professor Emin Erdem (2014).

Tanto para a mistura de cimento Portland, como para a mistura de Metacaulino, é necessário compreender melhor os processos químicos que ocorrem, e que novos compostos são formados, desde o instante em que o processo de mistura começa até à obtenção de presa do provete. A comparação dos diferentes ligantes passa por distinguir as diferentes percentagens de elementos químicos. De acordo com Erdem (2014), durante a produção de cimento, e/ou compostos formados através de uma base de aluminossilicatos, são criados os seguintes produtos apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Compostos formados no betão.

Nome	Fórmula Química	Abreviatura
Silicato Tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferro aluminato tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

É ainda muito difícil perceber quais as composições químicas adequadas para cada aplicação de betão ou materiais ativados alcalinamente. Existem apenas relações entre compostos da mistura. Por exemplo, no betão, a relação água/cimento é a que mais está relacionada com as propriedades resistentes, pelo menos daquilo que se conhece. Por outro lado, para materiais ativados alcalinamente, Cristelo (2009) e Pereira (2013) revelam a razão entre aluminossilicatos, a concentração de hidróxido, a razão entre o silicato e o hidróxido e a razão entre o ativador e os materiais sólidos na mistura.

Os quatro compostos referidos na tabela anterior são os compostos que têm maior influência nas propriedades resistentes das misturas segundo Erdem (2014). A Tabela 2.4 mostra a influência de tais compostos na mistura.

Tabela 2.4 - Influência dos compostos formados no betão.

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reatividade	<i>Moderada</i>	<i>Lenta</i>	<i>Rápida</i>	<i>Moderada</i>
Libertação de calor	<i>Alta</i>	<i>Baixa</i>	<i>Muito Alta</i>	<i>Moderada</i>
Valor de “cimento” inicial	<i>Elevado</i>	<i>Baixo</i>	<i>Elevado</i>	<i>Baixo</i>
Valor de “cimento” último	<i>Elevado</i>	<i>Elevado</i>	<i>Baixo</i>	<i>Baixo</i>

O silicato tricálcico C_3S apresenta muita facilidade para a ocorrência de reações químicas, desenvolvendo uma resistência inicial elevada da pasta ao mesmo tempo que liberta energia sobre a forma de calor. Por outro lado, o silicato dicálcico C_2S gere uma menor quantidade de calor mas contribui para uma maior resistência inicial. Na prática, as misturas em que há uma elevada percentagem de C_3S podem ser aplicadas nas estradas, pontes e ambientes com temperatura baixa. As misturas em que há uma maior percentagem de C_2S são mais adequadas para barragens e muros de suporte, por exemplo. O composto C_3A é rápido a reagir com a água presente na mistura, ou presente no ativador. Esta reação origina também um rápido endurecimento ao mesmo tempo que liberta uma grande quantidade de calor (Erdem, 2014).

Da análise conjunta da Tabela 4.2, da Tabela 4.3 e da Tabela 4.4, fica patente que uma mistura ativada alcalinamente, em que o ligante é constituído por metacaulino, tem maior percentagem de C_3S , C_2S e C_3A do que uma mistura com cimento Portland. A mistura de cimento Portland contém maiores quantidades de ferro aluminato tetracálcico C_4AF , sendo que a contribuição deste para as resistências do betão é reduzida.

Admitindo o interesse cada vez maior por parte da comunidade científica, existem ainda por resolver, ou por maximizar, as percentagens de compostos que interferem nos processos de ativação alcalina, que ajudem a compreender o comportamento mecânico e resistente das misturas (Teixeira Pinto, 2006).

Os cimentos de classe superior de resistência têm na sua composição uma maior presença de silicatos tricálcicos e uma menor finura de partículas, tanto de agregados como de ligante, quando comparado com os cimentos em que lhe foi conferida uma classe inferior. O tipo de cimentos com classe elevada de resistência, também apresenta uma elevada resistência inicial. Contudo, não tem um crescimento das resistências a longo prazo tão acentuado como o verificado para os betões de classe inferior. Tal como referido anteriormente, também a resistência à compressão do betão pode apresentar uma correlação com os agregados utilizados e a sua granulometria, através da resistência da ligação do ligante com o agregado.

2.3 Ativação Alcalina

Ativação alcalina é um processo químico, em que um composto (ligante), maioritariamente formado por aluminossilicatos, com partículas de reduzidas dimensões, é misturado com um ativador alcalino com vista a produzir uma mistura que endurece em tempo reduzido e apresenta valores de resistência elevados. Škvára (2007) revela que este processo químico é complexo e ainda não o consegue descrever totalmente. Este composto, tal como anteriormente referido, poderá ser o metacaulino, ou as cinzas volantes, ou a sílica de fumo, entre outros, e o ativador é muitas vezes uma mistura de hidróxido de sódio com silicato de sódio (Fernández-Jiménez, 2008). O ponto de vista químico sobre os compostos alcalinos não será aqui analisado. Contudo, é importante referir a seguinte diferença em relação às misturas formadas por cimento Portland. Na mistura de cimento Portland, a água H_2O presente na mistura será totalmente consumida para a obtenção de presa, enquanto que na mistura geopolimérica, a água é um “transportador” dos agentes alcalinos Škvára (2007), o que justifica que após a obtenção de presa possa existir água nos provetes ou na estrutura. Este acontecimento poderá revelar que as ações químicas não foram todas concluídas. A qualidade dos geopolímeros (resistência) depende da fonte de aluminossilicatos, do ativador, dos agregados, das quantidades de água utilizadas e das quantidades de ligantes utilizadas.

A produção de cimento com base em ativação alcalina, ou cimento formado por geopolímeros, é realizado a temperatura e pressão ambientes (Pereira, 2013), sendo esta uma característica ideal, sendo que importa garantir condições semelhantes de aplicação do betão armado, ou de geopolímeros. Teixeira Pinto (2003) refere que em apenas 4 horas, depois da realização da mistura, tinha-se atingido cerca de 70% da resistência final dos compostos.

As características e propriedades da mistura final dependem também das propriedades das matérias-primas e das diferenças que os processos de fabrico podem envolver. Do estudo, mais pormenorizado, da prestação de cimento Portland como ligante, chega-se à conclusão que este funciona apenas como uma cola entre os agregados e os outros compostos da mistura. Por outro lado, os cimentos de base alcalina reagem com os sistemas de aluminossilicatos, numa reação pozolânica rápida, e que rapidamente obtêm capacidades semelhantes às verificadas para a maior parte das rochas não sedimentares de natureza siliciosa encontradas na natureza (Teixeira Pinto, 2006). O resultado desta mistura pode ser aliás considerado como uma rocha sintética cuja estrutura molecular é formada por uma rede tridimensional amorfa de átomos de silício e alumínio. A durabilidade apresentada por uma mistura obtida através de ativação alcalina é muito superior à verificada por misturas compostas à base de cimento Portland. Devido à sua durabilidade acredita-se que as estruturas antigas presentes ainda na Terra tenham como base cimentos de ativação alcalina, como é o caso das Pirâmides de Gizé, no Egipto (Davidovits e Morris, 1988).

Bakharev (2005) e Pereira (2013) revelam que os geopolímeros apresentam uma elevada resistência mecânica e uma elevada dureza superficial. Em algumas experiências realizadas, a título exploratório, foi possível observar que as superfícies em contacto com o PVC, depois de obtida a presa da mistura, apresentavam pouca porosidade. Tal aspeto deve-se ao facto de os geopolímeros terem níveis de permeabilidade muito baixos, quando comparados com o cimento Portland. Outra das grandes qualidades deste material diz respeito à inércia química. Mendonça (2007) revela que o ataque de ácido sulfúrico e de ácido clorídrico em materiais ativados alcalinamente não é tão prejudicial, isto é, verifica-se uma pequena taxa de dissolução quando comparada com outros materiais. No caso particular do cimento Portland a taxa de dissolução chega a 80%, quando a mistura fica em contacto com uma solução de ácido sulfúrico.

Quanto à aplicação destes materiais, Teixeira Pinto (2002) e Pereira (2013) referem a sua utilização em betões de fundação, estacas, sapatas e todas as obras enterradas, bases de pavimentos, estruturas em contacto com meios agressivos, revestimentos de estruturas degradadas, muros de suporte e confinamento de matérias perigosas, como metais pesados, ou produtos tóxicos. Este material pode ser utilizado em estruturas pré-fabricadas, em mobiliário urbano e em material de apoio a material urbano, como por exemplo, blocos de encaixe para pavimentos, caixas de esgotos, bancos de jardim, entre outros.

Devido ao facto da investigação acerca dos geopolímeros ser recente, a indústria tem estado num processo lento de criação das matérias-primas de base. Williams (2011) indica que os custos de obtenção dos ligantes geopoliméricos podem ser mais baratos, ou mais caros, que os do cimento Portland, dependendo da fonte de material, das fontes de energias utilizadas e dos meios de transporte. A incorporação de resíduos em misturas permitirá um

menor consumo da matéria-prima. Contudo, é necessário ponderar as percentagens de substituição e ao mesmo tempo garantir que a produção de resíduos não é alterada.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Ao longo deste capítulo é explicitado o processo laboratorial de realização e estudo dos provetes e das suas composições. Apresentam-se, primeiramente, as características dos materiais incorporados nas misturas e os aspetos que influenciam as reações químicas de geosíntese. Aborda-se também a sua afetação no comportamento mecânico dos geopolímeros. É também efetuada a descrição das misturas, desde o instante inicial até serem desmoldados os provetes. São ainda descritos os ensaios e o modo como são alcançados os resultados dos parâmetros mecânicos.

3.1 Materiais

3.1.1 Metacaulino

O metacaulino usado nas experiências laboratoriais foi um metacaulino de alta reatividade das suas partículas quando misturado com outros materiais. Este produto, comercialmente designado por “*MetaMax® HRM*”, foi produzido em conformidade com a norma *ASTM C618* e com a certificação *ISO 9002* e foi fornecido, sob a forma de saco, pela empresa americana *Engellhard*, hoje *BASF*. De acordo com esta empresa, este composto é comercializado como sendo um aditivo do betão, o qual permite realizar acabamentos de qualidade superior e reduz imperfeições, tais como manchas e pequenas fissuras resultantes da retração do cimento.

Este material consiste num pó branco com as características de um material de partículas extra finas. Apresenta uma densidade relativamente alta e também um elevado teor de aluminossilicatos. Ao ser misturado com outros materiais finos e reativos irá ter elevadas reações químicas de combinação com outros compostos, o que pode levar a um incremento das características físicas da solução global. Nas misturas, o metacaulino foi utilizado como ligante, tendo a função principal de ser o “substituto” do cimento na mistura.

A sua composição química elementar foi referida no Capítulo 2. Desconhecem-se contudo as alterações ao longo do tempo, quer quando ensacado, quer quando o saco está aberto. A dimensão média das partículas deste material é de $1,2 \mu\text{m}$ e apresenta uma superfície específica de $13 \text{ m}^2/\text{g}$.

3.1.2 Areia

A areia usada como agregado neste trabalho foi uma areia extraída junto ao nó da autoestrada A1 na zona de Taveiro.

No sentido de se conhecer a composição elementar da areia utilizada, foi feita uma análise semelhante à que foi realizada para as cinzas e para a cerâmica. Pretendia-se verificar quais os elementos que a constituem e estudar a interferência dos seus elementos nas reações de geopolimerização. A Tabela 3.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.1 – Composição elementar da areia.

Composto Químico	Percentagem
SiO ₂	85,16 %
Al ₂ O ₃	6,67 %
K ₂ O	4,79 %
MgO	1,51 %
P ₂ O ₅	0,46 %
Fe ₂ O ₃	0,37 %
FeO	0,33 %
TiO ₂	0,31 %
CaO	0,26 %
Cl	0,06 %

Na Figura 3.1 é possível observar a curva granulométrica da areia a traço cheio e a tracejado apresenta-se a curva granulométrica da cinza.

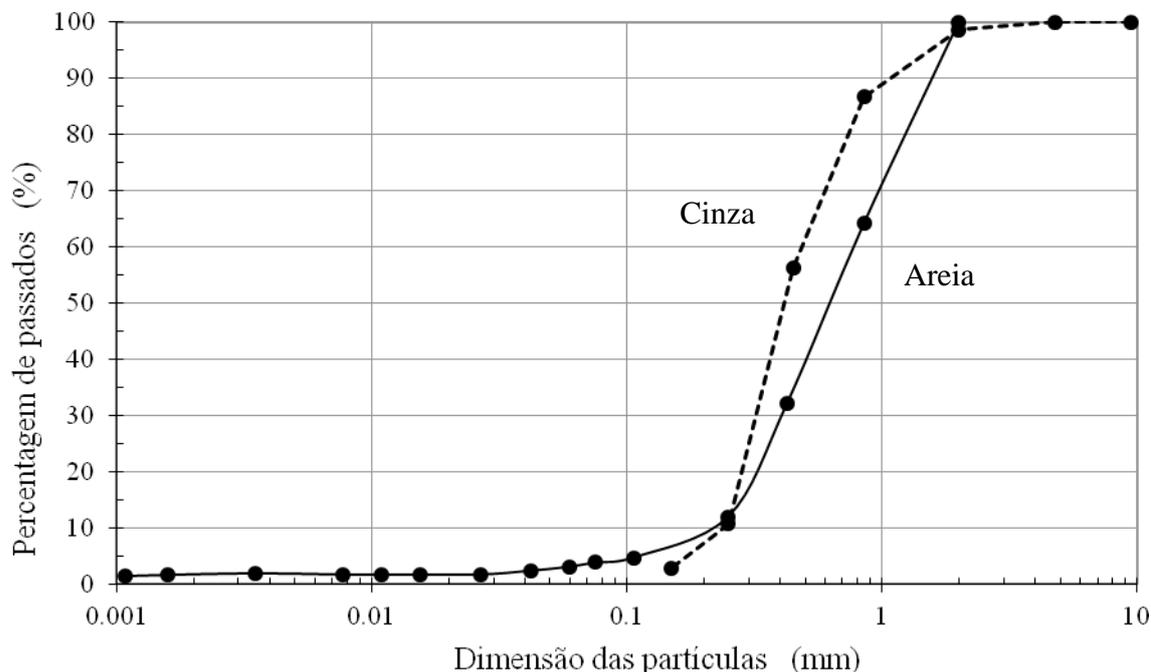


Figura 3.1 - Curva granulométrica da areia e da cinza.

