Cátia Patrícia Abreu de Freitas

RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS GEOPOLÍMEROS: INFLUÊNCIA DO LIGANTE, DO ATIVADOR E DOS AGREGADOS

MECHANICAL RESISTANCE OF GEOPOLYMERS: INFLUENCE OF BINDER, ACTIVATOR AND AGGREGATES

Coimbra, 10 de Março de 2017

· U C ·

Universidade de Coimbra

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

Cátia Patrícia Abreu de Freitas

RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS GEOPOLÍMEROS: INFLUÊNCIA DO LIGANTE, DO ATIVADOR E DOS AGREGADOS

MECHANICAL RESISTANCE OF GEOPOLYMERS: INFLUENCE OF BINDER, ACTIVATOR AND AGGREGATES

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas
orientada pelo Professor Doutor Adelino Vasconcelos Lopes e pela Professora Doutora Maria Isabel Moita Pinto.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 10 de Março de 2017

AGRADECIMENTOS

Na realização da presente dissertação, contei com o apoio direto ou indireto de múltiplas pessoas às quais estou profundamente grata. Correndo o risco de injustamente não mencionar algum dos contributos quero deixar expresso os meus agradecimentos.

Ao orientador desta dissertação o Professor Adelino Lopes, pela orientação prestada, pelo seu incentivo, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou. Aqui exprimo a minha gratidão.

Ao Professor Sérgio Lopes e à Professora Isabel Pinto, pela disponibilidade prestada e pelo apoio na elaboração deste trabalho.

A todos os amigos e colegas que de uma forma direta ou indiretamente, contribuíram, ou auxiliaram na elaboração do presente estudo, pela paciência, atenção e força que prestaram em momentos menos fáceis. Em especial quero agradecer ao meu querido amigo Paulo Silva, pelo seu companheirismo ao longo desta fase do meu percurso académico. Gostaria de agradecer aos meus restantes amigos nomeadamente ao André, à Anabela, à Joana, à Laura e à Tatiana pelo apoio, a ajuda prestada e pela amizade, os quais são todos muito importantes.

Não poderia deixar de agradecer à minha família por todo o apoio incondicional, força, incentivo e carinho que sempre me prestaram durante a elaboração da presente tese, sem os quais teria sido impossível. Destacar desde já a minha irmã, Suzana, que foi de extrema importância, que sempre me ajudou e acompanhou ao longo deste percurso e por ser um dos pilares da minha vida.

A Deus por me ter dado saúde e força para superar as dificuldades e ultrapassar os meus obstáculos.

RESUMO

O presente trabalho enquadra-se no desenvolvimento de uma nova família de materiais geopoliméricos. Estes materiais são obtidos por ativação alcalina de um ligante, e apresentam não só boas características resistentes, como também uma elevada durabilidade e reduzidas emissões de CO_2, contribuindo consequentemente para uma construção mais sustentável.

O objetivo principal da presente dissertação consiste na caracterização experimental da resistência mecânica dos geopolímeros, quer em ensaios de resistência à tração por flexão, quer por compressão. Importa caracterizar esta resistência em função da quantidade de ligante utilizado na mistura, da influência da curva granulométrica dos agregados adicionados a uma mistura base, sendo estes brita tipo calcário e brita tipo granito e finalmente, da composição do ativador composto. O ligante utilizado tem como base o metacaulino, uma argila caulinítica de elevada finura e reatividade, que por sua vez é passível de ser alcalinamente ativado por um composto de hidróxido e de silicato. Posteriormente, são confrontadas estas características com as que resultam de uma mistura base, juntamente com resultados de outros trabalhos realizados anteriormente.

Os provetes relativos às misturas com maior quantidade de ligante alcançaram melhores resultados a nível de resistência à compressão. Duplicando a quantidade de ligante na mistura, a resistência à compressão sobe cerca de 15%. As misturas de brita tipo granito apresentam os valores mais elevados em todas as resistências mecânicas estudadas ao longo do presente trabalho, demonstrando um grande potencial nas misturas geopoliméricas. O traço de ativador composto com maior eficácia foi o que utilizou o dobro do silicato de sódio relativamente ao hidróxido, obtendo as melhores capacidades resistentes tanto à tração por flexão como à compressão.

Palavras-chave

Geopolímeros, Ativação alcalina, Metacaulino, Resistência mecânica.

ABSTRACT

The present work encompassed the development of a new family of geopolymeric materials. These materials are obtained by alkaline activation of a binder, and present not only good strength characteristics, but also high durability and low CO_2 emissions, therefore contributing to a more sustainable construction.

The main purpose of the present dissertation consists on an experimental characterization of the mechanical resistance of the geopolymers, accomplishing tests in both tensile strength by bending and compression. It is important to characterize this resistance in function of the amount of composed binder in the mixture, the influence of the grading curve of the aggregates added to a base mix, in which these are limestone and granite type gravel and finally, the composition of the compound activator. The binder used is based on metakaolin, a kaolinite clay of high fineness and high reactivity, which is capable of being alkaline activated by a compound of hydroxide and silicate mixture. Subsequently, these characteristics are compared with those resulting from a basis mixture, as also compared with results of previous work.

The test specimens for mixtures with greatest amounts of binder, achieved best results in terms of compressive strength. By doubling the amount of binder in the mixture, the compressive strength rise almost 15%. The mixtures of granite type gravel present the highest values in all the mechanical properties studied throughout the present work, proving to be a great potential in the geopolymers mixtures. The most effective compound activator trait was the one with twice the amount of sodium silicate in comparison to the sodium hydroxide, achieving the best resistant capabilities both in bending and compression strength.

Keywords

Geopolymers, Alkaline activation, Metakaolin, Mechanic resistance.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Enquadramento do tema 1
1.2 Objetivos 2
1.3 Organização da dissertação 2
2 BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
2.1 Considerações gerais 4
2.2 Enquadramento 4
2.2.1 Breve história do cimento Portland na construção 4
2.2.2 Ligantes alternativos 6
2.2.3 Geopolímeros/Ativação alcalina do metacaulino 7
2.3 Resistência do betão de cimento Portland Normal 10
2.3.1 Influência dos agregados na resistência do betão 11
2.3.2 Influência da idade do betão e das condições ambientais 12
2.4 O metacaulino como ligante substituto do cimento 13
2.4.1 Ativação alcalina do metacaulino 14
2.4.2 Cimento Portland versus ligantes geopoliméricos 14
2.5 Trabalhos anteriores 16
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 19
3.1 Considerações gerais 19
3.2 Descrição dos Materiais 19
3.2.1 Metacaulino 19
3.2.2 Areia 20
3.2.3 Brita Calcária 21
3.2.4 Brita Granítica 22
3.2.5 Ativador 23
3.2.5.1 Hidróxido de sódio 23
3.2.5.2 Silicato de Sódio 24
3.2.6 Água 24
3.3 Composição das misturas 24
3.4 Misturas 25

3.4.1 Variação do Ligante 26
3.4.2 Variação das Britas 27
3.5 Provetes 30
3.6 Ensaios Experimentais 33
3.6.1 Ensaios de Resistência à tração por flexão 33
3.6.2 Ensaios de Resistência à compressão 35
4 RESULTADOS 37
4.1 Considerações gerais 37
4.2 Composição das misturas 37
4.3 Parâmetro Agregado/Ligante 40
4.3.1 Resultados dos ensaios de tração por flexão 42
4.3.2 Resultados dos ensaios de compressão 44
4.4 Brita tipo calcário 46
4.4.1 Resultados dos ensaios de tração por flexão 48
4.4.2 Resultados dos ensaios de compressão 50
4.5 Brita tipo granito 52
4.5.1 Resultados dos ensaios de tração por flexão 54
4.5.2 Resultados dos ensaios de compressão 56
4.6 Variação da composição do ativador 57
4.6.1 Resultados dos ensaios de tração por flexão 58
4.6.2 Resultados dos ensaios de compressão 59
5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS 60
5.1 Considerações gerais 60
5.2 Resistência à tração por flexão 60
5.3 Resistência à compressão 62
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 65
6.1 Conclusões 65
6.2 Trabalhos futuros 66
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 68

SIMBOLOGIA

CO_2 – Dióxido de Carbono;
SiO_2 – Dióxido de silício (Sílica);
Al_2O_3 – Óxido de alumínio (Alumina);
NaOH – Hidróxido de sódio;
SiO_2Na_2O – Silicato de sódio;
Fe_2O_3 – Óxido de ferro;
TiO_2 – Dióxido de titânio;
CaO – Óxido de cálcio;
MgO – Óxido de magnésio;
γ – Massa volúmica;
δ – Baridade final;
V_{prev} – Volume total previsto;
V_{eff} – Volume efetivo;
M_i – Massa do agregado;
M_l – Massa do ligante;
f_t – Tensão resistente à tração por flexão;
f_{tm} – Valores médios das tensões de rotura à tração por flexão;
f_c – Tensão resistente à compressão;
f_{cm} - Valores médios das tensões de rotura à compressão;
σ – Desvio padrão;
CV – Coeficiente de variação.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

O desejo e a necessidade de ultrapassar obstáculos e realizar desafios é uma das características do ser humano. Nos dias que correm, o impossível é apenas uma questão de tempo e as exigências são cada vez mais elevadas, tanto a nível arquitetónico como a nível mecânico. Estes obstáculos podem ser ultrapassados pelos materiais utilizados e a desenvolver. O betão armado surgiu no seguimento destas necessidades e apresenta combinações adequadas de rigidez, resistência à tração e à compressão, como também demonstra uma durabilidade suficiente.

Quer sob o ponto de vista ambiental, quer sob o ponto de vista da durabilidade, o betão por ser o segundo material mais consumido pelo homem, o primeiro nos países em vias de desenvolvimento, pode e deve ser aperfeiçoado. Com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade da construção, urge reduzir a produção e o consequente consumo de cimento Portland. Contudo, esta diminuição não deve comprometer o desempenho das estruturas de betão. Assim, a substituição de elevados volumes de cimento por adições, nomeadamente subprodutos industriais será extremamente benéfica sob o ponto de vista ecológico e ambiental (Camões, 2011).

Nos últimos anos foram realizados progressos tecnológicos no desenvolvimento de novos materiais, tais como os geopolímeros. Novos materiais formados através da geopolimerização estão a proporcionar novas aplicações e procedimentos, transformando conhecimentos já adquiridos na química inorgânica. Técnicas baseadas em elevadas temperaturas na produção de materiais com propriedades cerâmicas deixam de ser necessário. Estes materiais podem policondensar como os polímeros orgânicos, a temperaturas inferiores a 100ºC (Davidovits, 1991).

Os geopolímeros emergem assim como produtos de fácil execução, utilizando matérias-primas correntes e mesmo resíduos sólidos inorgânicos industriais, dando lugar a produtos com comportamento assinalável não só do ponto de vista mecânico como também do bom nível de resistência que apresentam à maior parte dos meios agressivos (Pinto, 2004).

Neste sentido, tem-se vindo a optar pelo metacaulino. Trata-se de uma argila caulinítica de elevada finura e reatividade, submetida a calcinação, um processo que permite desidroxilação quase total da matéria-prima, transformando-a numa fase amorfa e irreversível, com propriedades pozolânicas, dando origem ao metacaulino. A preferência do metacaulino deriva ainda do facto do mesmo proporcionar uma melhoria de qualidade de betões e argamassas (Bastos, 2011).

1.2 Objetivos

Ao longo desta dissertação pretender-se-á avaliar as propriedades mecânicas de misturas geopoliméricas, nomeadamente a sua resistência à tração por flexão e à compressão por meio da realização de ensaios experimentais em provetes de dimensões 40mmx40mmx160mm, com base nas normas dedicadas ao betão. As misturas serão maioritariamente compostas por uma areia que desempenhará a função de agregado, o metacaulino castanho como ligante, e um ativador composto como fase líquida promovendo a ativação alcalina.

Em função de uma mistura base, anteriormente usada no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, cuja relação de areia/ligante é $M_i/M_l=2,5$, pretender-se-á avaliar a influência da quantidade de ligante nas propriedades resistentes dos geopolímeros. Assim, serão elaboradas mais 4 misturas de variação da relação areia/ligante de 1,5, 2,0, 3,0 e 3,5. Procurar-se-á estudar também a influência do tipo de brita e da granulometria na composição destes materiais, construindo mais 3 misturas de cada tipo de brita, nomeadamente brita tipo calcário e brita tipo granito. Cada mistura será composta com um diâmetro máximo diferente, nomeadamente 2,0mm, 4,75mm e 6,30mm, definindo a percentagem parcelares das quantidades de brita recorrendo à curva granulométrica de Faury. Por último, pretende-se ainda confirmar a influência da variação da composição do ativador, realizando mais 2 misturas cujo traço de hidróxido/silicato seja de 1:1.

Após a apresentação dos valores obtidos nos ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão, os resultados serão globalmente comparados entre si. Os resultados serão também comparados com trabalhos anteriormente realizados na área dos geopolímeros, por forma a poder retirar algumas conclusões importantes.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está subdividida em 6 capítulos. O presente capítulo esclarece o âmbito e os objetivos do trabalho fazendo referência ao conteúdo dos restantes capítulos.