3.1.3 Silicato de sódio

O silicato de sódio $NaSiO_4$, fornecido pela empresa “Sociedade Portuguesa de Drogas, S.A”, é designado por “*Silicato de Sódio D40*”. É um material que à temperatura ambiente se encontra no estado líquido, apresentando uma elevada viscosidade, sendo também incolor e inodoro.

3.1.4 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio $NaOH$ é um composto preparado a partir da Soda Cáustica, à qual se adiciona água. No mercado encontra-se disponível soda cáustica em grãos ou em palhetas. Para este processo experimental foi utilizada soda cáustica em palhetas fornecida pela empresa “*Sociedade Portuguesa de Drogas, S.A*”. Esta mistura foi realizada na proporção de 1 kg de soda cáustica para 2,5 litros de água, o que corresponderá a uma concentração de 12,5 molal.

3.1.5 Cinza

A cinza utilizada teve origem nos resíduos da produção de tijolo cerâmico da fábrica *F. Santiago S.A.*, localizada em Cumeira de Cima, no concelho de Porto de Mós. Durante o processo de fabrico, estas cinzas ficam depositadas entre os tijolos empilhados, tal como se ilustra na Figura 3.2, sendo removidas periodicamente.



Figura 3.2 – Depósito de cinzas na linha de fabrico (Pormenor).

A produção deste resíduo decorre da biomassa utilizada como fonte de energia no processo de produção. Quando a produção é realizada com recurso a gás não são produzidos resíduos. Este resíduo não tem propriedades poluentes e portanto não carece de qualquer tipo de tratamento especial, por exemplo tratamento de estabilização ou inertização química para proteção do meio ambiente. Após peneiração, esta cinza é, em casos especiais, incorporada na mistura argilosa para a produção de tijolos e telhas quando é desejada uma tonalidade especial.

A inclusão deste material como ligante deveu-se aos factos seguintes: de ter sido submetido a elevadas amplitudes térmicas; de apresentar uma granulometria semelhante à do cimento Portland depois de se submeter a um processo de peneiração; e de apresentar características químicas muito semelhantes às da cinzas volantes. No Capítulo 2 encontram-se descritas as cinzas usadas no processo experimental e as cinzas volantes.

A Norma *NP EN 450-1* classifica cinzas volantes como sendo “*pó fino constituído principalmente por partículas vítreas de forma esférica resultante da queima de carvão pulverizado, com ou sem materiais de co-combustão, com propriedades pozolânicas e constituído essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 e que: é obtido por precipitação electrostática ou mecânica das poeiras arrastadas pelos gases resultantes da queima do carvão pulverizado em centrais de produção de energia; e poderá ser processado, por exemplo por classificação, seleção, peneiração, secagem, mistura, moagem ou redução de carbono, ou por combinação*

destes processos, em instalações adequadas, caso em que poderá ser obtido com cinzas volantes de origens diferentes, cada uma conforme com a definição dada neste secção.”

Tendo somente em conta as propriedades e as características químicas da cinza, sendo que estas representam grande parte da justificação para a aplicação deste material em misturas de betão e em misturas ativadas alcalinamente, poder-se-á dizer que a cinza utilizada tem características muito semelhantes às cinzas consideradas como cinzas volantes para aplicação em misturas de material com aplicação estrutural.

Inicialmente foram recolhidas 4 amostras de cinza, em diferentes localizações da linha de produção da fábrica. Contudo, depois de uma análise granulométrica e química, verificou-se que as amostras não apresentavam características distintas, passando assim a ser consideradas como uma amostra única. Assim, a cinza foi peneirada com peneiros normalizados da *ASTM (American Society for Testing and Materials)*. A curva granulométrica já foi anteriormente apresentada na Figura 3.1.

Com o objetivo de estudar a influência da granulometria das partículas de cinza adicionadas à mistura, esta foi peneirada e subdividida em três granulometrias diferentes, designadas por; “fina”, “média 1” e “média 2”. A cinza “fina” é a que passa no peneiro 0.150 e fica retida no depósito, a “média 1” é a que passa no peneiro 0.250 e fica retida no peneiro 0.150, e a cinza “média 2” é a que passa no peneiro 0.425 e fica retida no peneiro 0.250. A Figura 3.3 ilustra, à esquerda, a amostra de cinza sem ser peneirada e, à direita, a amostra de cinza já peneirada e separada por granulometrias distinta.



Figura 3.3 – Amostras de cinza.

3.1.6 Cerâmica não cozida

A cerâmica obtida para a incorporação nas misturas foi proveniente da fábrica “*DEARTIS*”, situada na localidade de Casais de Baixo, no concelho de Porto de Mós. Esta fábrica dedica a sua atividade à produção e comercialização de cerâmica artística. A mistura

que é utilizada para criar a pasta cerâmica é realizada pela própria fábrica. Esta mistura é composta por leiva de barro branco (30%), caulino em pó (30%), calcite em pó (10%) e sílica em pó (30%). A esta mistura base é adicionado Carbonato de Bário, com o objetivo de remover os sais das matérias-primas, Sulfato de Cobalto para branquear a pasta, e por fim, Silicato de Sódio para unir a pasta. Depois da mistura estar realizada esta é colocada em moldes e posteriormente colocada numa estufa, com ambiente condicionado. Ao fim de 3 ou 4 dias nestas condições, é obtido o material designado por Cerâmica Não Cozida CNC. A Figura 3.4 mostra a aparência deste material fragmentado. Este material tem cor creme e é facilmente quebrável manualmente.



Figura 3.4 - Fragmentos de Cerâmica Não Cozida.

Com o objetivo de se obter este material, em pó e com granulometria semelhante à Cinza Fina, foi necessário triturar e moer os fragmentos. A Figura 3.5 expõe o este processo.



Figura 3.5 - Fragmentação da Cerâmica não cozida.

3.1.7 Cerâmica cozida

A Cerâmica Cozida CC é obtida de forma equivalente à CNC, sendo que esta é apenas cozida num forno cerâmico a 1050°C . O processo de fragmentação foi ligeiramente mais difícil, devido ao facto da CC apresentar maior rigidez, tal como demonstra a Figura 3.6. O pó foi obtido por moagem dos fragmentos.



Figura 3.6 - Fragmentação e peneiração da Cerâmica cozida.

3.1.8 Cimento

No sentido de se obter um material para se poder comparar os parâmetros resistentes estudados, foi necessário construir um conjunto de provetes constituídos por uma argamassa com cimento Portland normal. O cimento utilizado nesta mistura foi o cimento Portland de Calcário, fornecido pela empresa “Cimpor” e que tem como nome comercial *CEM II/A-L 42,5R*. Este foi o escolhido por ser um dos tipos de cimento mais utilizado na realização de elementos estruturais em obras de engenharia civil e por apresentar, quando aplicado numa composição correta, um valor de resistência mecânica à compressão de $42,5\text{ MPa}$ aos 28 dias.

3.1.9 Água

A água utilizada é a água da rede doméstica de abastecimento pública que é fornecida ao Laboratório de Estruturas do DEC-FCTUC, estando esta de acordo com a norma *NP ENV 206*.

3.2 Procedimento experimental

A ativação alcalina tem por base variadas misturas de compostos que conjugados entre si formam geopolímeros. A serem aplicados como ligante, estes compostos poderão ser, o metacaulino, as cinzas volantes, as cinzas vulcânicas, pós cerâmicos, sílica de fumo entre outros. Entre estes, o metacaulino é o que apresenta melhores propriedades estruturais, pelas razões já referidas, razão pela qual este composto é o ligante de referência utilizado nas misturas. Como habitualmente é utilizada a razão de 1 para 3 na relação cimento-agregados dos betões usuais, utilizou-se esta relação também para as misturas dos geopolímeros. Neste caso só foram utilizados microagregados devido ao tamanho dos provetes, ou seja, não se utilizou qualquer tipo de brita. Como ativador utilizou-se apenas as quantidades necessárias para garantir a trabalhabilidade na mistura.

Com o objetivo de analisar a aplicabilidade estrutural dos restantes ligantes alternativos, decidiu-se promover essa avaliação substituindo parcialmente e substancialmente o ligante metacaulino da mistura base. Por substituição parcial entendeu-se 30%, e 70% por substituição substancial. Tendo em conta o espaço e o tempo para desenvolver este trabalho, optou-se por analisar um número superior de ligantes alternativos, em vez de outras percentagens de substituição do mesmo ligante alternativo.

3.2.1 Procedimento experimental base e misturas

Começou por se preparar o hidróxido de sódio $NaOH$ a partir da soda cáustica, misturando-a com água, para se obter uma concentração aproximada de 12,5 mol, de acordo com o anteriormente exposto. Neste caso particular, utilizou-se 500g de soda cáustica e 1,25 litros de água. A soda cáustica foi pesada numa balança calibrada e a água foi medida numa proveta graduada.

A mistura foi efetuada num recipiente de metálico, visto que, durante esta mistura dá-se uma reação exotérmica, atingindo cerca de 70°C, a qual liberta hidrogénio, sob a forma de gás. Nestas condições, importa prevenir a inalação do gás, bem como evitar qualquer contaminação da amostra de hidróxido de sódio.

Posteriormente, foi necessário deixar arrefecer parcialmente esta mistura de $NaOH$. De facto, não se conhece a influência da temperatura a que ocorre a mistura dos dois ativadores nas propriedades resistentes finais do provete.

Finalmente, a composição do ativador é conseguida através de mistura de $NaOH$, com silicato de sódio $NaSiO_4$, na proporção de 1(hidróxido):2(silicato). Neste caso, utilizou-se

400g de $NaOH$ e 800g de $NaSiO_4$. Esta mistura foi sempre realizada num recipiente de vidro, numa balança calibrada. A Figura 3.7 , exemplifica esta composição.



Figura 3.7 – Composição do ativador.

Tal como referido anteriormente, neste trabalho foram realizadas diversas misturas, correspondendo à junção de um inerte, com um ligante, o qual incorporava o ativador. As designações são indicadas na Tabela3.2. Pretendia-se que cada mistura permitisse construir 6 provetes $40mm \times 40mm \times 160mm$. Assim, em todas estas misturas, foi sempre utilizada a mesma quantidade de areia; 1875g. A composição do ativador já foi indicada; a quantidade varia de acordo com o exposto na Tabela3.2. A composição do ligante tem por base o metacaulino, substituindo, em alguns casos, parte deste por outro ligante alternativo, tal como descrito na Tabela 3.2.

Devido ao facto de durante as misturas se verificar um excedente de fase líquida foi decidido reduzir as quantidades do ativador. Desta forma, para a mistura com 70% cinza “Média 1” e 30% metacaulino reduziu-se 7% em peso, para a mistura com 70% cinza “Média 2” e 30% metacaulino reduziu-se 14% e para a mistura com 70% cerâmica não cozida e 30% metacaulino reduziu-se 20%.

Tabela 3.2 - Misturas realizadas.

Designação	Metacaulino	Ligante alternativo	Ativador
<i>MET100</i>	750g		900g
<i>CNC30</i>	525g	225g	900g
<i>CC30</i>	525g	225g	900g
<i>CF30</i>	525g	225g	900g
<i>CM130</i>	525g	225g	900g
<i>CM230</i>	525g	225g	900g
<i>CNC70</i>	225g	525g	720g
<i>CC70</i>	225g	525g	900g
<i>CF70</i>	225g	525g	900g
<i>CM170</i>	225g	525g	837g
<i>CM270</i>	225g	525g	774g

Depois destas quantidades estarem medidas, realizou-se a mistura, numa misturadora, da marca Hobart, com uma capacidade aproximada entre 4/5 litros, tal como se ilustra na Figura 3.8, em condições ambientes de temperatura e pressão. A misturadora tem um recipiente em aço inoxidável e a pá misturadora tem as características exigidas na norma *NP EN 196*, correspondendo também aos requisitos de velocidade para a pá. De acordo com Teixeira Pinto (2002), este tipo de misturadora é a indicada pois, “a alta viscosidade da pasta formada exclui totalmente a utilização de betoneiras do tipo gravítico”, usuais na tecnologia dos betões. Na misturadora começa-se por colocar os agregados e posteriormente são lentamente colocados os restantes materiais (Teixeira Pinto, 2002).



Figura 3.8 – Mistura dos ingredientes na misturadora.

Depois, a mistura é colocada nos moldes. Também de acordo com a norma *NP EN 196*, cada molde tem três compartimentos horizontais, cada qual com uma secção transversal de 40 mm x 40 mm e um comprimento de 160 mm. A Figura 3.9 demonstra o processo. Nesta

figura é possível observar as diferentes propriedades viscosas da pasta. Esta propriedade, não analisada, poderá estar correlacionada com as propriedades mecânicas do material. É importante referir que, as misturas em que havia uma substituição de 70% de metacaulino aparentavam maior viscosidade. Os provetes foram envolvidos numa película de plástico com o objetivo de evitar que a água se evaporasse e as reações químicas não se completassem, alterando assim as condições de presa dos provetes, como ilustra a Figura 3.10.



Figura 3.9 – Colocação da mistura nos provetes.



Figura 3.10 – Película plástica colocada já no provete.

Após a experiência laboratorial adquirida, notava-se que esta pasta apresentava uma grande tendência para aderir fortemente às superfícies de aço dos moldes, sendo muito difícil desmoldá-lo aos 7 dias. Casos houve em que as tentativas de descofragem danificavam certos provetes, tornando-os inúteis. O recurso a óleo descofrante não teve qualquer resultado ao

nível da desmoldagem. Como se soube entretanto que seria diminuta a adesão desta pasta ao PVC, surgiu a ideia de utilizar duas linhas de fita-cola nas paredes internas que confinam os provetes (ver Figura 3.11). No momento da descofragem já foi possível notar algumas melhorias, ficando assim o registo e a confirmação que se poderia usar nos próximos provetes uma fita-cola mais larga, que tivesse a altura da totalidade da altura dos provetes, o que foi efetuado. Permaneceu no entanto a questão da redução das dimensões dos provetes por motivo da espessura da fita cola. Por fim, recorreu-se a uma laca V-66, utilizada como isolante em componentes eletrónicos. Ao preencher os vazios microscópicos das paredes de aço dos moldes, este produto resultou muito bem. Passou-se a utilizar nos restantes provetes.



Figura 3.11 – Aparência da fita cola (fina) nos provetes.

Após colocação da pasta nos moldes, foi necessário vibrá-los durante algum tempo de modo a compactá-la, ou seja a expulsar as bolhas de ar presentes na pasta. Este processo é muito importante na medida em que conduz a melhorias nas capacidades resistentes deste material. Neste caso, recorreu-se a mesa vibratória, ilustrada na Figura 3.12, durante 1 a 2 minutos. Usualmente, os betões e as argamassas de cimento Portland requerem muito menos tempo de vibração, tipicamente, 20 ou 40 segundos chegam. Estas pastas contêm inicialmente muito mais vazios, uma vez que a compactação pode reduzir o volume em quase 10%. Pelo contrário, as pastas formadas por geopolímeros não contêm tantos vazios inicialmente, não são tão compactáveis, bem como requerem muito mais tempo de compactação, em virtude da sua viscosidade.



Figura 3.12 – Compactação dos provetes na mesa vibratória.

Após vibração, os provetes foram guardados numa sala, sob condições de humidade e temperatura normais. A temperatura situou-se entre 17°C e 20°C e a humidade relativa do ar foi de 60/70%.

Todos os moldes foram descofrados aos 7 dias. Nesse mesmo dia foram tiradas as medidas e o peso de cada provete. Estes resultados encontram-se em anexo. Na Tabela A.1 mostra a largura de cada provete b , a respetiva altura h , a sua massa m , o seu volume V e a densidade d destes. Nesse mesmo dia eram colocados os extensómetros em dois provetes de cada mistura, obedecendo ao critério “de massa mais semelhante próximo da massa média”.

3.2.2 Anormalidades dos provetes

A mistura *CF70* aumentou de volume na fase de endurecimento. A evidência surgiu na fase superior dos provetes nos moldes, sensivelmente 60 minutos após colocação no molde. A Figura 3.13 ilustra a forma final destes provetes e a Figura 3.14 mostra como foram ensaiados. Até à data de submissão desta dissertação não se encontrou uma explicação consistente para este facto.



Figura 3.13 - Forma dos provetes *CF70*.

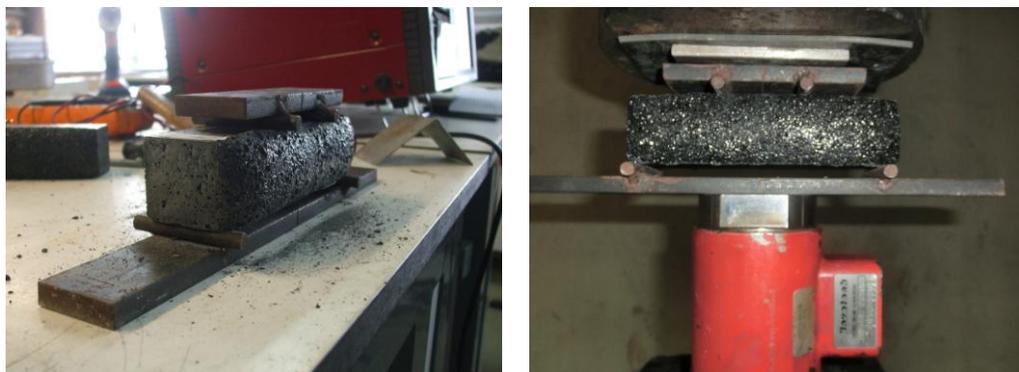


Figura 3.14 - Ensaio dos provetes *CF70*.

O aumento do volume foi gerado a partir do aumento da porosidade do material. Na Figura 3.15 ilustram-se os vazios do material.



Figura 3.15 - Porosidade dos provetes *CF70*.

Normalmente, aquando da desmoldagem dos provetes era perceptível, na película envolvente, uma pequena quantidade de um líquido de cor castanha. No caso da mistura *CNC70* registou-se uma quantidade superior de água.

3.3 Procedimentos de ensaio

No âmbito das estruturas o betão armado, a característica mecânica mais importante do betão corresponde à resistência à compressão. Pelo menos assim tem sido assumido na prática em geral. A função de resistir às tensões de tração cabe às armaduras. No entanto, o conhecimento pormenorizado de outras características importantes para a análise e

dimensionamento devem ser tidas em consideração: a resistência à tração, o módulo de elasticidade, etc. A verificação da segurança dos elementos estruturais inclui também, entre outras, a verificação das deformações e de abertura de fendas.

Assim, com o objetivo de permitir começar a conhecer as características mecânicas das misturas, isto é, obter valores que caracterizem os parâmetros necessários para a análise estrutural, foram realizados alguns ensaios laboratoriais, nomeadamente: o ensaio de flexão em fase elástica; o ensaio de rotura à tração por flexão; e o ensaio de rotura à compressão. Estes ensaios permitiram obter os seguintes valores: o módulo de elasticidade estático E_0 ; o módulo de elasticidade semi-estático E_I ; o valor da extensão de rotura por tração ε_t ; a tensão de rotura à tração σ_t e a tensão de rotura à compressão σ_c .

O módulo de elasticidade exprime a relação entre as tensões aplicadas e as deformações instantâneas obtidas no material. O valor estático deste parâmetro foi inicialmente determinado no ensaio de flexão em fase elástica. No ensaio de rotura à tração por flexão foi registado a evolução do carregamento e, quando fosse o caso, também das deformações. Sempre que existisse extensómetro montado no provete, o registo das extensões permitia conhecer o valor de ε_t . A carga, depois de transformada em tensões, permitia conhecer σ_t . Para além disso, conhecidas as evoluções das tensões e das deformações, seria possível avaliar E_I . Por fim, no ensaio de rotura à compressão foi determinado σ_c .

No caso dos provetes poliméricos, o ensaio de flexão em fase elástica foi realizado 14 dias depois da realização das misturas e os ensaios destrutivos foram realizados quando passavam 28 dias da mesma data. Para as argamassas, ambos os ensaios foram realizados aos 28 dias.

Foi parcialmente seguida a norma *NP EN 196-1*, a qual regulamenta um método de determinação das resistências à flexão e à compressão de argamassas de cimento. A dimensão dos provetes prismáticos $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ está também de acordo com a referida norma. Também esta norma indica que os provetes deverão ser submetidos a dois ensaios, um de rotura por flexão e, posteriormente, a um de rotura por compressão, dos meios prismas resultantes do primeiro ensaio. Este modo de procedimento permite a utilização de provetes mais pequenos, o que significa que para cada ensaio de compressão foram analisados 12 provetes por mistura. Apenas o modelo de carga centrada foi alterado para um modelo de duplo carregamento simétrico.

3.3.1 Ensaio de flexão em fase elástica

O ensaio de tração por flexão em fase elástica é realizado apenas nos provetes com extensómetro montado com o objetivo de avaliar o módulo de elasticidade estático E_0 . Como este ensaio é realizado em fase elástica, é possível avaliar E_0 recorrendo à aplicação da Lei de Hooke:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E_0 \quad (3.1)$$

onde σ indica a tensão, ε a deformação e E_0 é o módulo de elasticidade ou o módulo de Young.

Foi adotado o modelo de carga sugerido na norma *NP EN 12390-5*, tal como indica a Figura 3.16 e a Figura 3.17. Ambas as chapas e os 4 cilindros são feitos em aço, sendo a ligação realizada por soldadura. É necessário referir que a colocação do provete para ensaio foi sempre efetuada com rigor, isto é, a variação da colocação da placa superior que apoia no provete, induzindo-lhe o carregamento, nunca variou significativos milímetros para lá da sua posição prevista.

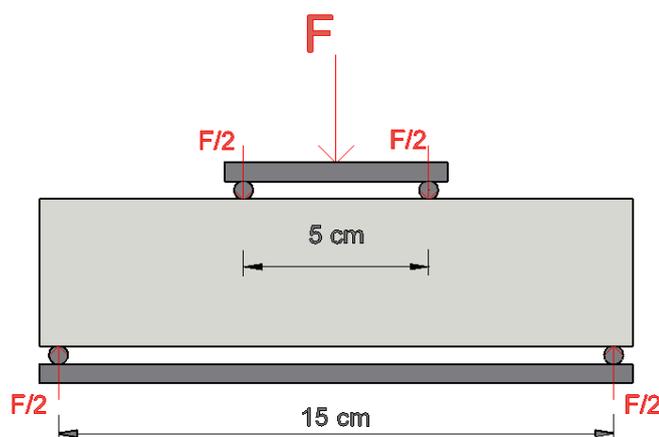


Figura 3.16 - Modelo de carga no ensaio de flexão.

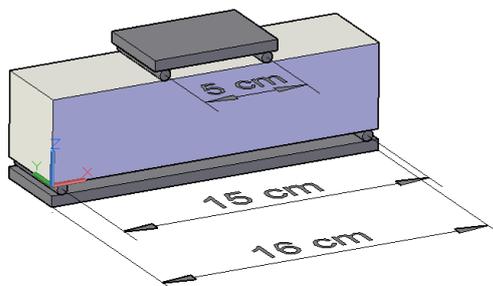


Figura 3.17 - Esquema de carga no ensaio de flexão.

Neste modelo, o provete é submetido a um momento fletor constante entre as cargas $F/2$. Este modelo tem a vantagem de criar um troço de tensões constantes onde é possível colocar um extensómetro. No entanto, a principal desvantagem reside na dúvida da tensão que a carga F gera. De facto, caso se recorra à análise estática, e se admita uma variação linear das tensões em altura, a relação será:

$$\sigma = 3L_1 \cdot F / b \cdot h^2 \quad (3.2)$$

onde, σ indica a tensão, $3.L_1$ é a distância entre apoios, F a força aplicada, b a base do provete e h a altura do provete.

Esta expressão coincide com a Fórmula (2) indicada na Norma *NP 12390-5*. Recorrendo alternativamente a um programa de elementos finitos, por exemplo o *SAP2000*, e utilizando uma malha regular de elementos finitos planos, com 2,5 mm de lado, formulados segundo a teoria de estado plano de tensões, aquela relação seria:

$$\sigma = 3,11L_1 \cdot F / b \cdot h^2 \quad (3.3)$$

se se tiver em consideração que os apoios se podem deformar livremente na horizontal. Para o caso oposto, em que os apoios estão fixos, a relação seria de:

$$\sigma = 1,52L_1 \cdot F / b \cdot h^2 \quad (3.4)$$

Para o que se segue neste trabalho adotar-se-á a expressão (3.2), a mesma que é referida na norma, para considerar eventuais defeitos de colocação do provete.

A carga F é aplicada manualmente com recurso a pesos conhecidos. São aplicados ao todo seis pesos: os primeiros quatro de $20 N$ aproximadamente; e os outros $50 N$ aproximadamente. No total são realizados 4 ciclos de carga e descarga em fase elástica, registando-se sempre as extensões correspondentes a cada conjunto de cargas aplicadas.

De referir que se instrumentaram extensómetros em apenas 2 provetes de cada mistura.

3.3.2 Ensaio de rotura à tração por flexão

Tendo como base o modelo do ensaio anterior, realizou-se o ensaio de rotura à tração por flexão na máquina de ensaio *Servosis* série *ME-402* do laboratório. Na Figura 3.18 pode visualizar-se um provete após rotura. O recurso a borrachas colocadas sob a célula de carga, e

no topo do esquema, destinam-se a absorver possíveis impactos gerados na prensa e a retardar a rotura do provete.



Figura 3.18 - Esquema do ensaio de rotura à tração por flexão.

O ensaio consiste na aplicação de uma deformação vertical, por intermédio de uma prensa hidráulica, com reduzida velocidade, até à rotura. Importa que o ensaio demore pelo menos 3 minutos de modo a reduzir possíveis efeitos dinâmicos. Simultaneamente, recorre-se ao DataLogger para registar a carga aplicada e a extensão correspondente, em intervalos consecutivos de 1 segundo até à rotura do provete. Na prática, o ensaio foi realizado em 2 fases. Numa primeira fase, a prensa hidráulica é programada para esta aplicar uma velocidade de 0,5 mm/s até que a carga atinja 0,1 kN, correspondendo a menos de 10% da tensão de rotura. Esta é a fase de “encosto” ao provete. Numa segunda fase, é realizado o ensaio de rotura à tração por flexão, programando a prensa hidráulica com um velocidade de 0,003 mm/s.