O segundo capítulo enquadra uma breve revisão bibliográfica, referindo estudos realizados anteriormente no mesmo âmbito, explicando conceitos básicos e fazendo uma breve introdução histórica acerca do metacaulino e a sua produção. Faz-se também uma pequena comparação entre o metacaulino e o cimento Portland, referindo as principais vantagens e desvantagens de cada um.

No terceiro capítulo dar-se-á início à descrição dos trabalhos experimentais, fazendo uma pequena descrição dos materiais utilizados, explicando como se chegou à composição de todas as misturas realizadas e indicando os agregados e respetivas granulometrias para a obtenção das suas propriedades mecânicas.

No quarto capítulo são expostos os resultados obtidos nos ensaios, efetuando uma análise crítica aos resultados como forma de encontrar um suporte firme para a formulação das conclusões.

No quinto capítulo fez-se uma comparação dos resultados obtidos com trabalhos realizados anteriormente no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, confirmando algumas conclusões referentes à influência das propriedades dos geopolímeros.

O sexto capítulo aponta as principais conclusões e aspetos que podem ser alvo de desenvolvimentos futuros para a utilização prática dos materiais estudados.

2 BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações gerais

No presente capítulo pretende-se enquadrar a ativação alcalina do metacaulino, a qual dá origem aos geopolímeros, alvo de estudo no presente trabalho. Faz-se referência ao desenvolvimento dos materiais utilizados na construção civil, nomeadamente das suas propriedades mecânicas e impactes ambientais. Utilizou-se o cimento Portland como ponto de referência, destacando os impactes ambientais causados pela utilização de ambos os materiais. Tendo em conta os objetivos desta dissertação, procurou-se também abordar outros trabalhos onde foi avaliada a resistência dos geopolímeros por alteração da quantidade de metacaulino na mistura, ou por adição de britas, ou ainda por alteração da composição do ativador.

2.2 Enquadramento

2.2.1 Breve história do cimento Portland na construção

Ao longo do século XX verificou-se um acentuado crescimento da construção civil. Este volume anual de construção, que não mostra tendências de abrandar, levanta diversos problemas relacionados com os impactes ambientais, nomeadamente ao nível do consumo energético. Tendo não só em conta este aspeto, mas também devido a razões económicas e sociais, o elevado número de construções existentes exige um planeamento construtivo que tenha a durabilidade como fator imperativo, contribuindo assim para a preservação do ambiente.

Mateus (2004) utiliza o triângulo indicado na Figura 2.1 para analisar os três parâmetros, nomeadamente os condicionantes económicos, a qualidade ambiental e a equidade social, legado cultural. No início dominaram os aspetos económicos; parâmetros tais como o conforto e as questões sociais generalizaram-se na segunda metade do século passado; e a consciência dos impactes ambientais surgiu por fim. Importa agora verificar de forma integral estas condicionantes garantindo-se assim a sustentabilidade do processo de construção.

Figura 2.1- Construção sustentável (Mateus, 2004).

Por exemplo, sabe-se que a utilização de materiais com propriedades cimentícias toma um papel de elevada importância na construção, contribuindo tanto para o desenvolvimento da humanidade como para a criação de novas tecnologias. Promovendo a sustentabilidade, com durabilidade e propriedades mecânicas equivalentes, incluindo a resistência às agressões do meio envolvente (Teixeira, 2014).

De facto, nos países em vias de desenvolvimento, o betão é o material mais utilizado pelo homem, sendo apenas superado pela água. A produção anual mundial de betão é de cerca de 25.000 milhões de toneladas, nas quais cerca de 12% é cimento Portland, rondando os 3.000 milhões de toneladas de produção anual mundial. A produção do cimento causa vários impactes ambientais, um dos quais devido ao seu elevado consumo de energia no processo de fabrico e emissão de gases com efeito de estufa tais como CO_2. Por cada tonelada de cimento Portland é libertada cerca de 1 tonelada de CO_2 na atmosfera (Camões, 2011). Consequentemente, existe a necessidade de estudar materiais que contribuam para a redução dos impactes a nível ambiental (Teixeira, 2014).

Entretanto, o processo de produção do cimento Portland, surgido no século XIX, foi evoluindo ao longo dos anos, sendo marcado pela queima da mistura de calcário e argila a uma temperatura de cozedura de cerca de 1450ºC até atingir a sua fusão incipiente, resultando numa mistura denominada por clínquer. O desenvolvimento deste processo, extremamente antieconómico, apenas ganhou verdadeiro impulso a partir da segunda metade do século XIX, com o avanço no projeto dos fornos e dos estudos sobre a melhor proporção da mistura para obter um clínquer de dureza mais elevada (Pedroso, 2009). Tanto as propriedades do material, como a sua produção, continuaram a evoluir até aos dias de hoje devido à crescente exigência requerida pela sociedade e pela engenharia civil, construindo edifícios e obras de arte de elevado prestígio, a uma velocidade cada vez mais elevada. Paralelamente, a necessidade de preservar e proteger o planeta dos danos deste material foi ganhando relevância.

Além dos óbvios impactes ambientais provocados pelo clínquer, propriedades como a sua relativa porosidade são fatores negativos que originam a necessidade de procurar novas soluções. Uma elevada porosidade origina a degradação das armaduras devido ao fenómeno de carbonatação, provocando uma diminuição do pH. Este decréscimo provoca corrosão das armaduras, acelerando o fenómeno de fissuração até afetar a segurança da estrutura. Em resposta a este problema, pensou-se na adição de materiais muito mais finos e reativos que exerçam simultaneamente ações químicas de combinação, como físicas de ocupação dos vazios (Bastos, 2011).

2.2.2 Ligantes alternativos

Na sequência de estudos recentes, concluiu-se que com a utilização de materiais naturais que provocam a ativação alcalina de alumino-silicatos, uma grande parte das limitações do cimento Portland pode ser ultrapassada. Para além disso, estes materiais já foram usados anteriormente pelo Homem e deixaram marcas e realizações notáveis até aos dias de hoje. Algumas das obras da Antiguidade clássica mais marcantes, como o Coliseu de Roma, o Panteão Romano, as Termas de Caracala ou a muralha da china, constituídos em grande parte por estes materiais, apresentam ainda hoje um bom comportamento a nível mecânico, em termos de durabilidade e de resistência às ações de meteorização (Pinto, 2006).

O primeiro investigador a analisar os ligantes utilizados nas construções históricas tais como as pirâmides egípcias, foi Glukhovsky em 1959, concluindo que foram utilizados ligantes de base alcalina. Estes compostos são constituídos por alumino-silicatos cálcicos hidratados e fases cristalinas do tipo analcite, uma rocha natural existente na crosta terrestre, justificando a durabilidade do tipo de ligante. No âmbito dos estudos realizados, desenvolveu-se um novo tipo de ligante, designado de "*solo-cimento*", obtido de alumino-silicatos minerais moídos, misturados com resíduos industriais ricos em alcalis (Torgal e Jalali, 2009). A quantidade de álcalis contida nos "*solo-cimentos*" determina as suas propriedades ligantes, sendo a formação destes ligantes bastante vasta podendo ser concretizada a partir de compostos solúveis de metais alcalinos em conjunção com sistemas de alumino-silicatos sem a presença de cálcio. Este é o caso dos metacaulinos, tratando-se de sistemas de materiais alcalinos, ricos em sílica SiO_2 e alumina AI_2O_3 (Pinto, 2004).

Vários investigadores observaram a presença de zeólitos do tipo analcite na composição de diversos ligantes antigos, determinando de certa forma a razão da sua resistência ao desgaste. No entanto, a constituição dos ligantes antigos variava consoante o local, face à disponibilidade de matérias-primas, variando também com a importância das obras (Pinto, 2006).

2.2.3 Geopolímeros/Ativação alcalina do metacaulino

No âmbito das pesquisas relacionadas com os ligantes obtidos por ativação alcalina, o investigador Joseph Davidovits desenvolveu ligantes obtidos por ativação alcalina de caulino e metacaulino, designando os ligantes pelo termo "*geopolymers*", tratando-se de uma adaptação moderna de processos utilizados pelo homem na antiguidade. Estes ligantes caraterizam-se pela sua capacidade de transformação, policondensação, moldagem e endurecimento rápido a baixas temperaturas. São também um material inorgânico, rígido, estável até temperaturas de 1200ºC e não inflamável, tendo em conta que os incidentes catastróficos de incêndio que ocorreram entre 1970 e 1973 resultaram numa especial atenção a um material que resistisse a altas temperaturas (Davidovits, 1991).

Segundo Centeio (2011), os geopolímeros têm um grande potencial para constituir uma base de desenvolvimento sustentável de materiais e produtos com propriedades físico-químicas, mecânicas e térmicas mais satisfatórias que o cimento Portland. Os materiais geopoliméricos apresentam bons desempenhos na construção, de que são exemplo: A sua boa adesão a outros materiais como ao aço, ao vidro, à cerâmica, ao betão fresco e a substratos antigos; Uma elevada resistência à compressão e à abrasão; Baixa retração e condutibilidade térmica; Cura rápida e controlada; Elevada resistência a ácidos; Contem um elevado pH favorável na proteção das armaduras; Uma reduzida emissão de gases poluentes; Boa resistência ao fogo.

O processo de geopolimerização envolve uma reação química produzida por uma solução aquosa de elevada alcalinidade designada por ativador, ocorrendo uma reação exotérmica ao entrar em contacto com materiais de origem geopolimérica compostas por certos minerais como a sílica e a alumina, criando assim polímeros com ligações do tipo polissialato. A qualidade do geopolímero depende essencialmente da natureza do material de origem (Centeio, 2011).

Segundo Glukhovsky, o mecanismo de ativação alcalina subdivide-se em três etapas. Na primeira etapa ocorre uma quebra das ligações da matéria-prima original, provocado pelo aumento do pH da solução devido à adição de metais alcalinos. Numa segunda fase, há uma agregação das componentes destruídas, que ao reorganizarem-se formam uma estrutura mais densa ocorrendo assim os processos de policondensação. Finalmente, a terceira etapa conduz à condensação da estrutura, causando o endurecimento da estrutura geopolimérica. No entanto, estas etapas sucedem quase de uma forma simultânea (Torgal e Jalali, 2009).

O ativador pode ser simples ou composto. O simples é constituído por um hidróxido de metal alcalino, por exemplo o sódio ou o potássio. O composto é constituído por um hidróxido e um silicato, ambos de metais alcalinos, em que cada componente origina reações distintas.

Relativamente à matéria-prima a utilizar, esta deve conter porções razoáveis de silício e alumínio na sua microestrutura para serem ativadas. O material utilizado ao longo deste trabalho, designado por metacaulino, é um dos materiais reativos, pois o caulino passa por um processo de calcinação em fornos a temperaturas da ordem dos 900ºC, substancialmente abaixo das temperaturas de clinquerização (Santa, 2016). Este tratamento térmico causa a perda de água e reordenando o ião alumínio com o oxigénio. Na sequência destas alterações, o material perde grande parte da sua estrutura cristalina, dando origem ao metacaulino, que tendo um estado amorfo, concede-lhe uma facilidade de combinação química (Pinto, 2006). A produção a temperaturas inferiores às utilizadas no fabrico do cimento, permite diminuir as emissões atmosféricas resultantes da operação industrial. Para além disso, a transformação do caulino em metacaulino processa-se num prazo relativamente curto, sendo vantajoso relativamente ao consumo de energia (Bastos, 2001).

Inicialmente, os primeiros desenvolvimentos do processo de ativação alcalina tiveram fins associados à indústria cerâmica, com o objetivo de diminuir o consumo de energia no processo de cozedura dos caulinos, e apenas mais tarde é que foram propostos como alternativa para fins estruturais. Em geral, a ativação alcalina é uma reação de hidratação de alumino-silicatos com substâncias do tipo alcalino ou alcalino-terroso (Pinto, 2006).

O caulino é constituído principalmente por um mineral de argila designado por caulinite que é estruturalmente caraterizado pela justaposição de duas lâminas, tetraédrica de silício e octaédrica de alumínio/magnésio. Durante o processo de calcinação, a lâmina octaédrica passa a tetraédrica e pentaédrica. A reação básica é apresentada na Equação 2.1. A transformação do caulino em metacaulino torna este material muito mais reativo, conferindo-lhe propriedades pozolânicas. Por sua vez, as propriedades físicas e químicas do metacaulino variam consoante a composição química e mineralógica do caulino (Pinto, 2006). As Figuras 2.2 e 2.3 apresentam a simulação das mudanças estruturais do caulino antes e após o tratamento térmico.

$$Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O \xrightarrow[\text{Processo de calcinação}]{} Al_2O_3.2SiO_2 + 2H_2O \qquad (2.1)$$

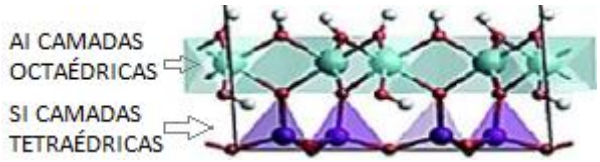


Figura 2.2- Organização estrutural do caulino (Santa, 2016).