3.3.3 Ensaio de rotura à compressão

De acordo com a norma *NP EN 196-1*, este ensaio é realizado imediatamente a seguir ao ensaio de flexão, sobre os meios prismas resultantes, num equipamento específico, tal como se ilustra na Figura 3.19. Também a máquina de ensaio para a determinação deste parâmetro está de acordo com a norma anterior referida e com a *EN ISSO 7500-1*.



Figura 3.19 - Esquema do ensaio de rotura à compressão.

Este ensaio é realizado em duas fases, à semelhança do ensaio anterior. Depois de colocar e centrar cada prisma a ensaiar no dispositivo de ensaio, impõe-se uma velocidade de $0,1$ mm/s para “encosto”, até ser atingida uma carga entre 1 ou 4 kN, cerca de 10% da carga última de rotura do provete. Na segunda fase os provetes são submetidos a uma velocidade de $0,01$ mm/s até à rotura. Na Figura 3.20 é possível ver o tipo de rotura que resulta do ensaio e classifica-los, de acordo com a norma *NP EN 12390-3*, como sendo satisfatórios ou não satisfatórios. Para todos os provetes realizados, o tipo de rotura foi satisfatório. A Figura 3.21 mostra o resultado dos provetes depois de ser atingida a rotura.

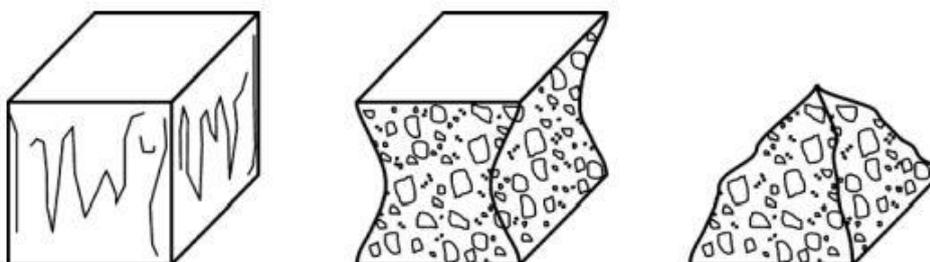


Figura 3.20 - Roturas satisfatórias segundo a norma NP EN 12390-3.



Figura 3.21 - Provete sob ensaio e provete após rotura.

Neste caso, para cada provete, o valor máximo da tensão de compressão σ_c , em MPa, é determinado por:

$$\sigma_c = F_{max} / A_0 \quad (3.5)$$

onde F_{max} representa a força máxima de compressão a que o provete esteve submetido.

4 RESULTADOS

Na sequência da descrição dos ensaios do Capítulo 3, no presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios efetuados. Fizeram-se ensaios de provetes à flexão e à compressão uniaxial. Destes ensaios foi possível determinar o módulo de elasticidade em fase elástica, o módulo de elasticidade semi-estático, a tensão de rotura à tração por flexão, o valor da extensão de rotura por tração e o valor da tensão de rotura à compressão.

Estes valores encontram-se organizados por ensaio e por percentagem de substituição de metacaulino, por cinza ou cerâmica, na mistura base. A mistura de metacaulino será a referência e a mistura de argamassa permitirá estudar as diferenças entre materiais.

4.1 Ensaio de flexão em fase elástica

Um dos parâmetros mecânicos a avaliar nos provetes construídos consiste no módulo de elasticidade em fase elástica E_0 . O ensaio, descrito no Capítulo 3, está intimamente relacionado com a Lei de Hooke, ou seja, considera uma relação linear entre as tensões e as extensões correspondentes num ensaio de flexão. As tensões são determinadas a partir das cargas aplicadas (ver Figura 3.16 e Equação 3.2), enquanto que as extensões são registadas diretamente a partir do extensómetro montado no provete.

Para este fim foram instrumentados 2 provetes de cada conjunto de 6 realizados para cada mistura, tal como descrito no Capítulo 3. Para cada mistura, os provetes escolhidos obedeciam ao critério “de massa mais semelhante próximo da massa média”, dentro dos 6 produzidos. Foram efetuados 4 ciclos de carga/descarga em cada ensaio, para cada provete, de acordo com o expresso no Capítulo 3, utilizando pesos conhecidos.

Não pode deixar de se referir que este trabalho é do tipo exploratório. Só assim se pode considerar apenas dois itens por mistura. Quer a média, quer principalmente a avaliação da dispersão estatística, não terão uma consistência elevada. Para um trabalho mais consistente, o número de itens a considerar deveria ser significativamente superior. Ainda assim, não se pode desprezar o conjunto dos trabalhos realizados, ou seja, existe alguma relevância relativamente aos resultados.

O ciclo de carga/descarga tem por objetivo confirmar a ausência de deformações plásticas no ensaio. Caso existissem, não poderiam ser toleradas, uma vez que se pretende avaliar o módulo de elasticidade em regime elástico. Para além disso, os 4 ciclos de carga/descarga visam atenuar possíveis desvios nas leituras.

Na Figura 4.1 apresentam-se os módulos de elasticidade E_0 de três tipos de provetes. Existem provetes fabricados com um material base construído por metacaulino, os quais são designados por *MET100*. Num outro tipo de provetes onde se substituiu 30% da massa de metacaulino por pó de cerâmica não cozida são designados por *CNC30*. Num terceiro tipo onde esta substituição chegou a 70%, são designados por *CNC70*.

O valor E_0 para o material *CNC30* é cerca de 2% superior ao valor *MET100*, enquanto que o valor do material *CNC70* é cerca de 7% inferior. Isto significa que a substituição de uma pequena parte do metacaulino por pó de cerâmica não cozida não produz alterações ao nível do valor do módulo de elasticidade, enquanto que a substituição de 70% deste metacaulino conduz a uma pequena redução de E_0 .

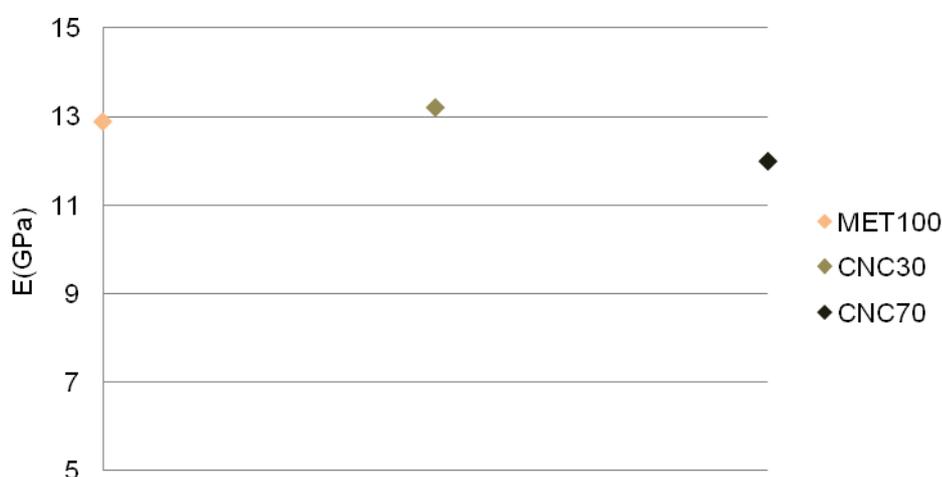


Figura 4.1 – Influência da presença de Cerâmica Não Cozida no valor E_0 .

Na Figura 4.2 consideram-se três tipos de provetes onde o parâmetro que varia corresponde à quantidade de cerâmica cozida que substitui o metacaulino na mistura. Assim, apresentam-se os módulos de elasticidade E_0 para o material base *MET100*, para uma substituição de 30%, *CC30* e para uma substituição de 70%, *CC70*.

Neste caso, o valor E_0 para o material *CC30* é cerca de 10% superior ao valor *MET100*, enquanto que o valor do material *CC70* vale cerca de 1/3 daquele. Isto significa que a substituição de uma parte significativa de metacaulino por pó de cerâmica cozida produz reduções consideráveis ao nível do valor do módulo de elasticidade, enquanto que a substituição de 30% deste metacaulino conduz a um pequeno aumento da rigidez do material.



Figura 4.2 – Influência da presença de Cerâmica Cozida no valor E_0 .

A Figura 4.3 apresenta os valores E_0 para a mistura *MET100* e para as misturas em que houve uma substituição de 30% de metacaulino por cinza fina, *CF30*, e uma substituição de 70%, *CF70*.

Os valores E_0 correspondentes às misturas *CF30* e *CF70* são quase coincidentes, com desvio inferior a 1%. Relativamente à mistura base, estes valores são cerca de 17% inferiores.



Figura 4.3 – Influência da presença de Cinza Fina no valor E_0 .

Em conformidade com as figuras anteriores, a Figura 4.4 e a Figura 4.5 confrontam o valor do módulo de elasticidade E_0 para as misturas que apresentam uma substituição de 30%

e 70% de metacaulino por Cinza Média 1 ou Cinza Média 2, respectivamente. Seguindo a denominação anterior, estas misturas serão designadas por *CM130* e *CM170*, para a substituição com Cinza Média 1, e por *CM230* e *CM270* para a substituição com Cinza Média 2.

Relativamente aos provetes *CM1*, o valor E_0 decresce 14,9% para a mistura *CM130* e decresce 23,4% para a mistura *CM230*, ambos relativamente à mistura base.



Figura 4.4 – Influência da presença de Cinza Média 1 no valor E_0 .

Relativamente aos provetes *CM2*, verifica-se uma situação única, em que uma mistura com uma percentagem de 70% de substituição de metacaulino apresenta um valor superior ao obtido numa mistura em que houve uma substituição de 30%. Os valores E_0 para a receita base e para a mistura *CM270* são muito semelhantes, enquanto que para a mistura *CM230*, o valor é cerca de 17% inferior.

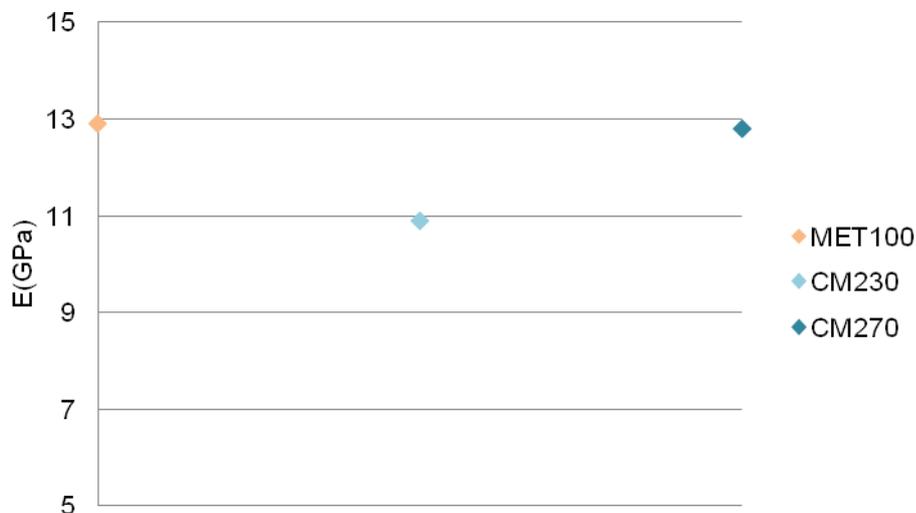
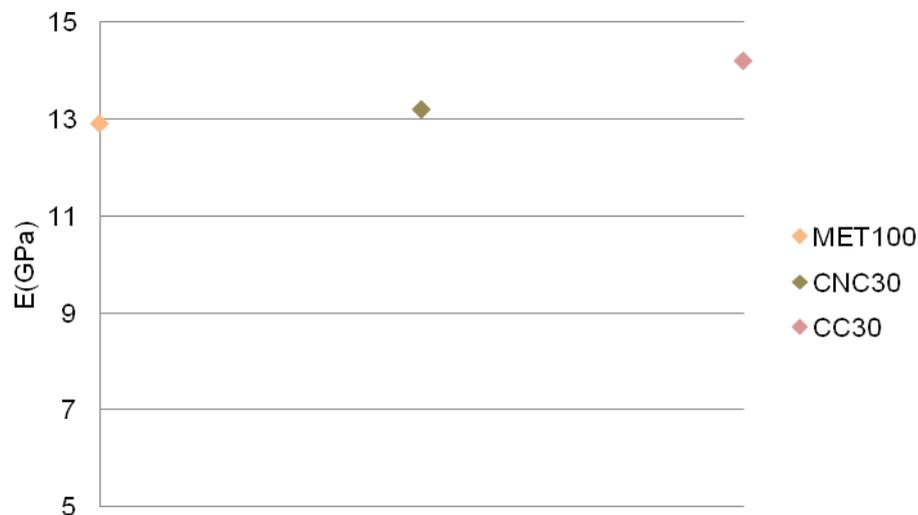
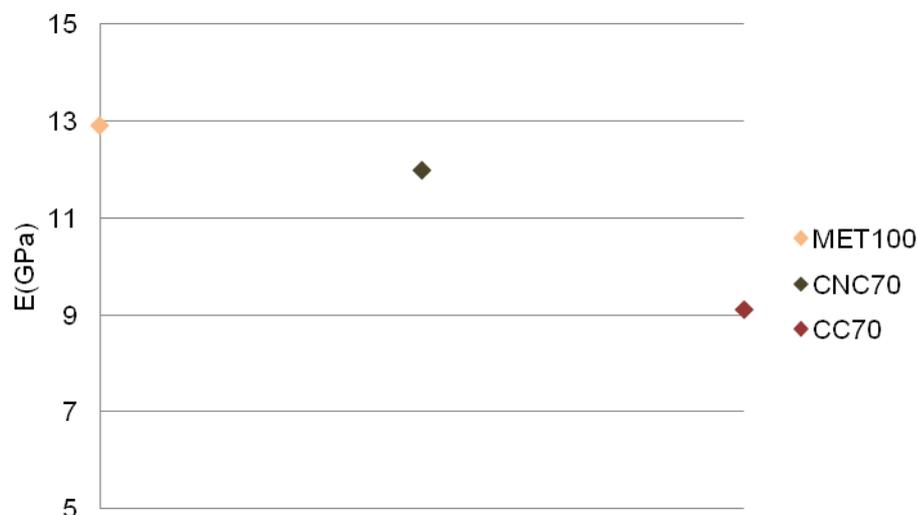