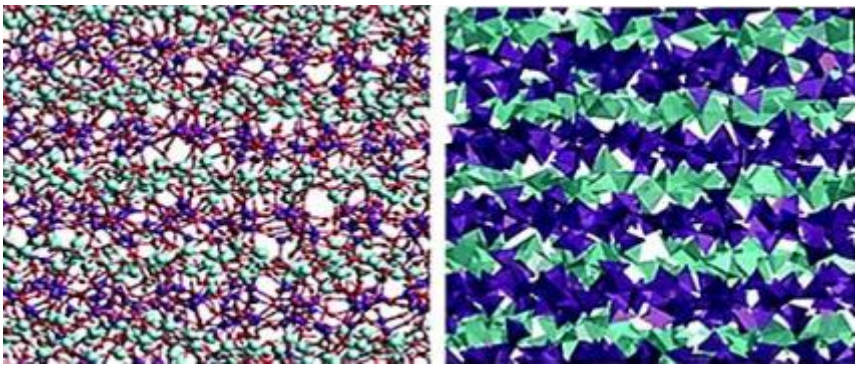


Figura 2.3- Caulino (esquerda). Após o processo de desidratação, metacaulino (direita) (Santa, 2016).

O metacaulino é considerado uma pozolana artificial, pois é obtido por calcinação de um material natural, sujeito a condições específicas, o qual pode ser usado como substituto do cimento (Melo, 2012). Segundo Davidovits (1999), é necessário que o processo de desidratação do caulino seja executado a temperaturas acima dos 600ºC, pois até os 500ºC a reação é reversível, obtendo-se de novo a hidratação do caulino após adição de água.

Pinto, citado por Torgal e Jalali (2009), refere a utilização de razões ativador/ligante entre os valores de 1,0 e 0,75, na ativação de argamassas à base de metacaulino, verificando a difícil trabalhabilidade abaixo da relação de 0,85. No entanto, outros autores conseguiram utilizar razões de 0,25 e 0,30.

Os ativadores de utilização mais comum e com melhor desempenho na ativação alcalina, são constituídos por uma combinação de hidróxido de sódio (*NaOH*) com silicato de sódio (SiO_2Na_2O), e quanto menor for a relação do composto melhores serão os resultados ao nível de resistência. A adição do ativador composto ao metacaulino desencadeará uma reação fortemente exotérmica, formando um produto de caraterísticas cimentícias (Pinto, 2004).

Autores, citados por Torgal e Jalali (2009), observaram na ativação do metacaulino que a ordem ideal de mistura dos componentes verifica-se quando os agregados são misturados com o metacaulino à parte, e posteriormente misturados com o ativador. Verificando ainda que nos sistemas metacaulino e cinzas o processo de cura a uma determinada temperatura aumenta a resistência. Contudo, se o tempo de cura for muito longo, enfraquece a estrutura do material resultando em retração excessiva. Vários autores observaram também que a cura em ambiente saturado reduz a resistência e que os provetes com uma razão ativador/metacaulino de 0,75 perdem 6% de água por evaporação, necessitando de uma película de plástico com o intuito de impedir a evaporação da água.

2.3 Resistência do betão de cimento Portland Normal

O betão é um material formado pela mistura de cimento, agregados grossos e finos e água, com ou sem a incorporação de adjuvantes e adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação do cimento. O cimento é um material inorgânico e finamente moído que, convenientemente amassado com água, forma uma pasta aglomerando uma porção elevada de materiais agregados, como areias, godos, britas entre outras, fazendo presa e endurecendo devido às reações de hidratação. Depois de endurecido, o betão mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água (Branco, 2013).

A função principal do cimento no betão consiste em aglomerar os diferentes agregados de modo a garantir a aderência da mistura bem como a sua resistência. À medida que aumenta a quantidade de ligante de um betão, a sua tensão de rotura tende para um valor constante, que depende da resistência das rochas que constitui os agregados. Visto que, normalmente, a tensão de rotura das rochas utilizadas como agregados é superior a 58,8MPa ou 68,6MPa, variando com a sua origem, a resistência do betão só depende da resistência da pasta do cimento. Com o intuito de melhorar as características resistentes do betão, bem como o endurecimento rápido e outros aspetos, é sugerido a adição de pozolanas ou escórias de alto-forno à sua mistura (Coutinho, 1973).

O comportamento do betão, para além da composição granulométrica dos agregados, depende essencialmente do tipo e dosagem do ligante, da dosagem de água e dos adjuvantes. A dosagem de ligante influencia essencialmente a trabalhabilidade, com influência importante na resistência e durabilidade do betão. É certo que a colocação, compactação, cura e proteção desempenham um papel fundamental para que um betão com determinada composição possa vir a desenvolver todas as suas propriedades (Costa e Appleton, 2002).

A propriedade mais importante para avaliar as caraterísticas resistentes de um dado betão corresponde à sua resistência à compressão. Gunning (1983) avaliou esta resistência através de provetes com 28 dias de cura, cujo parâmetro de influência consiste na adição de cimento para uma determinada resistência, criando uma margem entre a resistência média e resistência caraterística. As misturas foram realizadas com apenas um tipo de cimento, e um agregado com caraterísticas homogéneas, ou seja, de granulometria e trabalhabilidade iguais. Os resultados obtidos para as misturas com uma quantidade de 200 kg de cimento por m^3 de betão foram de aproximadamente 20MPa; 60MPa para uma quantidade de 450 kg de cimento por m^3 de betão. Concluindo que existe uma relação entre o teor de cimento e a resistência à compressão. Verificou-se que por cada aumento de 50 kg de cimento por m^3 de betão, as tensões de rotura à compressão aumentam, em média, cerca de 40%.

Relativamente às tensões de rotura à tração por flexão, verifica-se simultaneamente um aumento com o acréscimo de cimento. Para uma quantidade de 200 kg de cimento por m^3 de betão a tensão de rotura à tração é cerca de 4MPa, aumentando até valores superiores de 6MPa para quantidades de 400 kg de cimento por m^3 de betão. O aumento da resistência à tração por flexão em relação ao teor de cimento é em média cerca de 12,5% por cada aumento de 50 kg de cimento por m^3 de betão. (Coutinho e Gonçalves, 1994).

Um outro parâmetro de importância na composição do betão consiste na quantidade de água, a qual influencia diretamente a tensão de rotura. Se houver insuficiência de água numa mistura, é obtido um betão muito seco com o qual será impossível conseguir uma compacidade satisfatória, visto que o atrito entre as partículas é tão grande que impede a sua compactação perfeita. Coutinho e Gonçalves (1994) realizaram ensaios experimentais com o intuito de avaliar a influência da quantidade de água numa mistura. Utilizaram quantidades de água de amassadura de 130 a 270 l/m^3, quantidades de cimento iguais em todas as misturas, apenas variando os parâmetros de trabalhabilidade e de compactação com a adição de areia. Ao realizarem os ensaios passados os 28 dias de cura, concluíram que as tensões de rotura variavam entre 63 e 20MPa, respetivamente. Verificou-se então que, para uma quantidade de 300 kg de cimento por m^3 de betão, a quantidade de água necessária situava-se num intervalo de 150 e 210 l/m^3, variando as resistências entre 52 e 29MPa, respetivamente, correspondendo a cerca de 4MPa de alteração de resistência por cada 10 l de água por metro cúbico de betão.

A relação de água/cimento *A/C* é o parâmetro que mais influencia as propriedades resistentes do betão, visto que quanto maior for a relação, mais porosa e permeável será a pasta, proporcionando menor resistência ao betão e tornando-o mais suscetível à ação dos agentes agressivos. Costa e Appleton (2002) avaliaram a influência da razão *A/C*, concluindo que para *A/C=0,40* a tensão de rotura à compressão é cerca de 42MPa, e que ao duplicar a razão, a tensão de rotura diminui até cerca de metade, aproximadamente 20MPa. Verificaram que a permeabilidade aumenta acentuadamente com a razão *A/C* a partir de valores da ordem de 0,5.

2.3.1 Influência dos agregados na resistência do betão

Os agregados são constituídos por elementos naturais, artificiais ou reciclados, britados ou não, com partículas de tamanho e forma adequadas para o fabrico de betão. Anteriormente, estes agregados eram designados por inertes por se supor não participarem nas reações de endurecimento do betão. No entanto, após conhecimento das reações álcalis-sílica que conduziam à deterioração do betão, a designação foi alterada para agregados (Costa e Appleton, 2002).

Os agregados têm influência em todas as propriedades do betão, especialmente na sua resistência através da composição granulométrica, na sua própria tensão de rotura e na resistência da ligação entre a pasta de cimento e a sua superfície (APEB, 2007). Devido à variabilidade das propriedades dos seus elementos, tais como a sua rugosidade, porosidade, forma e absorção, a forma como se ligam ao cimento não é constante. Não é conhecida, com rigor, a ligação entre os agregados e o cimento, mas certamente constitui um fator importante em todas as propriedades, como a tensão de rotura, especialmente de tração, permeabilidade, a resistência de congelação, a retração e a fluência. As causas mecânicas da aderência resultam da forma, rugosidade, porosidade e absorção da superfície do agregado e da existência de partículas soltas e estranhas nessa superfície. As propriedades de cada agregado contribuem para a aderência, sendo que os agregados com superfície rugosa, como as partículas britadas, constituem uma ligação melhor do que a do agregado rolado. Ao analisar roturas por compressão de misturas envolvendo partículas britadas, verifica-se que a rotura se dá pela fracturação dos agregados, ao passo que no caso das partículas roladas existe essencialmente separação destas partículas relativamente à massa. Para além disso, os agregados britados contribuem mais para a resistência à tração, enquanto os de superfície arredondada e lisa conferem uma maior trabalhabilidade. Porém, as partículas mais macias, porosas e mineralogicamente heterogéneas, são as que proporcionam melhor ligação devido à sua absorção capilar (Coutinho, 1973).

Por outro lado, a granulometria condiciona a compacidade do betão e por consequência, as suas propriedades físicas. Quanto maior for a compacidade das composições granulométricas, provavelmente menor será o volume de vazios entre as partículas e maior será a possibilidade de reduzir o volume da mistura. As granulometrias mais compactas são conseguidas com uma grande porção de agregados grossos, e neste sentido, a amassadura requer menores quantidades de ligante, sendo que, por outro lado, a dimensão máxima do agregado está limitada pela dimensão das peças a betonar. Uma granulometria mais compacta permite obter betões de elevada resistência, com baixa porosidade, baixa retração e elevada durabilidade. Pelo contrário, uma granulometria menos compacta terá como consequência um betão com baixa trabalhabilidade e que se desagrega facilmente. Neste sentido é necessário adequar a mistura de um teor ótimo em agregados finos (Costa e Appleton, 2002).

2.3.2 Influência da idade do betão e das condições ambientais

A temperatura e a humidade, do meio ambiente a que está exposto um betão durante a sua cura, constituem dois dos principais parâmetros que mais condicionam o desenvolvimento da resistência do betão ao longo do tempo. De modo a avaliar estes parâmetros, Coutinho e Gonçalves (1994) construíram provetes de betão compostos com 200 kg e 300 kg de cimento por m^3 de betão, com areia rolada e brita calcária, sujeitos a ensaios de compressão e de

flexão. Verificaram que a tensão de rotura em ambos os casos tende a aumentar ao longo do tempo, avaliada desde os 7 dias até aos 5 anos, tanto em ambiente húmido a 20ºC, como ao ar livre.

Segundo Gunning (1983), geralmente o betão atinge cerca de 80% da sua resistência total passado um mês de cura, continuando a aumentar até aos 5 anos de idade ou até mais quando submetido a condições húmidas. O sol e o vento têm um efeito contrário durante o período de cura do betão, e assim sendo, o betão deverá ser protegido destes fatores. Verificou-se também um aumento da resistência do betão com o aumento de temperatura de cura. O melhor intervalo de temperatura para a cura inicial do betão encontra-se entre 4ºC e 23ºC, e após o processo inicial de cura, quanto mais elevada for a temperatura mais rápido é o desenvolvimento da resistência.

2.4 O metacaulino como ligante substituto do cimento

Tal como descrito anteriormente, o metacaulino é um dos materiais com características cimentícias. Recentemente, tem sido estudado e desenvolvido como substituto de parte do cimento da mistura para obter betões de alta resistência. Este material tem a capacidade de melhorar o desempenho do betão em relação à trabalhabilidade da pasta, requerendo menos 25 a 35% de água do que um betão composto por cimento. É um material que ganha presa muito rapidamente, sofrendo pouca retração, e que regista um aumento na sua resistência de rotura à medida que aumenta a porção de metacaulino na mistura. Considerado como um material benéfico para o aperfeiçoamento da qualidade do betão, o seu uso no futuro é passível de ser patenteado (Li e Ding, 2003).

Courard *et al.* (2003) realizaram ensaios no âmbito de adição de percentagens de metacaulino numa mistura de cimento, testando parâmetros de influência tal como a sua durabilidade em função dos ataques de sulfatos e propagação de cloretos. Verificaram que a mistura ótima correspondia às percentagens de 10 e 15% de adição de metacaulino, e que apesar da trabalhabilidade da pasta não ser tão boa, desempenha uma melhor resistência mecânica impedindo a propagação de cloretos e ataques de sulfatos. É de realçar que para a percentagem de 20% de metacaulino, também não se verifica qualquer propagação de cloretos passado um ano. Concluíram que com o aumento da concentração de metacaulino, existe um aumento de durabilidade das estruturas devido à sua resistência contra os ataques de agentes corrosivos.

2.4.1 Ativação alcalina do metacaulino

Importa recordar que a ativação alcalina é um processo químico que ocorre quando um material composto por alumino-silicatos de partículas amorfas, como é o caso do metacaulino, é misturado com um ativador alcalino, produzindo uma mistura de presa rápida e de elevada resistência. As propriedades e caraterísticas dos materiais finais dependem muito da natureza do material inicial e do meio ambiente em que a cura é realizada. Os materiais resultantes do processo de ativação alcalina são geralmente denominados por geopolímeros, que constituem uma nova família de produtos que são capazes de reunir propriedades semelhantes às do cimento (Fernández-J. *et al.*, 2008).

Neste caso o único ligante da mistura é o metacaulino, e as propriedades resistentes são desenvolvidas no referido processo químico da ativação alcalina. Tal como no caso dos betões é possível adicionar agregados à mistura de modo a reduzir o custo final. Contudo, o conhecimento em torno dos betões de cimento supera em muito o que se sabe acerca dos geopolímeros. Parâmetros tais como os aditivos, a retração e a fluência, as quantidades de ligante da mistura, as condições de cura, até a própria resistência das misturas geopoliméricas, etc., são fatores desconhecidos no contexto dos geopolímeros. E o que se conhece ainda é alvo de muitas dúvidas, normalmente associadas a detalhes não explicados nos trabalhos apresentados.

2.4.2 Cimento Portland versus ligantes geopoliméricos

Os ligantes geopoliméricos caraterizam-se por apresentarem uma durabilidade superior em termos da resistência aos ácidos, da resistência a altas temperaturas, da resistência ao gelo-degelo e também em termos da possibilidade de ocorrência de reações do tipo álcalis-agregado. Os geopolímeros apresentam melhores desempenhos a nível ambiental, reduzindo cerca de 1/6 das emissões de CO_2 relativamente ao cimento Portland, permitindo reaproveitar quantidades significativas de subprodutos industriais e de resíduos de minas e pedreiras, possuindo ainda um elevado potencial para imobilizar resíduos tóxicos e radioativos (Torgal e Jalali, 2010).

No que toca às diferenças entre as misturas do cimento Portland e as geopoliméricas, a água na mistura do cimento Portland é totalmente consumida para a obtenção de presa, enquanto na mistura de geopolímeros, a água é considerada como sendo a transportadora dos agentes alcalinos, resultando na existência de água após a presa do material (Skvára, 2007).

O elevado custo dos ligantes geopoliméricos constitui a principal desvantagem em relação ao cimento Portland, mas devido ao elevado nível de poluição causada pelo cimento, o qual

poderá futuramente vir a ser englobado no custo global poderá inverter esta desvantagem (Torgal *et al.*, 2005).

Outras vantagens dos ligantes geopoliméricos em relação ao cimento Portland é a sua resistência mecânica relativamente elevada e obtida em poucas horas, baixa condutibilidade térmica, capacidade de imobilização de metais pesados, resistência a altas temperaturas como demonstrado na Figura 2.4, resistência ao ataque químico, e finalmente imunidade à reação álcali-sílica como ilustra a Figura 2.5.

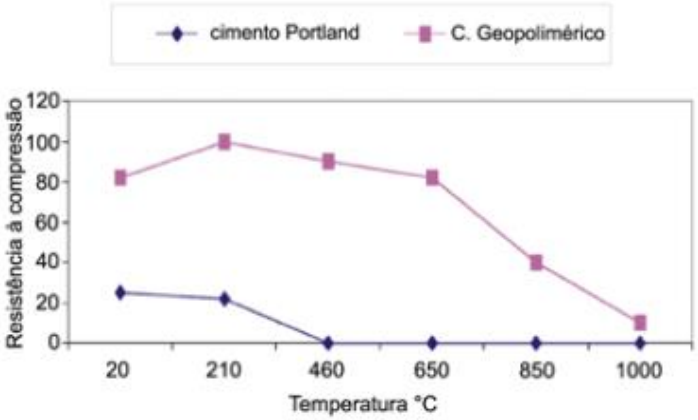


Figura 2.4- Perda de resistência com o aumento de temperatura em cimentos à base de cimento Portland e geopolimérico (Torgal *et al.*, 2005).

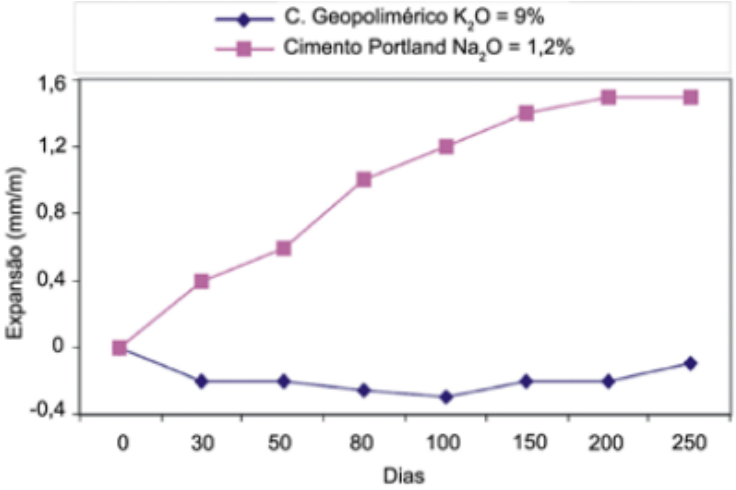


Figura 2.5- Reação álcali-sílica. Expansão em argamassas à base de cimento Portland e geopolimérico (Torgal *et al.*, 2005).

2.5 Trabalhos anteriores

No DEC-FCTUC foram desenvolvidos diversos trabalhos em torno da ativação alcalina do metacaulino, alguns dos quais em torno de aplicações estruturais (Gonçalves (2014), Ribeiro (2014), Carreira (2015), Correia (2016), Fonseca (2016) e Marques (2016)), outros no desenvolvimento do material geopolímero. De seguida resumem-se alguns dos trabalhos desenvolvidos no âmbito deste último item.

Por exemplo, Oliveira (2014) realizou diversas misturas geopoliméricas constituídas por areia como agregado, metacaulino como ligante e um ativador composto por hidróxido de sódio e silicato de sódio. A mistura base utilizada neste trabalho foi adotada deste trabalho. Oliveira (2014) variou as proporções da composição do ativador e avaliando as suas consequências ao nível das caraterísticas mecânicas, nomeadamente a resistência à tração por flexão, a resistência à compressão, a extensão de tração e o módulo de elasticidade. Estes resultados foram comparados com argamassas de cimento Portland. Com a possibilidade destes materiais serem utilizados futuramente na construção, houve ainda a necessidade de caraterizar a evolução temporal das suas propriedades.

Verificou que as propriedades mecânicas dos geopolímeros se mantinham praticamente constantes a partir do 14º dia de vida dos provetes, embora a sua evolução seja substancialmente retardada para traços com pouca quantidade de hidróxido, o qual, recorde-se, desempenha um papel de dissolução das componentes elementares do ligante. Verificou também que os materiais geopoliméricos apresentam melhores caraterísticas relativamente à resistência de tração e extensão de tração do que as misturas de cimento, sendo mais adaptáveis a campos de deformações, e consequentemente, reduzindo o fenómeno de fendilhação. Constatou que a melhor eficácia na composição do ativador se situava entre o traço de 1:1,75 e 1:2 (hidróxido:silicato), obtendo melhores capacidades resistentes, apesar do valor máximo do módulo de elasticidade ocorrer pouco fora deste intervalo. Concluiu que os materiais geopoliméricos são uma boa alternativa face ao cimento (Oliveira, 2014).

Guerra (2014) analisou a hipótese de substituir parte do ligante incorporando alguns resíduos da indústria cerâmica nas misturas geopoliméricas, tais como cinzas de tijolo, cerâmica não cozida, no sentido de comparar os parâmetros resistentes, tendo ainda realizado uma mistura apenas com cimento Portland. Assim, partindo de uma mistura base composta por metacaulino, areia e um ativador composto, idealizou novas misturas substituindo 30% e 70% do metacaulino da mistura base por outros ligantes. Utilizou um ligante de cinzas de tijolo subdividido em três granulometrias diferentes, com o intuito de estudar a sua influência. O autor analisou as caraterísticas mecânicas dos materiais, nomeadamente o módulo de

elasticidade, a resistência à tração por flexão, a resistência à compressão e por fim a extensão de rotura por tração e o módulo de elasticidade semi-estático.

Após a realização dos ensaios, o autor concluiu que não existe uma mistura, ou seja, uma única combinação dos parâmetros analisados, que apresentasse os melhores valores para todos os itens resistentes. As misturas referentes à substituição de 30% de metacaulino por cerâmica cozida apresentavam os melhores resultados ao nível do módulo de elasticidade. Relativamente à tensão de rotura por tração de flexão, os melhores valores foram registados para a mistura base e para as misturas com os correspondentes 30% de substituição de metacaulino por cerâmica. No que diz respeito à resistência à compressão, todas as misturas de substituição de 30% de metacaulino obtiveram resultados superiores à mistura de cimento (Guerra, 2014).

Fernandes (2015) estudou o efeito da adição de plastificantes e da temperatura de cura de misturas geopoliméricas compostas por dois tipos de metacaulino, branco e castanho, avaliando as propriedades resistentes do material tais como a resistência à tração por flexão e a resistência à compressão. O plastificante foi adicionado às misturas em percentagens relativas à massa de ligante 0,3%, 0,6% e 1,2%. Relativamente à temperatura de cura foram construídos provetes às temperaturas de 10ºC, 15ºC, 20ºC, 30ºC, 40ºC e 50ºC.

Concluiu que a adição de plastificantes não era favorável à massa de geopolímeros, visto que tanto na resistência à tração por flexão como na resistência à compressão, a capacidade resistente diminuiu em todas as doses adicionadas de plastificante. Relativamente à temperatura de cura, foram reveladas perdas das propriedades resistentes para temperaturas superiores a 30ºC, sendo a cura realizada à temperatura ambiente a ideal para estas misturas. No que diz respeito à cor do metacaulino, verificaram-se resistências de tração por flexão superiores no metacaulino castanho, mas que no entanto, foi observado o oposto relativamente às resistências de compressão, apresentando resistências superiores nas misturas de metacaulino branco (Fernandes, 2015).

Guerra (2015) realizou estudos associados à influência da percentagem de metacaulino e ainda da alteração da composição dos agregados com variações granulométricas no sentido de avaliar o seu impacto nas tensões resistentes à tração e à compressão. No que diz respeito à variação de ligante, foram realizadas misturas a partir de uma mistura base, aumentando a porção de metacaulino em 10%, 30%, 50%, 70%, 90% e 100%. Relativamente ao agregado, a autora decidiu usar uma brita calcária, optando pelos diâmetros máximos de 2,38mm, 4,76mm, 6,30mm e 9,50mm.

Posteriormente, não constatou que a quantidade de ligante constituísse um parâmetro fundamental para melhorar as capacidades resistente dos geopolímeros, ou seja, não detetou qualquer melhoria com o aumento da quantidade de ligante. Relativamente às misturas com alteração da composição dos agregados, os resultados foram inconclusivos, visto que tanto as tensões de rotura à tração por flexão como os de compressão diminuíram com o aumento do diâmetro do agregado, exceto no caso do diâmetro de 9,50mm, onde as tensões de rotura aumentaram (Guerra, 2015). Este conjunto de resultados, alguns deles com variabilidade não justificada, necessitam de serem confirmado seguindo outras metodologias, ou abordando outros parâmetros.

Almendra (2016) estudou a influência da substituição de metacaulino em percentagens de 20% e 33% por um resíduo calcário, com o intuito de aumentar os conhecimentos sobre o comportamento do metacaulino como ligante. Na realização das misturas foram utilizados dois tipos de metacaulino, o branco e o castanho, com a finalidade de comparar os resultados obtidos. Foram substituídas percentagens de 20% e 33% de calcário não cozido em cada tipo de metacaulino. As mesmas percentagens foram substituídas por calcário cozido a 600ºC e a 800ºC. Posteriormente foram analisadas as tensões de rotura à tração por flexão e à compressão, em função do ligante substituído.

Foi concluído que com a incorporação dos vários tipos de calcário, cozido ou não, em substituição ao metacaulino, são registados decréscimos das resistências dos geopolímeros com o aumento da percentagem de calcário na mistura. Concluiu-se adicionalmente, por último, que a perda de resistência é mais gravosa nas misturas de metacaulino castanho (Almendra, 2016).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações gerais

No presente capítulo pretende-se descrever todo o processo laboratorial realizado ao longo do trabalho, desde a caraterização dos materiais no que diz respeito à sua composição química e granulométrica, até à execução dos ensaios para a determinação da resistência mecânica dos provetes.