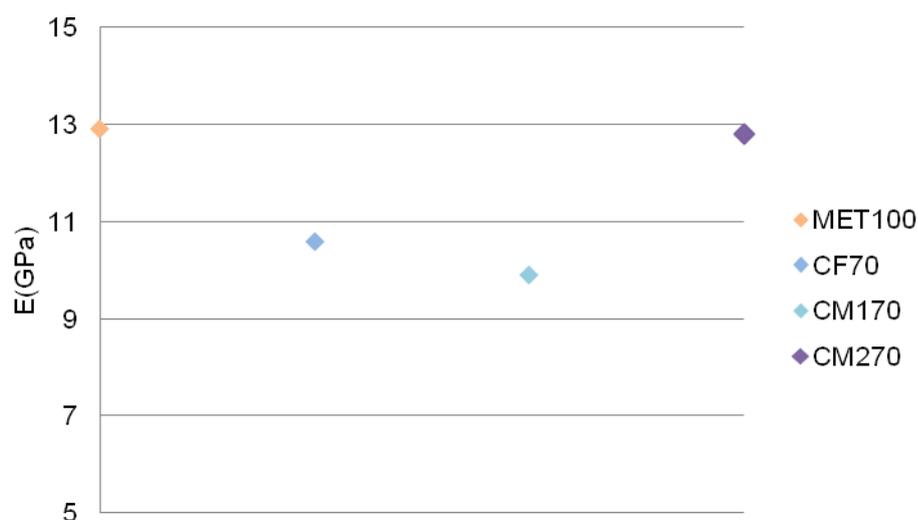
Figura 4.5 – Influência da presença de Cinza Média 2 no valor E_0 .

As figuras seguintes comparam os valores de E_0 para misturas em que foi substituído parte do metacaulino da mistura base por materiais distintos, mas com percentagem de substituição análogas. Assim, na Figura 4.6 relacionam-se as misturas *MET100*, *CNC30* e *CC30*. Da mesma forma, na Figura 4.7 relacionam-se as misturas *MET100*, *CNC70* e *CC70*.

Por análise destas figuras é possível verificar que nas misturas em que existe uma percentagem de 30% de cerâmica existe um aumento relativo do valor de E_0 , em oposição às misturas com uma percentagem de 70%, as quais apresentam uma diminuição no valor deste parâmetro. Ou seja, uma ligeira incorporação de material cerâmico na mistura não altera significativamente a rigidez do material resultante, mas se a substituição for significativa, o material resultante pode ser consideravelmente menos deformável.

Figura 4.6 – Influência da presença de 30% Cerâmica no valor E_0 .Figura 4.7 – Influência da presença de 70% Cerâmica no valor E_0 .

Nas figuras seguintes pretende-se analisar a influência da granulometria da cinza nas misturas com composição semelhante. Assim, na Figura 4.8 verificam-se as semelhanças nos valores das misturas *CF30*, *CM130* e *CM230*, todas inferiores em cerca de 17% relativamente à referência *MET100*. Na Figura 4.9 representam-se as diferenças entre as misturas *MET100*, *CF70*, *CM170* e *CM270*. Neste caso, em virtude do resultado da mistura *CM270*, não é evidente uma conclusão lógica nos resultados apresentados.

Figura 4.8 – Influência da presença de 30% Cinza no valor E_0 .Figura 4.9 – Influência da presença de 70% Cinza no valor E_0 .

O incremento verificado para as misturas *CNC30* e *CC30*, comparado com todas as outras misturas, poderá ser devido à elevada presença de Sílica SiO_2 nos compostos de cerâmica. De recordar que a Cerâmica Não Cozida tem uma percentagem de 76,1% e a Cerâmica Cozida 77,2%. Este facto pode justificar também o valor mais elevado para E_0 da mistura *CC30*. O decréscimo deste parâmetro para as misturas *CNC70* e *CC70* poderá ser devido à elevada percentagem de cerâmica na composição final da mistura. Fica assim a ideia

subjéitiva que o valor máxímo para o parâmetro E_0 , poderá residir numa mistura em que exista uma substituição próxima de 30% de metacaulino por cerâmica.

No estudo dependente da granulometria das cinzas, os valores obtidos para uma substituição de 30% apresentam uma variação insignificante entre eles, o que revela que a alteração em quantidades pequenas de cinza, ainda que com granulometrias diferentes, não altera o parâmetro estudado. Na prática este é um resultado importante, pois permite que as cinzas recolhidas possam ser incorporadas como ligante nas misturas, sem previamente estas terem sido sujeitas a um processo de separação das partículas por peneiração. Por outro lado, nos resultados obtidos para uma substituição de 70%, todos os valores foram inferiores aos obtidos para as misturas com uma substituição de 30%, excepto no caso da mistura *CM270*, onde foi obtido um valor muito semelhante ao da mistura *MET100*.

Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores médios obtidos para os módulos de elasticidade E_0 , em função de cada mistura e de cada material adicionado. O desvio apresentado para o Metacaulino, a mistura base, representa o desvio relativamente à Argamassa. Os restantes desvios correspondem aos desvios relativamente à mistura base. Verifica-se portanto que o módulo de elasticidade da mistura base apresenta um valor de cerca de 1/3 do valor da argamassa.

Tabela 4.1 - Valores do Módulo de Elasticidade das misturas.

Mistura	Designação	E_0 (Gpa)	Desvio
Argamassa		33,8	
Metacaulino	<i>MET100</i>	12,9	62%
30% Cerâmica Não Cozida	<i>CNC30</i>	13,2	2,3%
30% Cerâmica Cozida	<i>CC30</i>	14,2	10%
30% Cinza Fina	<i>CF30</i>	10,7	17%
30% Cinza Média 1	<i>CM130</i>	11,0	15%
30% Cinza Média 2	<i>CM230</i>	10,9	16%
70% Cerâmica Não Cozida	<i>CNC70</i>	12,0	7%
70% Cerâmica Cozida	<i>CC70</i>	9,1	30%
70% Cinza Fina	<i>CF70</i>	10,6	18%
70% Cinza Média 1	<i>CM170</i>	9,9	23%
70% Cinza Média 2	<i>CM270</i>	12,8	1%

4.2 Ensaio de rotura à tração por flexão

O ensaio de rotura à tração por flexão é um ensaio equivalente ao ensaio anterior, sendo que agora o provete é levado até à rotura. Este é também o primeiro ensaio destrutivo a que cada provete é sujeito. Neste ensaio foi possível constituir dois registos: o primeiro a partir do próprio controlador da prensa, onde ficam guardados os dados correspondentes à evolução temporal da carga e do deslocamento aplicados; no segundo registo, no DataLogger, procede-se ao registo da evolução da carga e, caso exista extensómetro, da extensão. Para avaliar a tensão de rotura à tração por flexão σ_r importa apenas o registo da força máxima a que os provetes foram sujeitos imediatamente antes de se atingir a rotura. Esta rotura ocorreu sempre entre os apoios da carga superiores, tal como se demonstra nas Figuras 4.10 e 4.11. As duas metades resultantes foram posteriormente usadas no ensaio de rotura por compressão, tal como expresso no Capítulo 3.



Figura 4.10 - Ensaio de rotura à tração (mistura CC70) após rotura.



Figura 4.11 - Pormenor da superfície de rotura.

Na Figura 4.12 ilustra-se a variação o valor da tensão de rotura à tração por flexão σ_t , entre as misturas *MET100*, *CNC30*, *CNC70*. Comparativamente com a mistura *MET100*, a mistura *CNC70* apresenta uma diminuição de σ_t de cerca de 22%, enquanto que a mistura *CNC30* apresenta um valor de σ_t apenas 9% menor. Assim poderá concluir-se que o aumento de Cerâmica Não Cozida na composição da mistura diminui o parâmetro em estudo.

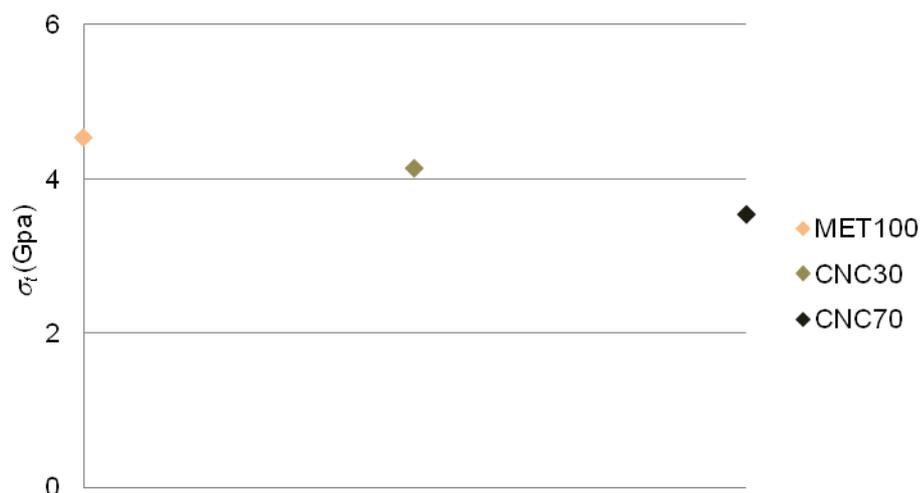


Figura 4.12 – Influência da presença de Cerâmica Não Cozida no valor σ_t .

Na Figura 4.13 são apresentados os resultados obtidos para o valor de σ_t nas misturas *MET100*, *CC30* e *CC70*.

A substituição de 30% de metacaulino na mistura base por Cerâmica Cozida pouco altera o valor de σ_t . A grande alteração é verificada para a mistura *CC70*, que apresenta uma variação aproximada de 24% quando comparado com a mistura base. À semelhança do verificado para a mistura *CNC70* também o aumento de Cerâmica Cozida na composição da mistura diminui o valor de σ_t .



Figura 4.13 – Influência da presença de Cerâmica Cozida no valor σ_t .

A relação entre as misturas *MET100*, *CF30* e *CF70* está apresentada na Figura 4.14. A mistura *CF30* é a única que apresenta um aumento ligeiro do valor σ_t quando comparado com a mistura *MET100*. Em oposição a este aumento, verifica-se uma diminuição de 66% para a mistura *CF70*. Esta redução significativa poderá dever-se à elevada porosidade dos provetes da mistura *CF70*. Aliás, as maiores oscilações dos valores de σ_t , entre todas as misturas, verificam-se entre as misturas *CF30* e *CF70*.

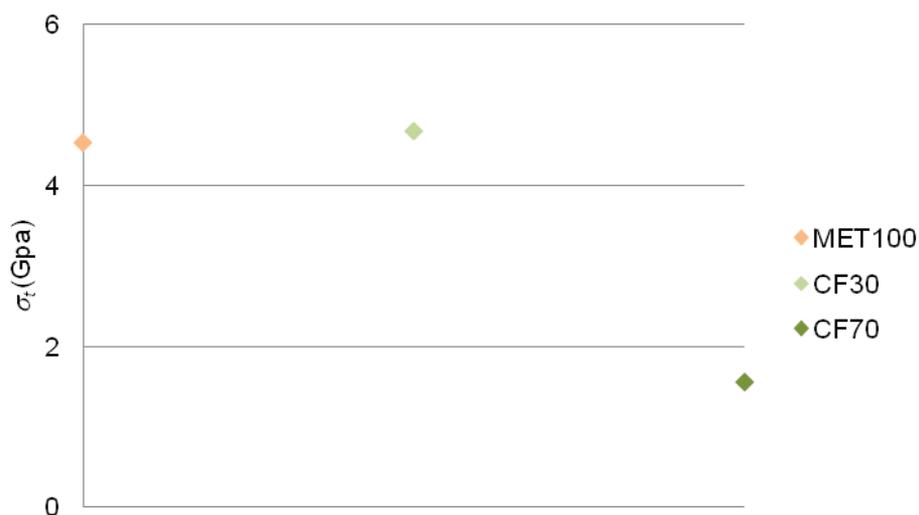


Figura 4.14 – Influência da presença de Cinza Fina no valor σ_t .

As comparações entre as misturas *CM1* e *MET100* são apresentadas na Figura 4.15. A mistura *CM130* apresenta uma diminuição de 31% relativamente à mistura *MET100*, enquanto que a mistura *CM170* apresenta uma diminuição de 40%. Determinou-se assim que a diferença entre as misturas *CM170* e *CM130* é cerca de 1/3 da diferença entre as misturas *CM130* e *MET100*.



Figura 4.15 – Influência da presença de Cinza Média 1 no valor σ_t .

A Figura 4.16 mostra os valores obtidos para as misturas compostas por Cinza Média 2 relativamente à receita de referência. Quanto à relação entre estes resultados poderá admitir-se, que existe uma relação de linearidade entre os valores obtidos para *CM230* e *CM270*, pois para uma mistura *CM230* verifica-se uma diminuição de 23% de σ_t relativamente à mistura *MET100*, e para a mistura *CM270* verifica-se uma diminuição de 48%.