Importa recordar que o principal objetivo desta dissertação consiste em analisar a influência da variação da percentagem de ligante na mistura e a variação numa mistura base das granulometrias de duas diferentes britas. É exposto todo o procedimento usado desde a conceção das misturas até a desmoldagem dos provetes. São ainda descritas as metodologias para a elaboração dos ensaios para a determinação do comportamento mecânico, relativas à resistência à tração por flexão e à resistência à compressão.

Todo o processo de análise experimental será baseado na norma NP EN 196-1 (2006), referente a metodologias de ensaio de cimento, visto não existir um regulamento específico para misturas ativadas alcalinamente cujo ligante seja o metacaulino. A adoção desta norma parece razoável, tento em conta a semelhança das misturas com base nestes dois ligantes.

3.2 Descrição dos Materiais

3.2.1 Metacaulino

O Metacaulino é um material de origem pozolânica, obtido por desidroxilação quase total de argilas cauliníticas, o qual constitui um processo de perda substancial da água de constituição, com correspondência da coordenação do alumínio com o oxigénio (Pinto, 2004). A temperatura a que se efetua o tratamento térmico do Metacaulino ronda os 700-800ºC.

O Metacaulino é normalmente constituído por 50-55% de sílica SiO_2 e por 40-45% de alumina Al_2O_3. Outros óxidos tais como Fe_2O_3, TiO_2, CaO e MgO também podem estar presentes, mas em quantidades reduzidas (Poon *et al.*, 2001). Relativamente ao tamanho das partículas, alguns autores referem um tamanho das dimensões médias de aproximadamente

3μm de diâmetro sendo 99,9% das suas partículas inferiores a 16μm (Melo, 2012). No entanto, segundo a empresa Argeco, as partículas de metacaulino têm diâmetros inferiores a 90μm. As propriedades do Metacaulino dependem muito da matéria-prima de que provém e da temperatura de calcinação.

A massa volúmica do material é um parâmero importante para avaliar o volume do componente a partir da massa, ou vice-versa. A partir de um processo de pesquisa foi consultado um limite de variação de massa volúmica compreendido entre os valores de 2400-2700 kg/m^3 (Pinto, 2004).

O Metacaulino utilizado neste trabalho é um produto proveniente da empresa francesa Argeco, o qual apresenta uma cor de tijolo, relacionado com a origem da sua extração. A cor indica qualitativamente o teor de impurezas que o caulino possui, correspondendo a cor branca a um caulino puro. Na Figura 3.1 apresenta-se o aspeto do Metacaulino utilizado na realização das misturas efetuadas.

Figura 3.1- Aspeto físico do Metacaulino.

3.2.2 Areia

A areia utilizada é uma areia natural rolada proveniente das obras realizadas na autoestrada que liga Coimbra à Figueira da Foz junto ao nó de Souselas. De modo a caraterizar a areia, foram realizados ensaios relativos à análise granulométrica de acordo com a norma NP EN 933-1 (2000).

Inicialmente procedeu-se à secagem de uma amostra de areia durante cerca de 12 horas, de modo a retirar a restante humidade. De seguida a amostra foi pesada com recurso a uma balança calibrada. Posteriormente procedeu-se à peneiração manual da amostra de areia, através de uma série de peneiros com um diâmetro máximo de 4,75mm e mínimo de 0,075mm, juntamente com o depósito. Determinaram-se as percentagens de partículas retidas e passadas em cada peneiro. Na Figura 3.2 apresentam-se alguns dos peneiros utilizados

juntamente com as várias frações de areia. Os resultados obtidos são expressos, em forma de curva granulométrica, na Figura 3.3.

Figura 3.2- Peneiros e as diversas frações da areia.

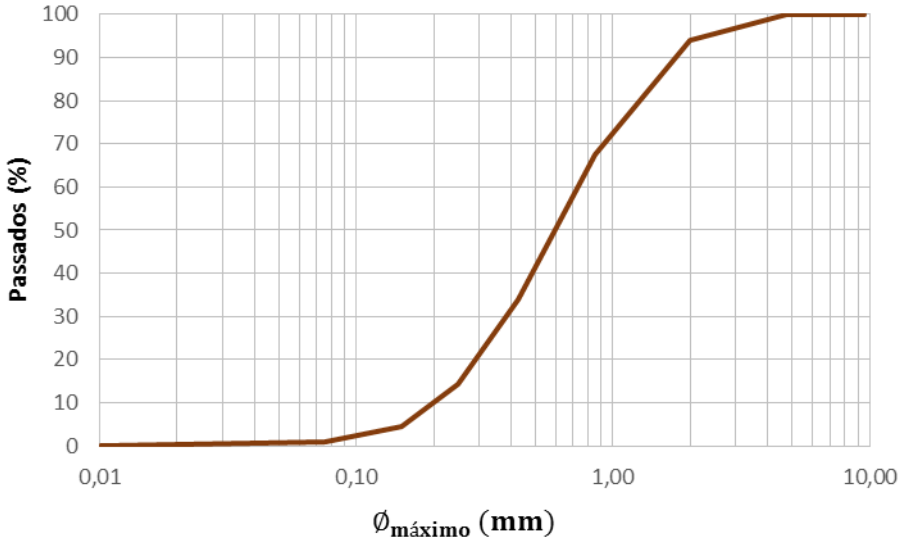


Figura 3.3- Curva granulométrica da areia.

Relativamente à massa volúmica da areia, realizaram-se ensaios no laboratório de geotecnia, tendo-se estimado o valor de $\gamma areia \approx 2600$ kg/m^3.

3.2.3 Brita Calcária

A brita calcária utilizada aparenta tons brancos e beije, a estrutura é compacta e a textura angular. Verificou-se ser composta maioritariamente pelo mineral de calcite, o qual tem uma dureza de 3 na escala de Mohs. O valor de referência utilizado para a massa volúmica teve como base o intervalo entre 2500 a 2800 kg/m^3 (Coutinho, 1973). Tal como será explicado adiante, este valor foi clarificado ao longo do trabalho.

De acordo com a norma NP EN 933-1 (2000), efetuou-se a peneiração manual da brita. Devido às limitadas dimensões granulométricas das britas, escolheram-se os peneiros relativos aos diâmetros máximos de 2,0mm, 4,75mm, 6,30mm e 9,50mm, de modo a obter amostras cujos diâmetros máximos desejados seriam de 2,0mm, 4,75mm e de 6,30mm. Importa salientar que a norma NP EN 196-1 (2006), relativa à construção dos provetes 160mmx40mmx40mm, refere o uso de um diâmetro máximo dos agregados de 2,0mm. Acredita-se tratar de um valor conservativo, visto que a norma refere-se somente à areia. Alternativamente, segundo Coutinho e Gonçalves (1994), a máxima dimensão do agregado utilizado numa mistura de betão não deverá ultrapassar os 10mm ou 12mm, em provetes de seção transversal de 38mm^2, para ensaio de tração pura. Neste trabalho, optou-se por considerar os diâmetros até 6,30mm. Na Figura 3.4 ilustram-se as diversas frações da brita utilizadas.

Figura 3.4- Frações da brita calcária.

3.2.4 Brita Granítica

A brita granítica utilizada apresenta uma cor cinzenta devido ao feldspato e ao quartzo, seus principais constituintes, os quais apresentam, respetivamente, graus de dureza de 6 e 7 na escala de Mohs, proporcionando uma resistência superior à brita granítica em comparação à brita calcária. Relativamente à massa volúmica, foi admitido inicialmente, após consulta (Coutinho, 1973), o intervalo de valores entre 2500 a 3000 kg/m^3. Tal como no caso da brita calcária, também este valor foi clarificado adiante.

A brita disponível não continha uma granulometria muito vasta, em particular ao nível das partículas finas. Por conseguinte, recorreu-se a um processo de moagem, de modo a obter os diâmetros desejados. A peneiração da brita granítica foi realizada de acordo com a norma NP EN 933-1 (2000). Os diâmetros máximos foram escolhidos de forma idêntica à brita calcária, obtendo assim as frações de diâmetro máximo correspondente a 2,0mm, 4,75mm e 6,30mm. Na Figura 3.5 mostram-se as diversas frações granulométricas obtidas.

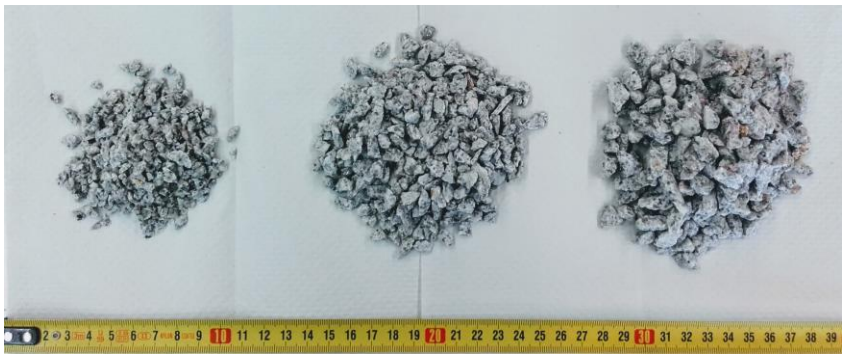


Figura 3.5- Frações da brita granítica.

3.2.5 Ativador

Os materiais provenientes dos geopolímeros contém elevados teores de sílica SiO_2 e alumina Al_2O_3, passiveis de serem ativados por uma massa aquosa, designada por ativador, o qual contêm uma elevada alcalinidade (Centeio, 2011). Daí a designação de ativação alcalina. O ativador pode ser simples ou composto. Como o próprio nome indica, os ativadores simples são constituídos por apenas uma componente química. Por sua vez, os ativadores compostos são constituídos por mais do que uma componente química. Em geral, os ativadores compostos são menos viscosos, o que resulta numa melhor trabalhabilidade da massa de geopolímero (Oliveira, 2014).

O ativador utilizado ao longo do presente trabalho é um ativador composto, constituído por hidróxido de sódio $NaOH$ e silicato de sódio SiO_2Na_2O, numa porção de 1:2. A relação de hidróxido/silicato foi adotada inicialmente com a escolha da mistura base. Em trabalhos anteriores verificou-se que as melhores capacidades resistentes, quer à compressão, quer à tração, encontrava-se no domínio da relação 1:2 (Oliveira, 2014). A massa volúmica, avaliada para o ativador composto final, através de ensaios realizados no laboratório de Estruturas, foi de γact = 1365 kg/m^3.

3.2.5.1 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio desempenha dois papéis na mistura. Atua como ativador simples, promovendo a dissolução do composto alumino-silicato, quebrando as ligações químicas dos óxidos de alumínio do ligante e depois funciona como um ligante, reorganizando a estrutura (Pinto, 2006).

O hidróxido de sódio é preparado a partir da soda cáustica em grãos, dissolvendo-se em água de modo a obter a concentração desejada. A concentração necessária para garantir uma pasta

o mais trabalhável possível é de 12,5 molal (Oliveira, 2014). De modo a obter a concentração de 12,5M, dissolveu-se uma porção de 400g de soda caustica em 1l de água.

3.2.5.2 Silicato de Sódio

O silicato de sódio $NaSiO_4$ é o ativador que desempenha um papel essencial de ligante das componentes químicas da mistura. O silicato de sódio utilizado ao longo do presente trabalho foi fornecido pela empresa "Sociedade Portuense de Drogas, S.A", com a designação "Silicato de Sódio D40".

3.2.6 Água

A água utilizada na dissolução da soda cáustica provém diretamente da rede de abastecimento do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Não foi realizado nenhuma análise específica relativamente à sua qualidade.

3.3 Composição das misturas

Para a composição das misturas relativas ao metacaulino foi adotado a fórmula fundamental da composição do betão. Segundo Coutinho (1973) o betão é constituído por agregados, cimento, água e um volume de ar introduzido pelo próprio cimento e pelas partículas do agregado. Na Equação 3.1 indica-se a fórmula fundamental da composição do betão, considerando que uma unidade de volume é igual à soma do volume do agregado, designado por *i*, do volume de água *e*, do volume do cimento *c*, e do volume de ar *v*.

$$1 = i + e + c + v \tag{3.1}$$

Utilizando a Equação 3.1 na formulação das misturas relativas à adição do metacaulino, alterou-se a componente de cimento pelo metacaulino, substituindo a parcela do cimento *c*, pela parcela relativa ao ligante *l*. Do mesmo modo, substituiu-se a parcela da água pela do ativador, mantendo-se contudo a designação por se tratar da fase líquida.

O cálculo do volume dos agregados, do metacaulino e do ativador, foi realizado através do quociente entre a sua massa e respetiva massa volúmica, γ_i, γ_l e γ_e. No que diz respeito aos agregados, dada a sua constituição ser à base de areia e britas, em que cada um dos agregados tem proporções e massas volúmicas diferentes, somou-se cada componente. Decorridas as alterações, obteve-se a Equação 3.2, essencial para o cálculo das quantidades necessárias de cada componente para a obtenção de um determinado volume.

$$1 = \sum \frac{M_i}{\gamma_i} + \frac{M_l}{\gamma_l} + \frac{M_e}{\gamma_e} + v \tag{3.2}$$

De acordo com Coutinho (1973), o volume de vazios varia entre 1 e 3%, sendo um parâmetro difícil de estimar. No entanto, referenciando a norma 613 do American Concrete Institute (ACI, 1980), o valor médio de vazios ronda os 3% para um agregado com um diâmetro máximo de 9,5mm. Foi com base nestes dados, que foram adotados os valores de 2 e 3% para o volume de vazios das misturas.