Figura 4.16 – Influência da presença de Cinza Média 2 no valor σ_t .

Para exibir as correlações entre as substituições dos diferentes tipos de Cerâmica nas misturas, apresentam-se a Figura 4.17 e a Figura 4.18. Desta análise pode deduzir-se que quando a substituição de metacaulino tem o mesmo valor em percentagem, os valores para os diferentes tipos de cerâmica apresentam valores semelhantes. A diferença entre os valores para as misturas *CNC30* e *CC30* é de 8% e de 3% para as misturas *CNC70* e *CC70*. No entanto, as misturas *CNC30* e *CC30* têm valores equivalentes à mistura *MET100*, enquanto que as misturas *CNC70* e *CC70* têm valores cerca de 23% inferiores.

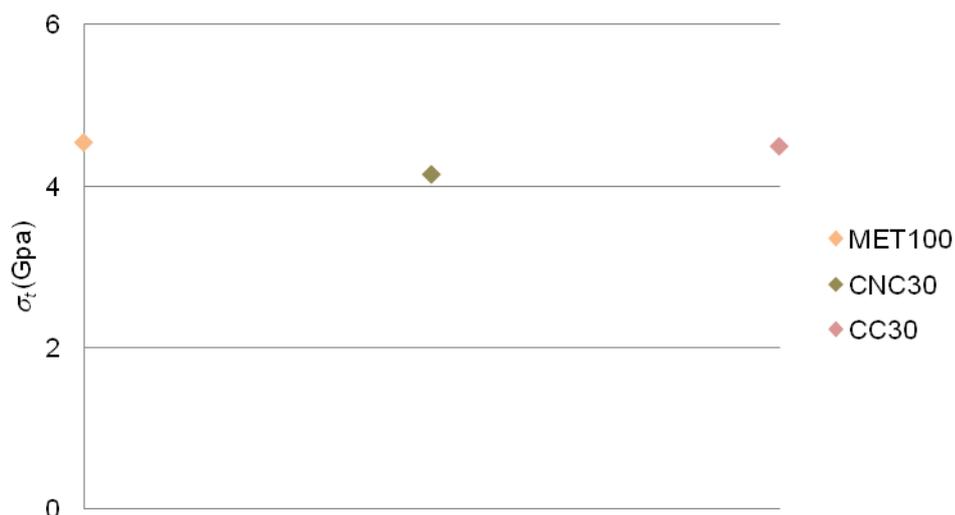


Figura 4.17 – Influência da presença de 30% Cerâmica no valor σ_t .



Figura 4.18 – Influência da presença de 70% Cerâmica no valor σ_t .

A Figura 4.19 ilustra as diferenças entre as misturas *CF30*, *CM130*, *CM230*, e a Figura 4.20 mostra a relação entre as misturas *CF70*, *CM170*, *CM270*. No primeiro caso, o pior desempenho ocorreu para a mistura envolvendo cinza média. No segundo caso, ocorreu para a Cinza Fina. A já referida elevada porosidade deve justificar este resultado.

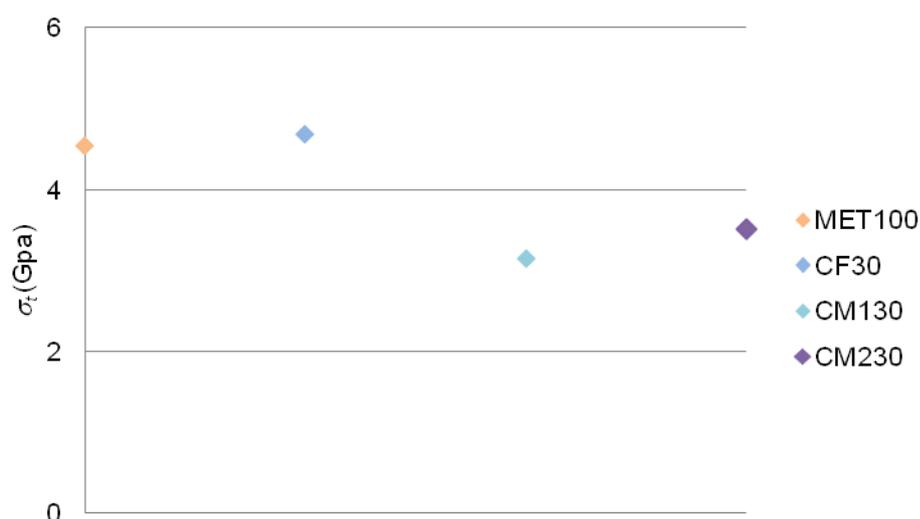


Figura 4.19 – Influência da presença de 30% de Cinza no valor σ_t .

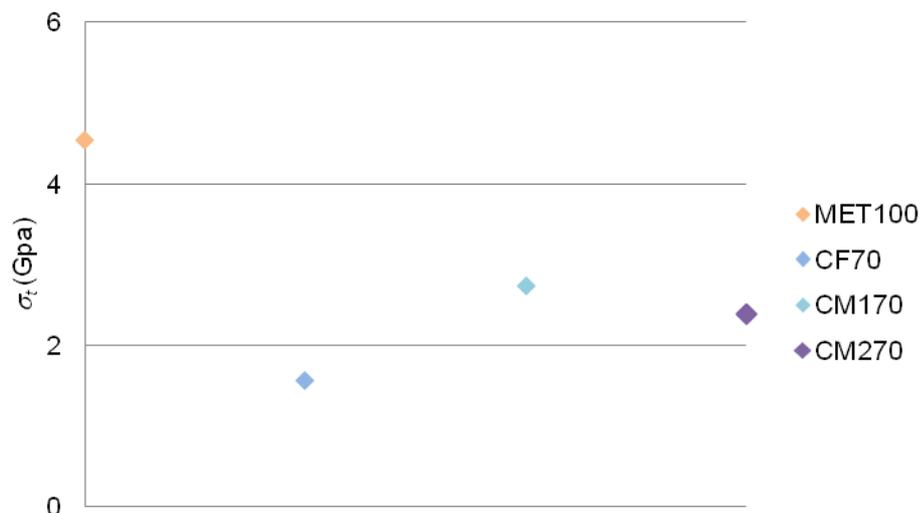


Figura 4.20 – Influência da presença de 70% de Cinza no valor σ_t .

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores da resistência à tração por flexão para cada uma das doze misturas distintas. O valor apresentado é uma média dos resultados obtidos nos 6 ensaios de cada mistura. Relativamente ao valor determinado para a argamassa, o valor *MET100* é aproximadamente 20% superior. No caso das misturas envolvendo uma pequena parte cerâmica o acréscimo ainda é mais significativo. No caso das misturas envolvendo uma pequena parte de cinzas os resultados são equivalentes, apesar das oscilações entre si. No caso das misturas em que a maior parte de Metacaulino foi substituído, a resistência à tração do material foi penalizada, em alguns casos de forma significativa. Apresenta-se também na tabela o valor do desvio padrão para cada mistura, e o valor do desvio de σ_t em relação à mistura *MET100*.

Tabela 4.2 - Tensão de rotura à tração por flexão das misturas.

Mistura	Designação	σ_r (MPa)	Desvio Padrão	Desvio
Argamassa		3,65	0,56	20%
Metacaulino	<i>MET100</i>	4,54	0,34	
30% Cerâmica Não Cozida	<i>CNC30</i>	4,14	0,20	9%
30% Cerâmica Cozida	<i>CC30</i>	4,50	0,21	1%
30% Cinza Fina	<i>CF30</i>	4,68	0,46	3%
30% Cinza Média 1	<i>CM130</i>	3,15	0,13	31%
30% Cinza Média 2	<i>CM230</i>	3,51	0,41	23%
70% Cerâmica Não Cozida	<i>CNC70</i>	3,54	0,23	22%
70% Cerâmica Cozida	<i>CC70</i>	3,44	0,33	24%
70% Cinza Fina	<i>CF70</i>	1,56	0,14	66%
70% Cinza Média 1	<i>CM170</i>	2,73	0,21	40%
70% Cinza Média 2	<i>CM270</i>	2,23	0,30	47%

4.3 Ensaio de rotura à compressão

A seguir ao ensaio de rotura à tração por flexão foi realizado o ensaio de rotura por compressão sobre os provetes resultantes do ensaio anterior. Ou seja, para cada conjunto de 6 provetes, construídos para cada mistura, foram realizados 12 ensaios. Tal como indicado no Capítulo 3, foi registada a força máxima a que os provetes foram submetidos até ser atingida a rotura por compressão. De acordo com a norma *NP EN 12390-3*, todos os provetes ensaiados apresentaram uma rotura considerada como satisfatória, como se ilustra na Figura 4.21 e na Figura 4.22.



Figura 4.21 - Provetes sujeito a ensaio à compressão (*CM1*).



Figura 4.22 – Resíduo de um ensaio à compressão (CC70).

No caso particular da mistura de 70% de cinza fina, em que os provetes realizados aumentaram de volume, existiu a necessidade de ajustar a geometria dos provetes para poderem ser submetidos ao ensaio à compressão. Este ajuste consistiu apenas na remoção da parte em excesso da superfície superior do provete, a que aumentou de volume. Na Figura 4.23 e na Figura 4.24 ilustra-se o procedimento.



Figura 4.23 - Processo de ajuste dos provetes CF70.



Figura 4.24 - Resultado do ajuste antes do ensaio de compressão.

Os valores da tensão de rotura à compressão σ_c , das misturas *MET100*, *CNC30* e *CNC70* são expostos na Figura 4.25. Da mistura *MET100* para *CNC30*, a diminuição de σ_c é de 29%, do mesmo modo que, da mistura *CNC30* para *CNC70* o valor é de 28%, o que permite interpretar estes valores segundo uma relação aproximadamente linear. No entanto, a substituição de parte de metacaulino por pó de cerâmica não cozida prejudica a capacidade de resistência à compressão do material.



Figura 4.25 – Influência da presença de Cerâmica Não Cozida no valor σ_c .

A comparação entre as misturas *CC30*, *CC70* e *MET100* é apresentada na Figura 4.26. Tal como na figura anterior, também a relação entre as misturas referidas aparentam seguir uma relação quase linear. O decréscimo do valor σ_c entre as misturas *MET100* e *CC30* é de 20%, e de 53% para as misturas *MET100* e *CC70*. De modo semelhante à mistura anterior,

também se verifica que a presença de cerâmica cozida prejudica a resistência à compressão do material.



Figura 4.26 – Influência da presença de Cerâmica Cozida no valor σ_c .

A Figura 4.27, a Figura 4.28 e a Figura 4.29 ilustram a relação entre a mistura *MET100* com as misturas *CF*, *CMI* e *CM2* respectivamente. Tal como anteriormente, as misturas *CF70*, *CM170* e *CM270* apresentam valores de σ_c inferiores aos valores de *CF30*, *CM130* e *CM230*. As maiores diminuições verificam-se nas misturas *CF30* e *CF70*; cerca de 66%. Por outro lado, as menores diminuições são verificadas nas misturas *CM230* e *CM270*; cerca de 19%. Para além disso, não é tão evidente a diminuição quase linear de σ_c ao longo de cada mistura.

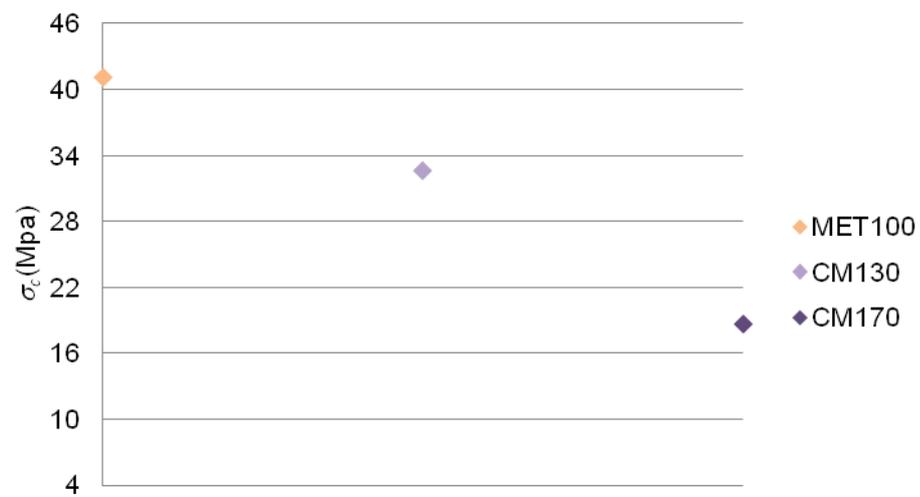
Figura 4.27 – Influência da presença de Cinza Fina no valor σ_c .Figura 4.28 – Influência da presença de Cinza Média 1 no valor σ_c .



Figura 4.29 – Influência da presença de Cinza Média 2 no valor σ_c .

De seguida exprimem-se as relações entre as misturas com iguais quantidades substituídas de metacaulino. Na Figura 4.30 e na Figura 4.31 a substituição por cerâmica. Para uma substituição de 30% de Metacaulino, o maior decréscimo de σ_c ocorre entre as misturas *MET100* e *CC30*; vale cerca de 20%. Entre as misturas *CNC30* e *CC30* o desvio é de 9% a favor da mistura *CC30*. Entre as misturas *CNC70* e *CC70* o desvio é de apenas 4,7%. Importa recordar que quanto maior a substituição, menor o valor de σ_c .



Figura 4.30 – Influência da presença de 30% Cerâmica no valor σ_c .



Figura 4.31 – Influência da presença de 70% Cerâmica no valor σ_c .