A trabalhabilidade é um conceito que exprime a maior ou menor facilidade em particular, transportar, colocar nos moldes e compactar um betão sem que o mesmo perca a sua homogeneidade e uniformidade, isto é, sem que haja segregação ou separação dos componentes. É uma propriedade avaliada através da coesão e consistência que o betão apresenta (Coutinho, 1973). Na realização das misturas, a quantidade de ativador utilizada dependia da trabalhabilidade requerida, a qual foi sendo avaliada qualitativamente, mistura a mistura.

3.4 Misturas

Foram produzidas diversas misturas com diferentes combinações com a finalidade principal de avaliar as principais caraterísticas resistentes dos geopolímeros construídos com ativação alcalina do metacaulino. Com este objetivo, foram realizadas várias misturas com diferentes proporções de metacaulino, tendo sido usadas as relações em massa de areia/metacaulino correspondentes a 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5. Posteriormente realizaram-se mais dois conjuntos de misturas, cujo parâmetro de influência refere-se à adição de agregados, nomeadamente de brita calcária e de brita granítica, com granulometrias correspondentes aos diâmetros máximos de 2,0mm, 4,75mm e de 6,30mm, procurando obter diferentes resultados tendo em conta a curva de Faury.

Como ponto de partida, foi considerada uma mistura base anteriormente estudada (Oliveira, 2014), com uma relação areia/metacaulino de 2,5. As quantidades dos componentes da mistura base são apresentadas na Tabela 3.1. As restantes combinações foram idealizadas a partir desta mistura base. Para cada mistura, foram realizados 6 provetes com as dimensões de 40x40x160mm^3, no sentido de obter uma amostra suficientemente significativa em termos de resultados.

Tabela 3.1- Composição da mistura base 2,5.

Mistura	*Base 2,5*
Metacaulino [g]	750
Areia [g]	1875
Hidróxido [g]	215
Silicato [g]	430

3.4.1 Variação do Ligante

Inicialmente, foram realizadas as combinações referentes à variação da massa do ligante M_l relativamente à massa dos agregados M_i. Tendo em conta a mistura base da relação $M_i/M_l=2,5$, variaram-se as proporções da areia e do metacaulino de modo a obter as combinações 1,5; 2,0; 3,0; 3,5. Na Tabela 3.2 apresentam-se as quantidades elementares do ligante metacaulino, dos agregados e do ativador composto, para a composição das misturas realizadas.

A quantidade de cada componente necessária para a constituição de cada mistura foi estimada através de cálculos referentes ao volume de cada constituinte. A metodologia encontra-se descrita no capítulo seguinte. Com base na massa volúmica de cada componente, apurou-se o volume correspondente que ocuparia na mistura, apurando-se assim o volume total previsto V_{prev} da mistura. O volume total da mistura teve como requisito único o cumprimento do volume correspondente aos moldes (1536cm^3), tendo sido previsto, no entanto, um desperdício máximo de 5% da mistura total. Com este intuito, foram efetuadas as conjugações dos componentes areia/metacaulino/ativador de modo a obter as combinações desejadas. O cálculo do volume previsto para cada mistura resultou muito próximo do volume efetivo V_{eff} com desvios inferiores a 1%, como é indicado na Tabela 3.2.

Relativamente ao ativador, a sua quantidade também foi ponderada no cálculo dos provetes, a qual, repita-se, foi estipulada em função da trabalhabilidade requerida para cada mistura. Observou-se que uma grande fração do ativador era absorvido pelo ligante, e por conseguinte, as misturas que continham uma maior porção de metacaulino, requeriam maior quantidade relativa de ativador de modo a manter a trabalhabilidade da mistura. De facto, assumindo que a quantidade de fase líquida necessária para humidificar qualquer componente depende da superfície específica correspondente, verifica-se que o metacaulino necessita de quantidades muito superiores relativamente à areia. No ponto está assumida apenas a trabalhabilidade da massa no momento em que é produzida. Por exemplo, não se teve em conta a quantidade de ativador para desenvolver posteriormente as reações de ativação alcalina do metacaulino, nem a eventual porosidade dos agregados.

No entanto, importa recordar que este conceito constituiu um dos objetivos complementares deste trabalho, o qual foi sendo apurado ao longo do trabalho experimental desenvolvido. Neste contexto, para a mistura de $M_i/M_l=2,0$, concebida numa fase inicial do trabalho, verificou-se conter mais fase líquida do que necessária.

Tabela 3.2- Composição das misturas relativas ao parâmetro M_i/M_l.

Provetes	M_i/M_l	Metacaulino [g]	Areia [g]	Ativadores [g]	V_{prev} [cm^3]	V_{eff} [cm^3]	Desvio
P3	*1,5*	1050	1575	678	1557,8	1557,3	0,03%
P1	*2,0*	900	1800	710	1607,6	1597,4	0,64%
B2	*2,5*	770	1925	647	1555,4	1569,7	-0,91%
P2	*3,0*	695	2085	642	1582,6	1588,7	-0,38%
P4	*3,5*	620	2170	605	1556,7	1568,3	-0,74%
B1	*2,5*	750	1875	645	1525,9	1538,5	-0,82%

3.4.2 Variação das Britas

Partindo da mistura base $M_i/M_l=2,5$, foram introduzidos dois diferentes agregados, brita calcária e brita granítica, com o intuito de avaliar a sua influência na resistência dos provetes. Também aqui, o procedimento adotado baseou-se nas metodologias usualmente utilizadas para a composição do betão.

Os diâmetros máximos utilizados na realização das misturas corresponderam às britas retidas nos peneiros 2,0mm, 4,75mm e 6,30mm, como referido anteriormente. Este parâmetro é de elevada importância pois contribui para o estabelecimento da curva granulométrica. As composições granulométricas ótimas, materializadas nas curvas de referência, foram estabelecidas experimentalmente por Bolomey, Faury e Joisel (Coutinho, 1973). Estas composições granulométricas têm em conta as condições de colocação do betão, e em particular a trabalhabilidade.

A curva de referência adaptada foi a de Faury, a qual é constituída por dois segmentos de reta num diagrama em que as ordenadas, de escala linear, representam a percentagem de material passado pelos peneiros, e as abcissas, de escala logarítmica, representam a dimensão do peneiro. A aproximação à curva de referência iniciou-se na curva granulométrica da areia, e posterior junção das britas de diâmetros pré-definidos. As coordenadas da curva granulométrica de referência foram definidas através da máxima dimensão do agregado. O ajustamento da granulometria dos agregados utilizados fez-se por tentativas, determinando a percentagem de cada agregado, de modo que, a sua combinação se acercasse da curva de referência.

Considerando como origem das abcissas a dimensão 0,075mm (correspondendo à dimensão mínima do agregado) e com base na equação de Faury (Equação 3.3), foi possível alcançar a ordenada $P_{D/2}$ do ponto de abcissa *D/2*, denominada por ponto de encontro dos dois segmentos de reta, em que *D* corresponde à dimensão máxima do agregado. Na Equação 3.3, *A* e *B* são parâmetros dependentes da trabalhabilidade e da energia de compactação e *R* é o raio médio do molde.

$$P_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0{,}75} \tag{3.3}$$

Com base na fórmula fundamental da composição do betão (Equação 3.2) e da curva de referência de Faury, foi possível realizar as misturas com a percentagem ótima de cada agregado. Nas Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam-se as composições das três misturas realizadas com brita calcária e com brita granítica, sendo que na realização das misturas manteve-se a relação de $M_i/M_l=2{,}5$, tal como na mistura base.

Relativamente às misturas de brita calcária, as primeiras de brita, a quantidade de metacaulino foi ligeiramente incrementada entre as três misturas, entre 770g e 870g, conduzindo a volumes efetivos crescentes entre elas (Tabela 3.5). De facto, na primeira mistura as quantidades previstas não foram suficientes para construir os 6 provetes necessários. Já nas misturas com brita granítica, manteve-se a quantidade de metacaulino de 840g.

A quantidade de fase líquida necessária para cada tipo de agregado foi estabelecida com base na superfície estimada para unidade de massa de cada diâmetro. Para tal, a superfície específica foi estimada associando o volume da massa correspondente a esferas de diâmetro médio entre o diâmetro do peneiro correspondente e o do peneiro seguinte. Para além disso, foi suposto que a forma e a rugosidade da brita calcária era de tal ordem que duplicava a sua superfície específica, quer em relação à areia, quer em relação à brita granítica. No entanto, observou-se que com a adição das britas às misturas, a fase líquida disponível não era totalmente absorvida, ficando a mistura mais líquida do que o esperado.

Tabela 3.3- Composição das misturas. Parâmetro brita calcária.

Provetes	$\emptyset_{máximo}$	Metacaulino [g]	Areia [g]	Brita 2,00mm [g]	Brita 4,75mm [g]	Brita 6,30mm [g]	Activadores [g]
C1	2,00mm	770	1251	674	0	0	581
C2	4,75mm	840	1260	630	210	0	597
C3	6,30mm	870	1196	218	326	435	597

Tabela 3.4- Composição das misturas. Parâmetro brita granítica.

Provetes	$\emptyset_{máximo}$	Metacaulino [g]	Areia [g]	Brita 2,00mm [g]	Brita 4,75mm [g]	Brita 6,30mm [g]	Activadores [g]
G1	2,00mm	840	1365	735	0	0	607
G2	4,75mm	840	1260	630	210	0	603
G3	6,3mm	840	1155	210	315	420	593

Tabela 3.5- Volumes e desvio. Parâmetro de brita calcária e de brita granítica.

Provetes	$\emptyset_{máximo}$	Restos [cm^3]	V_{prev} [cm^3]	V_{eff} [cm^3]	Desvio
C1	2,00mm	5	1471,7	1471,5	0,02%
C2	4,75mm	10	1574,8	1578,0	-0,21%
C3	6,30mm	40	1612,5	1604,8	0,48%
G1	2,00mm	50	1616,6	1620,0	-0,20%
G2	4,75mm	45	1614,9	1618,8	-0,24%
G3	6,3mm	35	1608,9	1600,5	0,53%

Nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8, apresentam-se as distribuições granulométricas usadas para as misturas de brita calcária e de brita granítica. Visto que o parâmetro de influência era o diâmetro máximo das britas, e como foram adotados os mesmos diâmetros em ambas as britas, as distribuições foram idênticas. Apresentam-se também as curvas granulométricas dos agregados e a curva ótima de Faury. Verifica-se um relativo afastamento da curva das misturas realizadas em relação à curva de Faury no domínio correspondente aos diâmetros de menor dimensão, devido à insuficiência de finos da areia.

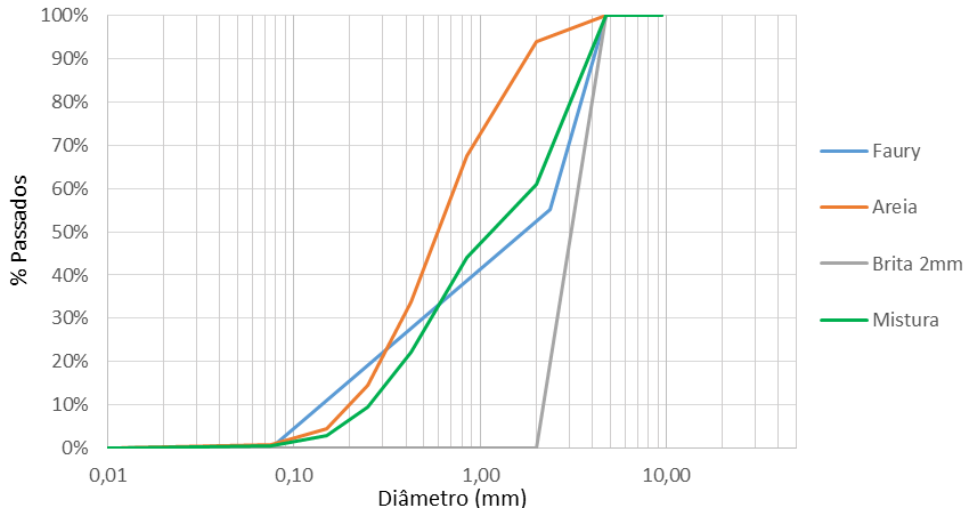


Figura 3.6- Curvas granulométricas e curva de Faury. Diâmetro máximo de 2,0mm.