Na Figura 4.32 são apresentadas as diferenças entre as misturas *CF30*, *CM130*, *CM230* e *MET100*. Nesta figura é possível verificar que o desvio entre as misturas *CF30* e *CM130* é reduzida, cerca de 4%. Pelo contrário, tal como exposto na Figura 4.33, entre as misturas *CF70* e *CM170* o desvio é de 30%.

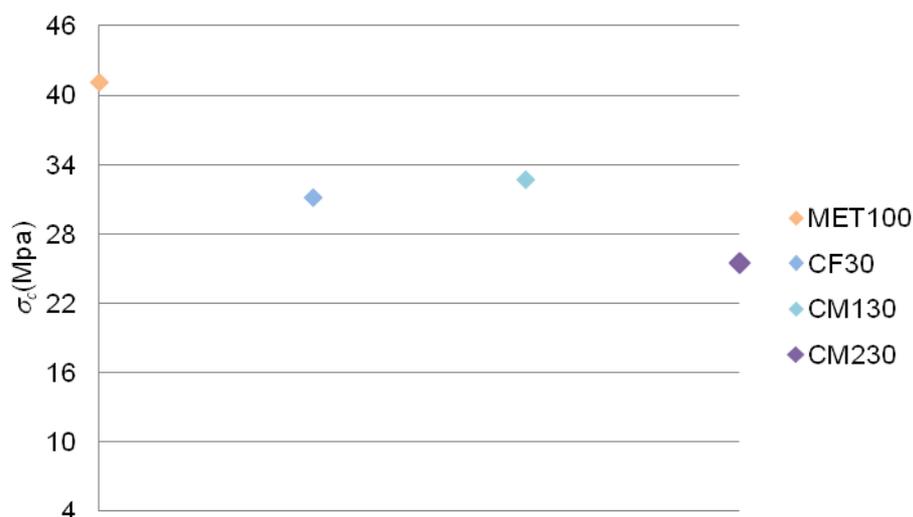


Figura 4.32 – Influência da presença de 30% Cinza no valor σ_c .

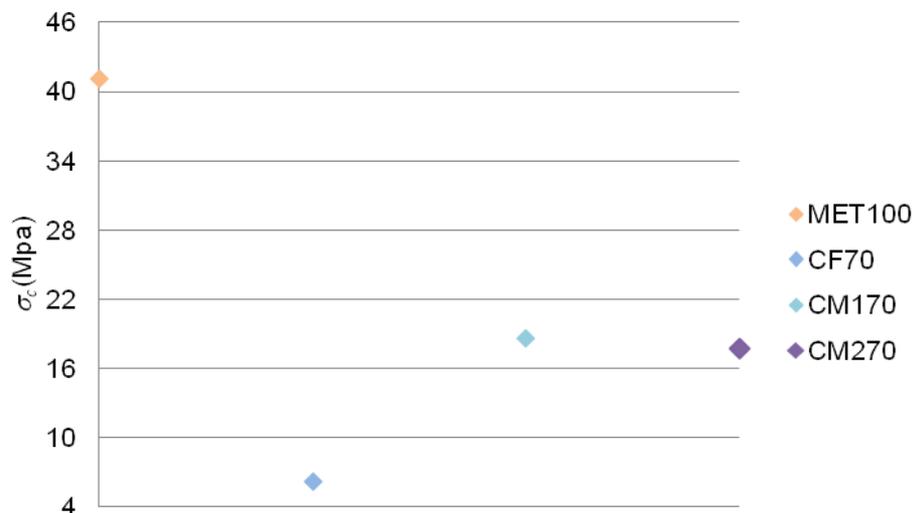


Figura 4.33 – Influência da presença de 70% Cinza no valor σ_c .

Apresentam-se na Tabela 4.3 os valores da resistência à compressão σ_c para as 12 misturas analisadas. Este valor corresponde à média dos resultados obtidos nos 12 ensaios realizados. O valor da mistura *MET100* é 48% superior ao obtido para a mistura de Argamassa. O valor da tensão de rotura à compressão σ_c para as misturas em que houve uma substituição de 30% de Metacaulino é sempre superior ao valor obtido para a Argamassa. relativamente à variabilidade dos resultados apresentados, verifica-se que o desvio padrão vale aproximadamente 10% do valor médio de σ_c , excetuando o caso *CC30*.

Tabela 4.3 - Tensão de rotura à compressão por flexão das misturas.

Mistura	Designação	σ_c (Mpa)	Desvio Padrão	Desvio
Argamassa		21,4	2,7	48%
Metacaulino	<i>MET100</i>	41,2	3,7	
30% Cerâmica Não Cozida	<i>CNC30</i>	29,3	3,4	29%
30% Cerâmica Cozida	<i>CC30</i>	33,1	4,1	20%
30% Cinza Fina	<i>CF30</i>	31,1	2,9	24%
30% Cinza Média 1	<i>CM130</i>	32,7	3,4	21%
30% Cinza Média 2	<i>CM230</i>	25,5	4,0	38%
70% Cerâmica Não Cozida	<i>CNC70</i>	17,7	1,7	57%
70% Cerâmica Cozida	<i>CC70</i>	19,6	1,9	52%
70% Cinza Fina	<i>CF70</i>	6,23	0,8	85%
70% Cinza Média 1	<i>CM170</i>	18,6	1,7	55%
70% Cinza Média 2	<i>CM270</i>	17,7	1,6	57%

4.4 Extensão de tração e módulo de elasticidade semi-estático

São apresentados agora os resultados para a extensão de tração ε_t , parâmetro avaliado no ensaio de rotura à tração por flexão no instante antes da rotura e o módulo de elasticidade semi-estático E_I , determinado pela inclinação de uma linha de tendência ajustada à curva expressa no diagrama $\sigma - \varepsilon$. Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados mencionados.

Para obtenção destes valores foi tido em conta o referido na norma *NP EN 12390-13*. Deve também salientar-se que por razões desconhecidas na análise de valores para a mistura *CF70* um dos extensómetros não apresentava resultados coerentes com a análise, assim este não teve influência no estudo dos resultados apresentados.

Tabela 4.4 - Valores de ε_t e E_I das misturas.

Mistura	Designação	Provete	$\varepsilon_t(\mu)$	E_I (Gpa)
Argamassa		4	131,9	26,1
		5	103,3	29,9
Metacaulino	<i>MET100</i>	1	347,5	12,1
		3	338,1	14,4
30% Cerâmica Não Cozida	<i>CNC30</i>	5	397,0	9,8
		6	436,3	10,0
30% Cerâmica Cozida	<i>CC30</i>	2	378,9	12,6
		4	346,5	12,9
30% Cinza Fina	<i>CF30</i>	2	469,2	10,6
		5	396,3	12,9
30% Cinza Média 1	<i>CM130</i>	1	403,6	8,0
		5	324,1	10,1
30% Cinza Média 2	<i>CM230</i>	1	323,0	11,8
		5	378,6	9,5
70% Cerâmica Não Cozida	<i>CNC70</i>	2	250,8	14,9
		3	245,8	12,3
70% Cerâmica Cozida	<i>CC70</i>	1	423,5	9,6
		6	385,1	9,5
70% Cinza Fina	<i>CF70</i>	6	131,5	10,8
70% Cinza Média 1	<i>CM170</i>	3	213,2	10,6
		6	260,7	10,8
70% Cinza Média 2	<i>CM270</i>	1	164,6	12,5
		3	247,9	9,4

Como exemplo, a Figura 4.34 mostra a relação entre a tensão e a extensão nas misturas de metacaulino e argamassa.

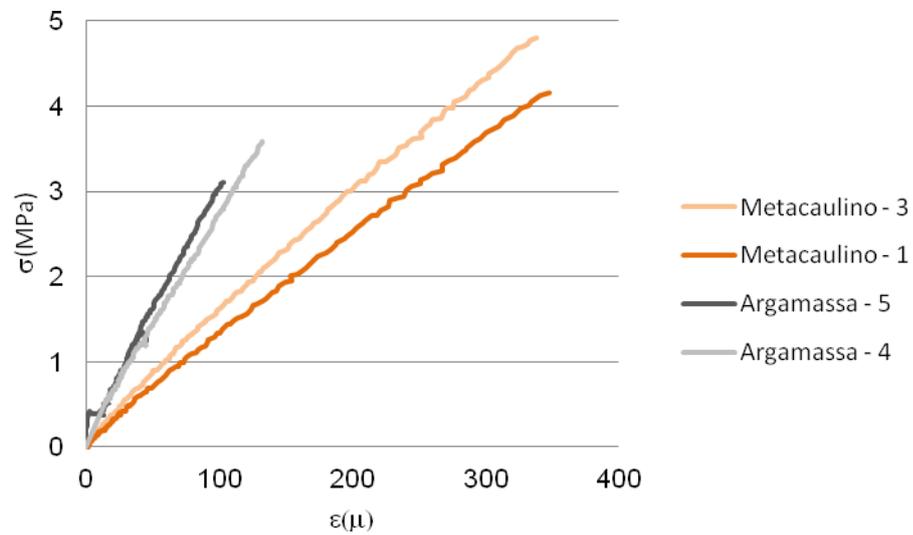


Figura 4.34 - Gráfico Tensão-Extensão do Metacaulino e da Argamassa.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo deste trabalho exploratório foi o de estimar e calcular as características mecânicas de várias misturas de materiais, ativadas alcalinamente, com vista a tirar conclusões sobre a aplicação destas como elemento estrutural. Para caracterizar mecanicamente estas misturas foi necessário conhecer a resistência à tração, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Foi também medido o módulo de elasticidade semi-estático e o valor da extensão de rotura por tração para cada mistura.

Neste trabalho houve a substituição de 30% e 70% de metacaulino, por cinzas ou cerâmica, na receita base, podendo assim serem analisados tipos de ligantes diferentes e serem correlacionados estes valores ao nível dos parâmetros estudados.

De um ponto de vista geral, os resultados obtidos indicam que não existe, dentro das misturas analisadas, uma mistura que apresente os melhores valores para todos os parâmetros estudados. Tendo em conta que um dos principais objetivos era o de obter uma mistura ideal de ligantes, que apresentasse melhores resultados que a argamassa, e que não incluísse cimento Portland na sua composição, ainda assim se obtiveram várias misturas que apresentaram significativas melhorias nos diversos parâmetros analisados.

Quanto ao módulo de elasticidade todos os valores obtidos são de cerca de 1/3 do valor verificado para a argamassa. Entre as misturas ativadas alcalinamente, o valor mais elevado foi o obtido aquando da substituição de 30% de metacaulino por cerâmica cozida. Quando existe uma substituição de 70% de metacaulino na receita base, todas as misturas apresentam valores mais baixos, com exceção daquela em se utiliza 70% de cinza de granulometria média 2. Aqui a influência da granulometria é aparentemente nula, pois os valores verificados são muito próximos, referindo novamente a exceção para esta mistura.

No que diz respeito à tensão de rotura à tração por flexão, quatro misturas apresentaram valores superiores ao obtido para a mistura de argamassa: são elas a mistura base e as que consideraram 30% de substituição de metacaulino por cerâmica. As restantes têm um valor de tensão à rotura inferior ao da argamassa, embora muito próximo. À semelhança do módulo de elasticidade, também para este parâmetro, as misturas em que 70% do metacaulino foi substituído apresentam valores inferiores relativamente aos valores em que apenas houve 30% desta substituição. Observou-se também que, o único parâmetro afetado, havendo uma variação da granulometria das partículas do resíduo cinza, foi a variação da tensão de rotura à tração.

Relativamente à resistência à compressão, verifica-se que todas as misturas em que houve uma substituição de 30% de metacaulino apresentam valores superiores à mistura de argamassa, contudo, menores valores que a mistura base. Há também um decréscimo deste valor para as misturas com 70% de cinzas ou cerâmica, o que revela ser excessiva a percentagem de substituição. Contudo não se pode afirmar ser esta percentagem a ótima. Pode ser superior ou inferior a 30%. Idêntico raciocínio deve ser tido em conta para os restantes parâmetros.

Em geral, pode mencionar-se que o aumento da dimensão das partículas de ligante na mistura diminui os parâmetros analisados, tal como a substituição de 70% de metacaulino na mistura. Contudo, existem exceções e não se conseguiu tirar relações entre as variações nas misturas e as variações nas propriedades estudadas.

5.1 Trabalhos futuros

Este trabalho foi um trabalho inovador e exploratório nesta temática. Com a experiência diária de trabalho muitas foram as questões que surgiram sobre o comportamento dos materiais em estudo. Realizaram-se um sem número de experiências paralelas que visaram obter conhecimentos adicionais sobre o referido material, as quais não foram aqui descritas. São agora sugeridos alguns temas ou algumas particularidades que poderão ser interessantes para o estudo deste material. Apontam-se assim os seguintes temas de trabalho:

-Estudo da mistura apenas com cinzas incorporadas, 100% cinza da cozedura do tijolo, ou cerâmica cozida, ou cerâmica não cozida, ou pó de tijolo, ou qualquer outro resíduo que tenha sido sujeito a elevadas temperaturas. Estudando-se assim se estas misturas apresentam melhores que a argamassa comum.

-Análise de uma mistura ativada alcalinamente, utilizando como ligante cimento Portland, sílica de fumo ou cinzas volantes.

-Estudo da aderência entre as misturas e o aço, com vista a estudar o comprimento de amarração. Sugere-se que na variação das misturas, poderão ser incluídas cinzas, cerâmica ou outros compostos.

-Análise da granulometria dos agregados, e tipo dos agregados incluídos na mistura. Poderá ser estudada também a quantidade relativa presente na mistura, assim como a temperatura a que estes poderão ser utilizados no momento da mistura. Caso se estude a variação da temperatura dos agregados deverá ser tida em atenção a variação da percentagem de água destes e a sua influência nas propriedades da mistura.

-Estudo da mistura em que na composição do ativador é adicionada diversas percentagens de água oxigenada. Este material poderá ter influência na porosidade do material.

-Estudo da mistura em que na composição do ativador é adicionada diversas percentagens de derivados da naftalina, em estado líquido. Poderá também recorrer-se ao uso de compostos orgânicos, como por exemplo a lignina, também em estado líquido. Estes materiais poderão ter influência quer na porosidade do material, quer na trabalhabilidade.

-Incorporação de alumínio em pó nas mistura. Altera-se assim a percentagem de aluminossilicatos na mistura, esperando-se com isso incrementar as propriedades resistentes.

-Estudo da classe de exposição a cloretos e a agentes agressivos do cimento Portland a geopolímeros. Analisar o recobrimento a aplicar a estruturas construídas por materiais ativados alcalinamente.

-Estudo da influência da temperatura e da humidade relativa do ar no processo de obtenção de presa da mistura.

BIBLIOGRAFIA

ASTM C618 - 12: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. (Unified Soil Classification System).

ASTM D2487 -1985: Standard Classification of Soils for Engineering Purposes. (Unified Soil Classification System).

Azevedo, A. (2002). Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes. (Tese de Doutoramento). Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.

Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research* (35); 1224-1232. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.031.

Basheer, P., Gilleece, P., Long, A., Mc Carter, W. (2002). Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. *Journal of Cement & Concrete Composites* (24); 437-449. doi: 10.1016/S0958-9465(01)00075-0.

Camões, A. (2002). Contribuição da adição de cinzas volantes para a durabilidade do betão. Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.

Chindapasirt, P., Chotithanorn, C., Cao, H. T., e Sirivivatnanon, V. (2007). Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Journal of Construction and Building Materials* (21); 356-361. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.010.

Costa, A., Appleton, J. (2002). Estruturas de Betão I – Parte II – Materiais. Instituto Superior Técnico. Lisboa: Portugal.

Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X., Degeimbre, R. (2003). Durability of mortars modified with metakaolin. *Cement and Concrete Research* (33); 1473–1479. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00090-5.

Cristelo, N. (2009). Deep Soft Soil Improvement by Alkaline Activation. (Tese de Doutoramento). School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University. Newcastle. Inglaterra.

Cristelo, N., Glendinning, S., Teixeira Pinto, A. (2011). Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proc ICE Ground Improv* 164(2):73–82.

-
- Davidovits, J., Morris, M. (1988). *The pyramids: an enigma solved*. Hippocrene Books, Nova Iorque.
- Dhinakaran, G., Thilgavathi, S., e Venkataramana, J. (2012). Compressive strength and chloride resistance of metakaolin concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering* (16); 1209–1217. doi:10.1007/s12205-012-1235-z.
- ECOSMART@ http://ecosmartconcrete.com/?page_id=208 EcoSmart Foundation Inc, Canadá.
- Erdem, E. (2014, Maio). *Cement Chemistry, Portland Cement and types of Cement*. Apresentado no Workshop de Palestras organizado pelo Departamento de Engenharia Química da Universidade de Coimbra. Coimbra: Portugal.
- Feng, X., e Clark, B. (2011, Maio). Evaluation of the Physical and Chemical Properties of Fly Ash Products for Use in Portland Cement Concrete. Artigo apresentado em World of Coal Ash (WOCA) Conference.
- Fernandes, N. (2013). *Comportamento do betão com metacaulino português*. (Tese de Mestrado). Universidade de Aveiro. Aveiro: Portugal.
- Fernández-Jiménez, A., Monzó, M., Vicent, M., Barba, A., e Palomo, A. (2008). Alkaline activation of metakaolin–fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements. *Microporous and Mesoporous Materials*, 108(1-3), 41–49. doi:10.1016/j.micromeso.2007.03.024.
- Figueiredo, D. (2011). *O papel do metacaulino na proteção do betão contra a ação dos cloretos*. (Tese de Mestrado). Universidade de Aveiro. Aveiro: Portugal.
- Gonçalves, J. P., Tavares, L. M., Filho, R. D., e Fairbairn, E. (2009). Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. *Construction and Building Materials* (23); 1971-1979. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.027.
- Guerra, F. (2014). *Complementos teóricos sobre materiais ativados alcalinamente*. Disponível em <http://www.dec.uc.pt/~fguerra/complementos.pdf>.
- Gruber, K., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R., e Thomas, M. (2001). Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. *Journal of Cement & Concrete Composites* (23); 479-484. doi: 10.1016/S0958-9465(00)00097-4.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., e Rangan, B. V. (2005). On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal* (101); 467–472.

ISO 7500-1:2004: Verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Verification and calibration of the force-measuring system. ISO (International Organization for Standardization).

ISO 9002:1994: Quality systems - Model for quality assurance in production, installation and servicing. ISO (International Organization for Standardization).

Khater, H. (2011). Utilization of demolished concrete , grog , hydrated lime and cement kiln dust in building materials. *Journal of Mechanical Engineering Research* (3); 279–285.

Li, Z. e Ding, J. (2003a). Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete. *ACI Materials Journal* (99); 393–398. doi:10.14359/12222.

Li, Z. e Ding, J. (2003b). Property Improvement of Portland Cement by Incorporating with Metakaolin and Slag. *Cement and Concrete Research* (33); 579–584. doi: 10.1016/S0008-8846(02)01025-6.

Madeleine Rubenstein@ (2012). <http://blogs.ei.columbia.edu/2012/05/09/emissions-from-the-cement-industry/> . The Earth Institute Columbia University, Estados Unidos da América.

Mateus, R. (2009). Avaliação da Sustentabilidade da Construção. (Tese de Doutoramento) Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.

McLellan, B., Williams, R., Lay, J., Van Riessen, A., Corder, G. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymers in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production* (19); 1080-1090. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.02.010.

Mehta, P. K. (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete Internacional*; 61–66.

Mendonça, M. (2007). Ativação alcalina e inertização de resíduos industriais. (Tese de Mestrado). Universidade de Aveiro. Aveiro: Portugal.

Momtazi, A., Ranjbar, M., Balalaei, F., Nemati, R. (2007). The effect of Iran's metakaolin in enhancing the concrete compressive strength. Artigo apresentado em Int. Conf. Sustainable construction materials and technologies; 116-122.

Monolithic@ <http://static.monolithic.com/pdfs/metamax/pozzalan.pdf>. Monolithic, Estados Unidos da América.

Montemor, M. F., Simões, A. M. P., e Ferreira, M. G. S. (2003). Chloride-induced corrosion of reinforcing steel: From the fundamentals to the monitoring techniques. *Journal of Cement & concrete Composites* (25); 491-502. doi: 10.1016/S0958-9465(02)00089-6.

NP EN 196-1:2006: Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. IPQ.

NP EN 196-5:2011: Métodos de ensaio de cimentos. Parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos. IPQ.

NP EN 196-6:2010: Métodos de ensaio de cimentos. Parte 6: Determinação da finura. IPQ.

NP EN 196-7:2008: Métodos de ensaio de cimentos. Parte 7: Métodos de colheita e de preparação de amostras de cimento. IPQ.

NP EN 206-1:2007: Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. IPQ.

NP EN 450-1:2012: Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade. IPQ.

NP EN 12390-1:2012: Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes. IPQ.

NP EN 12390-2:2009: Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes provetes para ensaios de resistência mecânica. IPQ.

NP EN 12390-3:2011: Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes. IPQ.

NP EN 12390-5:2009: Ensaio do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes. IPQ.

NP EN 12390-6:2011: Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes. IPQ.

NP EN 12390-13:2014: Ensaio do betão endurecido. Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão. IPQ.

Pereira, J., Pinto, M., Lopes, A., (2013). Estudo do solo enquanto material de construção sustentável. (Tese de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra. Coimbra: Portugal.

-
- Provis, J. L. (2013). Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?. *Materials and Structures* (47); 11–25. doi:10.1617/s11527-013-0211-5.
- Seshasayi, L., e Sudhakar, M. (2004). Relationship of water-cementitious materials ratio and compressive strength of silica fume concrete. *The Indian Concrete Journal* (5);11-14.
- Shehata, M. H., e Thomas, M. D. (2000). The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali–silica reaction. *Cement and Concrete Research* (30); 1063–1072. doi:10.1016/S0008-8846(00)00283-0.
- Siddique, R. (2003). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. *Cement and Concrete Research* (34); 487–493. doi: 10.1016/j.cemconres.2003.09.002.
- Škvára, F. (2007). Alkali Activated Materials or Geopolymers?. Department of glass and ceramics, Faculty of Chemical Technology, ICT Prague 51(3); 173–177.
- Teixeira Pinto, A. (2002). Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina – Geopolimerização, *Construção Magazine* (3); 16-22.
- Teixeira Pinto, A. (2003) Geobetão, o Betão da Construção Sustentada. *Construção Magazine* (7).
- Teixeira Pinto, A. (2004). Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino. (Tese de Doutoramento). Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.
- Teixeira Pinto, A. (2006). Introdução ao estudo dos geopolímeros. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real: Portugal.
- Torgal, F., Jalali, S. (2010) Considerações sobre os produtos de hidratação em argamassas históricas. Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.
- Torgal, F., Jalali, S. (2010). Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete. *Materials and Structures* (44); 155–167. doi: 10.1617/s11527-010-9616-6.
- United States Environmental Protection Agency@ (2006) <http://www.epa.gov/waste/consERVE/tools/cpg/pdf/app-a.pdf> . United States Environmental Protection Agency, Estados Unidos da América.
- Williams, R., Janine, L., van Riessen, A., McLellan, B., e Corder, G. (2011). Costs and carbon emissions for Geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland Cement. *Journal of Cleaner Production* (19): 1080-1090. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.02.010.

Yang, C. C., Chor, S. W., Huang, R. (2002). The relationship between charge passed and the chloride-ion concentration in concrete using steady-state chloride migration test. *Journal of Cement and Concrete Research* (32); 217-222. doi: 10.1016/S0008-8846(01)0066.

ANEXO

A Tabela A.1 mostra a largura de cada provete b , a respetiva altura h , a sua massa m , o seu volume V e a densidade d destes.

Tabela A.1 – Características geométricas dos provetes construídos.

Designação	Provete	b (mm)	h (mm)	m (g)	V (cm ³)	d (g/cm ³)
<i>Argamassa</i>	1	40,5	40,1	562	260	2,16
	2	40	40	549	256	2,14
	3	40	40,1	541	256	2,13
	4	39,7	40,1	548	254	2,15
	5	39,9	40	547	255	2,14
	6	38,6	40,1	514	247	2,08
<i>MET100</i>	1	40,1	40	517	256	2,02
	2	40,5	40	518	259	1,99
	3	40,5	40	519	259	2,00
	4	40,8	40,2	525	262	2,00
<i>CNC30</i>	1	41,3	40,1	522	265	1,97
	2	40,7	40,1	516	261	1,97
	3	41,1	40	521	263	1,98
	4	40,8	40,1	517	262	1,98
	5	40,4	40	518	259	2,00
	6	41,4	40,1	520	265	1,96
<i>CC30</i>	1	40,2	39,5	532	254	2,09
	2	40,1	39,6	529	255	2,08
	3	40,6	39,6	530	257	2,06
	4	40,2	39,5	525	254	2,06
	5	39,6	39,8	520	252	2,07
	6	39,8	39,5	516	252	2,05
<i>CF30</i>	1	40,2	40,3	509	259	1,96
	2	40	41,3	520	265	1,96
	3	40	40,9	516	262	1,97
	4	40,3	42	529	270	1,96
	5	40,1	41,3	528	265	1,99
	6	40,2	40,9	507	263	1,93

Designação	Provete	<i>b</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>m</i> (g)	<i>V</i> (cm ³)	<i>d</i> (g/cm ³)
<i>CM130</i>	1	40,5	39,9	493	259	1,90
	2	40,5	40,1	498	260	1,92
	3	40,7	39,9	493	260	1,90
	4	40,9	40	480	262	1,83
	5	40,2	40	477	258	1,85
	6	40,7	40,6	466	264	1,77
<i>CNC70</i>	1	40,5	39,6	532	258	2,07
	2	39,8	39,6	530	252	2,10
	3	39,8	40,2	530	256	2,07
	4	40,8	39,8	530	260	2,04
	5	40,4	39,9	530	258	2,06
	6	39,6	39,6	530	251	2,11
<i>CC70</i>	1	40,4	39,6	538	256	2,10
	2	39,7	39,6	525	252	2,09
	3	39,8	39,5	521	251	2,07
	4	40,2	39,9	537	257	2,09
	5	40,1	39,8	538	256	2,11
	6	40,2	39,7	534	255	2,09
<i>CF70</i>	1	51,1	40	496	327	1,51
	2	50,9	40	490	326	1,50
	3	50,6	39,2	496	317	1,56
	4	51,3	40,0	503	328	1,53
	5	52,3	40,0	512	336	1,53
	6	50,5	39,8	496	322	1,54
<i>CM170</i>	1	40,7	40,2	506	261	1,94
	2	41	40	504	262	1,92
	3	39,7	39,3	502	249	2,01
	4	40,6	39,9	494	259	1,90
	5	40,0	39,9	493	255	1,93
	6	39,5	39,3	494	248	1,99
<i>CM270</i>	1	39,3	39,2	502	246	2,04
	2	39,9	40,1	499	256	1,95
	3	39,4	39,7	505	251	2,01
	4	39,9	40	501	255	1,97
	5	40,4	39,9	510	258	1,98
	6	40,6	40,1	509	261	1,96