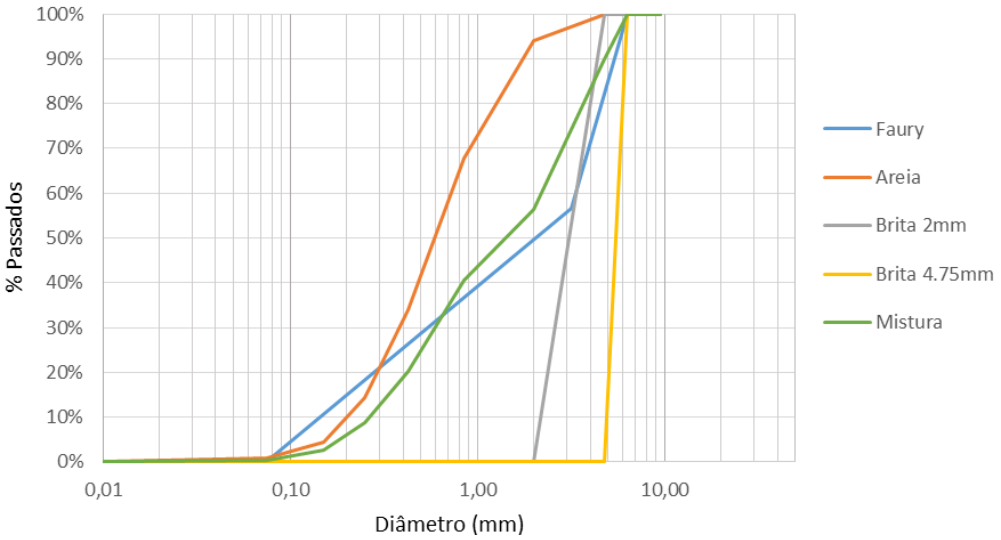


Figura 3.7- Curvas granulométricas e curva de Faury. Diâmetro máximo de 4,75mm.

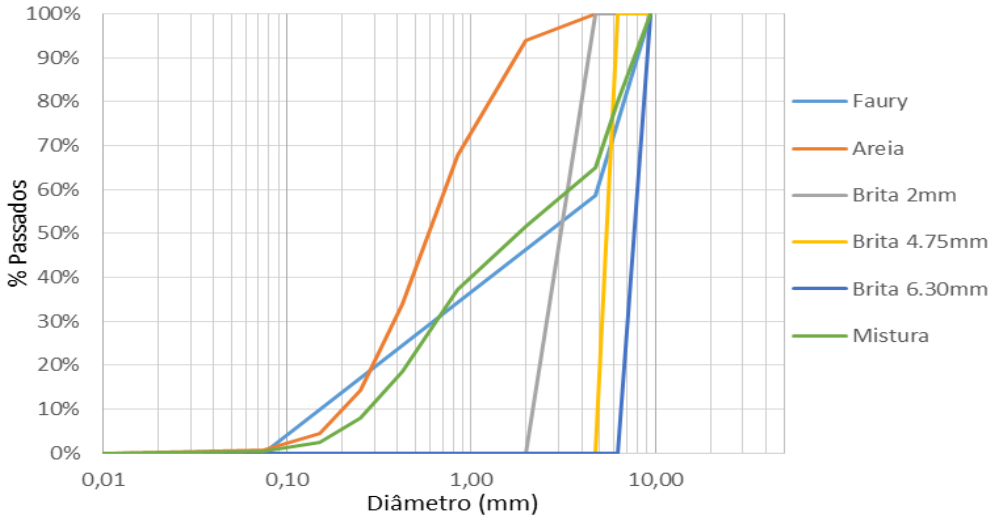


Figura 3.8- Curvas granulométricas e curva de Faury. Diâmetro máximo de 6,30mm.

3.5 Provetes

A realização dos provetes basearam-se nos procedimentos descritos na norma NP EN 196-1 (2006). O processo iniciou-se pela pesagem dos materiais a utilizar, numa balança com precisão de 0,1g. Num recipiente de vidro, dissolveram-se 200g de soda cáustica em 500ml de água (medida numa proveta graduada), resultando no hidróxido de sódio através de uma reação exotérmica, atingindo cerca de 70ºC. Por este motivo, foi permitido um arrefecimento mínimo de 2 horas para dar continuação ao processo de mistura. Após o arrefecimento do

hidróxido, adicionou-se no mesmo recipiente a necessária quantidade de silicato de sódio com metade da quantidade do hidróxido, pesando em seguida os agregados (areia e britas) e o metacaulino em diferentes recipientes.

A mistura das componentes foi realizada numa misturadora, constituído por um recipiente em aço inoxidável e uma pá misturadora acionada por um motor elétrico. Inicialmente misturou-se manualmente o metacaulino e a areia, no recipiente da misturadora. Em seguida, com a misturadora em funcionamento, foi adicionado o ativador composto, aos poucos, até que a mistura atingisse uma boa trabalhabilidade. A adição de brita, quando requerida, foi feita após as restantes componentes. No caso particular das britas de granulometria de 6,30mm, a sua mistura foi feita no fim, de modo manual. Na Figura 3.9 é apresentada a misturadora e o aspeto de uma das misturas realizadas.

Figura 3.9- Misturadora. Aspeto da trabalhabilidade da mistura.

Concluída a amassadura, a mistura foi colocada de imediato em 2 moldes em aço (Figura 3.10), cada um com três compartimentos horizontais permitindo a preparação simultânea de três provetes prismáticos com seção transversal de 40mmx40mm e com 160mm de comprimento (descrito na norma NP EN 196-1 (2006)). Com a ajuda de uma espátula estendeu-se a amassadura uniformemente nos moldes. Os moldes foram previamente preparados de modo a evitar a aderência da mistura às paredes do molde, e foram também evolvidos numa película de plástico evitando que a água da mistura evaporasse, garantindo um processo de cura satisfatório. Os moldes foram colocados em cima de uma mesa vibratória (Figura 3.10) de modo a compactar a mistura, expulsando parte do volume de vazios. O processo de vibração levou cerca de 1 minuto para cada mistura.

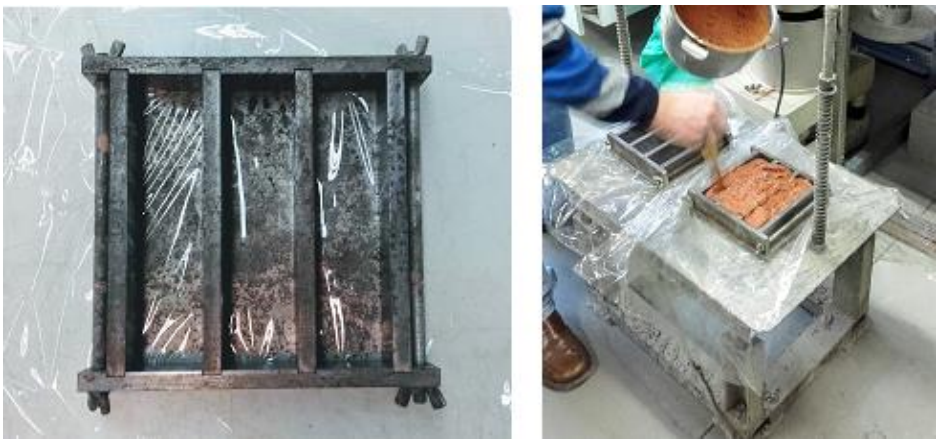


Figura 3.10- Moldes (esquerda). Mesa vibratória (direita).

Após o processo de compactação, os provetes foram envolvidos pela pelicula de plástico e armazenados numa sala cuja temperatura rondava os 20ºC, mantendo-se até à realização dos ensaios (Figura 3.11). Segundo a norma NP EN 196-1 (2006), para argamassas, a desmoldagem dos provetes deve ser realizada após 24 horas. Neste caso, os provetes foram sempre desmoldados após 48 horas, garantindo assim que a presa estava concluída. O processo de desmoldagem foi executado com recurso a alguns impactos, tendo sempre o cuidado de não danificar os provetes. A Figura 3.11 apresenta o início do processo de desmoldagem.

Posteriormente à desmoldagem, foram registadas as dimensões *b* e *h* dos provetes colocados em ensaio. Assim, a medida b corresponde à largura da seção transversal, tirada na perpendicular à superfície rugosa, e a medida *h* corresponde à altura, tirada na direção paralela à mesma superfície. Mediu-se a massa de cada provete, atribuindo a designação de *P* aos provetes de parâmetro M_i/M_l (variação de ligante), de *C* aos provetes de parâmetro brita calcária, de *G* aos provetes de parâmetro brita granítica e de *R* aos provetes de parâmetro ativador. No total foram realizadas 14 misturas, resultando em 84 provetes.

Figura 3.11- Moldes em processo de presa (esquerda). Desmoldagem (direita).

3.6 Ensaios Experimentais

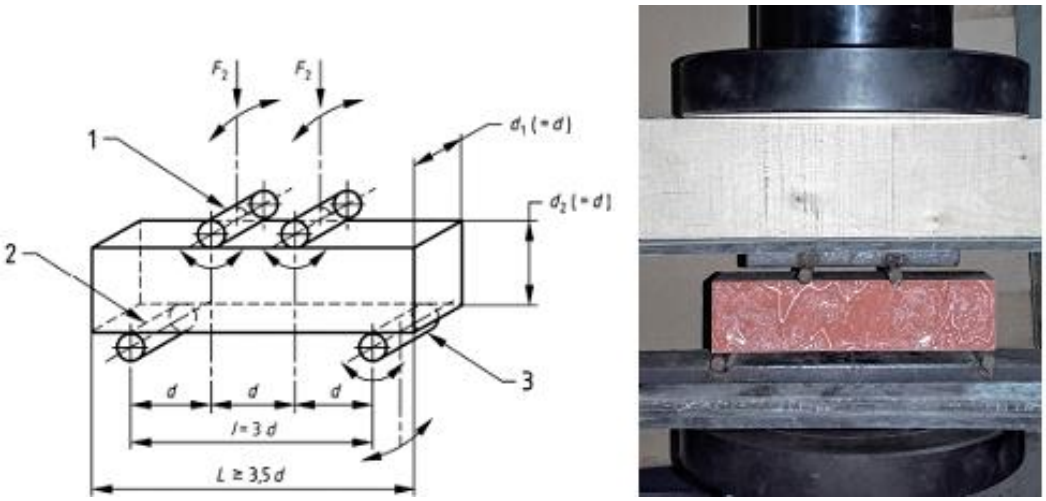
Para avaliar as resistências mecânicas dos provetes foram realizados alguns ensaios laboratoriais. Os ensaios foram realizados, sempre que possível, a partir de 16 dias de cura. De facto, através de ensaios realizados por Oliveira (2014), verifica-se que a partir do dia 14 já é possível realizar os ensaios de resistência, visto que não existem alterações significativas nas propriedades mecânicas do material. Nos seguintes pontos são referidos os principais procedimentos de ensaio utilizados ao longo do presente trabalho para a avaliação das resistências à flexão e à compressão, de acordo com as normas NP EN 196-1 (2006), NP EN 12390-5 (2009) e NP EN 12390-3 (2011).

3.6.1 Ensaios de Resistência à tração por flexão

Tendo como base a norma NP EN 12390-5 (2009), realizaram-se os ensaios de rotura à tração por flexão com o intuito de avaliar a tensão de rotura de cada provete. Antes de iniciar os ensaios, limparam-se as superfícies e as arestas dos provetes, de modo que ao assentar os provetes nos equipamentos não houvesse qualquer irregularidade que pudesse influenciar nos resultados.

Recorreu-se ao modelo de carga apresentado na referida norma, indicado na Figura 3.12, no geral os provetes, simplesmente apoiados, são submetidos a um momento fletor por aplicação de duas cargas através de roletes colocados na face superior. Assegurou-se sempre que a direção de referência de aplicação da carga era sempre perpendicular à direção de cura do provete.

Os roletes são de aço e estão em contacto com placas metálicas. A placa inferior suporta dois roletes, distanciados de aproximadamente 150mm, em correspondência com os apoios do provete. Relativamente à placa superior, os seus roletes estão distanciados cerca de 50mm. Importa salientar ter sido seguido com algum rigor a colocação do provete e das peças metálicas de modo a garantir a centralidade do item de ensaio relativamente à ação da prensa. Entre as placas metálicas e os pratos da prensa foram colocados borrachas, e ainda uma peça de madeira, com o intuito de absorver qualquer impacto não previsto provocado pela prensa. Na Figura 3.12 apresenta-se o esquema do ensaio realizado.



(a) (b)

Figura 3.12- a) Modelo de aplicação de carga nos provetes (NP EN 12390-5, 2009). b) Esquema do ensaio.

Os ensaios foram realizados com controlo da deformação. Através do sistema de controlo associado à prensa eletromecânica "*Servosis série ME-402*", existente no laboratório, foi possível programar a aplicação da ação em duas fases: na primeira, até aproximadamente 15% da carga de rotura, i.e. até cerca de 0,3kN, a aplicação da ação foi realizada à velocidade de cerca de 0,1 mm/s; logo de seguida, a ação foi aplicada à velocidade de 0,004 mm/s até atingir a rotura do provete. A rotura do provete ocorreu sempre entre os roletes superiores, resultando em dois prismas, tal como se mostra na Figura 3.13. No procedimento de cada ensaio foi incluído o requisito de duração mínima de 3 minutos, reduzindo-se assim possíveis efeitos dinâmicos.

Figura 3.13- Rotura dos provetes provocada pelo ensaio à tração por flexão.

O valor da tensão resistente à tração por flexão f_t, usualmente expresso em *MPa*, de cada provete foi obtido pela expressão indicada na norma NP EN 12390-5 (2009).

$$f_t = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \tag{3.4}$$

Onde *F* é a carga máxima obtida com a rotura do provete, expressa em N, *l* é a distância entre os roletes inferiores de apoio, em mm, e por fim os parâmetros d_1 e d_2 são as dimensões laterais do provete, respetivamente, *b* e *h*, expressos em mm.

3.6.2 Ensaios de Resistência à compressão

O procedimento utilizado para a realização dos ensaios à compressão tiveram como base a norma NP EN 12390-3 (2011). Os provetes resultantes da realização dos ensaios à tração por flexão foram sujeitos a uma carga de compressão, no mesmo atuador eletromecânico, até atingir a sua rotura.

Os ensaios realizam-se com recurso a um dispositivo com pratos de compressão de 40x40mm, tal como indicado na Figura 3.14. O dispositivo foi montado sobre o prato inferior do atuador, centrado relativamente o seu eixo, e utilizando borrachas entre os dois equipamentos com o mesmo propósito que o descrito no ensaio de tração. Teve-se sempre em atenção a limpeza da superfície do equipamento antes de colocar o provete a ensaiar de modo que não ocorresse qualquer influência nos resultados obtidos. Os provetes foram colocados de forma que a carga fosse aplicada perpendicularmente à sua direção de cura.

Figura 3.14- Dispositivo do ensaio de compressão. Rotura do provete.

Tal como para os ensaios de tração por flexão, o ensaio foi realizado com controlo de deformação. Inicialmente, foi aplicada uma ação à velocidade de 0,1 mm/s até atingir cerca de

3,0kN. De seguida foi selecionada uma velocidade de 0,013 mm/s até o provete atingir a sua rotura. Após a ocorrência da rotura do provete por compressão. Com o intuito de certificar que os ensaios foram realizados satisfatoriamente, verificou-se se a rotura ocorreu de acordo com os exemplos expostos na norma NP EN 12390-3 (2011) (Figura 3.15).

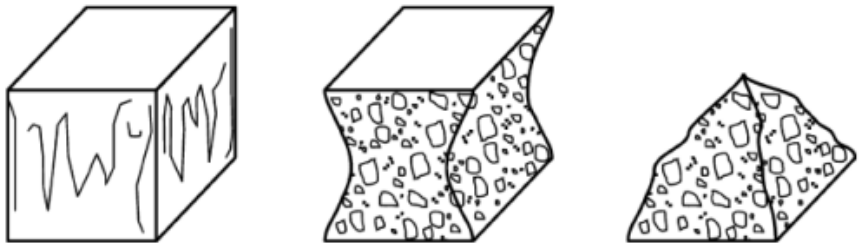


Figura 3.15- Roturas satisfatórias dos provetes (NP EN 12390-3, 2011).

O valor da tensão resistente do provete à compressão f_c, usualmente expresso em MPa, foi avaliado utilizando a Equação 3.5, referida na norma, na qual: F é a carga máxima registada no ensaio, em N; A_c é a área da seção transversal do provete ($A_c = b \cdot h$), em mm^2, na qual a força de compressão foi aplicada.

$$f_c = \frac{F}{A_c} = \frac{F}{b \cdot h} \tag{3.5}$$

4 RESULTADOS

4.1 Considerações gerais

O conteúdo desenvolvido no presente capítulo baseia-se nos resultados obtidos nas medições e nos ensaios realizados ao longo deste trabalho, organizados a partir das composições das misturas, passando pela variação da quantidade de metacaulino relativamente à dos agregados, e pela adição de outros agregados. Os valores, correspondentes às propriedades resistentes dos geopolímeros, ou seja, as tensões de rotura à tração e à compressão foram apuradas em ensaios de tração por flexão e de compressão.

4.2 Composição das misturas

Com o objetivo de prever as quantidades em massa de cada componente necessárias para a realização de um dado volume de mistura, houve a necessidade de estudar detalhadamente este processo no contexto das misturas ativadas alcalinamente. Os parâmetros a considerar para o cálculo do volume V da mistura são a massa volúmica dos agregados (γ_{areia}), a massa volúmica do ligante (γ_{lig}), a massa volúmica do ativador (γ_{act}) e o volume de vazios (V_v). Estes valores são efetivos, isto é não considera os vazios.

A massa volúmica da areia (γ_{areia}) é de 2600 kg/m^3, referido no capítulo 3.1.2. No que diz respeito à massa volúmica do ligante (γ_{lig}), os valores estão compreendidos entre 2400 e 2700 kg/m^3, como referido no capítulo 3.1.1. Relativamente ao ativador, a massa volúmica apurada no laboratório foi de γ_{act}=1365 kg/m^3. As restantes incógnitas, ou seja, relativamente às britas de calcário e de granito foram estimadas inicialmente a partir de documentos consultados de Coutinho (1973). No que diz respeito ao volume de vazios, é do nosso conhecimento que para este tipo de misturas a percentagem de volume de vazios varia entre 1 e 3%, desde que seja admitido um processo de vibração (Coutinho, 1973).

Contudo, no início do trabalho para além da mistura base conhecida, verificaram-se algumas dificuldades em prever com alguma exatidão o volume final das misturas. Nesse sentido,

desenvolveu-se uma metodologia que pudesse apurar de forma eficaz este volume efetivo da mistura V_{eff}.

Para o efeito, o volume previsto V_{prev} de cada mistura seria estimado segundo a Equação (3.1). No entanto, sendo diferentes os volumes efetivos V_{eff} avaliados, foi possível ir corrigindo os parâmetros correspondentes às massas volúmicas por tentativa e erro. Após algumas misturas, foi possível convergir para valores definitivos dos parâmetros mencionados. Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores apurados para cada componente referente às misturas realizadas.

Tabela 4.1- Massas volúmicas dos materiais.

Massa volúmicas	
γ_{Lig}	2500 kg/m^3
γ_{areia}	2650 kg/m^3
γ_{act}	1365 kg/m^3
$\gamma_{Calcário}$	2850 kg/m^3
$\gamma_{Granito}$	2550 kg/m^3

Na Tabela 4.2 são apresentados os volumes previstos (V_{prev}), avaliados considerando as massas volúmicas indicadas na Tabela 4.1, e os volumes efetivos (V_{eff}) de cada mistura, juntamente com o desvio entre eles, onde se pode observar que o desvio é menor que 1% em todas as misturas. Estes valores demonstram a correção das estimativas para as massas volúmicas de cada componente.

Tabela 4.2- Volumes previstos e efetivos das misturas.

Provetes	V_{prev} [cm^3]	V_{eff} [cm^3]	Desvio
P3	1557,8	1557,3	0,03%
P1	1607,6	1597,4	0,64%
B2	1555,4	1569,7	-0,91%
P2	1582,6	1588,7	-0,38%
P4	1556,7	1568,3	-0,74%
B1	1525,9	1538,5	-0,82%
R1	1597,4	1595,6	0,11%
R2	1555,4	1569,7	-0,91%
C1	1471,7	1471,5	0,02%
C2	1574,8	1578,0	-0,21%
C3	1612,5	1604,8	0,48%
G1	1616,6	1620,0	-0,20%
G2	1614,9	1618,8	-0,24%
G3	1608,9	1600,5	0,53%

Importa ainda realçar 3 aspetos importantes. Em primeiro lugar, a massa volúmica do ativador não foi corrigida. Em segundo lugar, a avaliação dos resíduos da mistura colados à misturadora foram avaliados visualmente. Em terceiro lugar, o volume de vazios estimado para cada mistura varia entre 2% para as misturas com agregados de brita e 3% para as misturas sem brita. Estes valores encontram justificação nas curvas granulométricas dos agregados. De facto, a curva da areia encontra-se algo afastada da curva ótima (baseada na curva de referência de Faury) (Coutinho, 1973), nomeadamente no intervalo dos finos. Nas misturas com agregados de brita foi possível atenuar este efeito.

Outro aspeto importante analisado neste trabalho está relacionado com a quantidade de fase líquida (ativador) necessária em cada mistura de modo a garantir adequada trabalhabilidade. De notar que os volumes V_{prev} e V_{eff} dependem da quantidade de massa do ativador a adicionar à mistura.

Para além da mistura base, cuja quantidade de fase líquida necessária era conhecida, nas restantes misturas a quantidade de fase líquida dependia da quantidade e tipo de agregados e de ligante. Nas primeiras misturas, a quantidade de fase líquida preparada foi sempre superior ao necessário para garantir a trabalhabilidade avaliada visualmente. Os valores efetivos das massas de ativador adicionado permitiram posteriormente avaliar a quantidade de fase líquida necessária para cada componente da mistura. A metodologia seguida baseou-se nas estimativas relativas às superfícies específicas de cada componente.

Os valores apurados das quantidades de ativador necessários para cada componente da mistura podem ser consultados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3- Quantidades de ativador necessários para cada componente.

Componente		Percentagem em peso
Ligante		50%
Areia		12,5%
Calcário	2,00mm	0,71%
	4,75mm	0,44%
	6,30mm	0,31%
Granito	2,00mm	0,40%
	4,75mm	0,24%
	6,30mm	0,17%

De acrescentar que foi considerado que 20g (aproximadamente 15ml) da fase líquida seriam suficientes para humidificação da misturadora.

4.3 Parâmetro Agregado/Ligante

Neste subcapítulo são apresentados os diferentes resultados obtidos provenientes da alteração na quantidade de ligante relativamente à massa dos agregados dos provetes. Para o efeito foi adotado o quociente M_i/M_l, onde M_i representa a massa relativa dos agregados, em relação à massa do ligante M_l, utilizados em cada mistura. Ao todo foram efetuadas 6 misturas, 2 misturas base *B*, 2 misturas com M_i/M_l inferior e 2 misturas com M_i/M_l superior.

Na Tabela 4.4 estão expressas as datas de realização das misturas, e de desmoldagem, bem como a data de realização dos ensaios.

Tabela 4.4- Cura dos provetes. Parâmetro M_i/M_l.

Provetes	M_i/M_l	Mistura	Desmoldagem	Ensaio	Cura [dias]
P3	*1,5*	03/out	06/out	20/out	17
P1	*2,0*	26/set	28/set	12/out	16
B2	*2,5*	18/nov	21/nov	05/dez	17
P2	*3*	28/set	30/set	14/out	16
P4	*3,5*	07/out	10/out	25/out	18
B1	*2,5*	21/set	23/set	07/out	16

Após a desmoldagem dos provetes foram medidas as suas dimensões e os volumes. Registou-se também a massa de cada provete logo após a desmoldagem (M_H) e imediatamente antes da execução dos ensaios (M_S), com a finalidade de conhecer a baridade. Nas Tabelas 4.5 e 4.6 indicam-se os valores médios e os correspondentes coeficientes de variação dos provetes de cada mistura realizada, sendo *b* a largura e *h* a altura correspondentes. A dimensão *h* é condicionada pelo molde. A dimensão *b* é a que resulta do enchimento do molde, e portanto, é aquela que apresenta maiores variações, tal como seria de esperar. Para além disso, a superfície superior apresenta algumas irregularidades motivadas pelo processo de cura. São apresentadas também as massas M_H e M_S, os correspondentes desvios e finalmente, a sua baridade final (δ).

Tabela 4.5- Dimensões médias dos provetes. Parâmetro M_i/M_l.

Provetes	M_i/M_l	b [mm]	h [mm]	M_H [g]	M_S [g]	Desvio	δ [kg/m³]
P3	1,5	40,4	40,0	541	540	0,13%	2088
P1	2,0	40,8	40,1	545	544	0,28%	2081
B2	2,5	40,6	40,1	542	541	0,16%	2081
P2	3,0	40,8	40,1	551	550	0,22%	2102
P4	3,5	40,4	40,0	546	545	0,16%	2106
B1	2,5	39,9	40,1	532	530	0,29%	2075

Tabela 4.6- Coeficientes de variação das dimensões médias. Parâmetro M_i/M_l.

Provetes	M_i/M_l	b [mm]	h [mm]	M_H [g]	M_S [g]	δ [kg/m³]
P3	1,5	0,73%	0,10%	0,70%	0,69%	0,36%
P1	2,0	0,74%	0,12%	1,03%	0,97%	0,48%
B2	2,5	0,93%	0,12%	0,63%	0,65%	0,49%
P2	3,0	0,88%	0,09%	0,94%	0,93%	0,45%
P4	3,5	0,68%	0,12%	0,71%	0,72%	0,27%
B1	2,5	2,04%	0,06%	1,94%	1,97%	0,46%

O coeficiente de variação permite quantificar a qualidade dos provetes, pois quanto menor o coeficiente de variação, maior a precisão das dimensões dos provetes. É possível verificar que todas as caraterísticas dos provetes têm desvios inferiores a 1%, exceto o caso da primeira mistura base (*B1*) realizada, cujo desvio ronda os 2%. Estes desvios justificam também a opção de repetir esta mistura. No entanto, em geral os desvios obtidos são relativamente reduzidos, o que garante a qualidade dos provetes construídos.

A baridade, apurada para os provetes expressa a massa por unidade de volume aparente. A baridade depende do modo como as partículas estão aglomeradas, das suas dimensões e da sua compactação, ou seja, do volume de vazios. Em princípio, esta baridade tende a aumentar com a adição de partículas de menores dimensões, as quais tendem a ocupar os vazios existentes entre as partículas de maiores dimensões. Na Figura 4.1 apresentam-se as baridades médias obtidas em cada mistura com variação do parâmetro M_i/M_l.

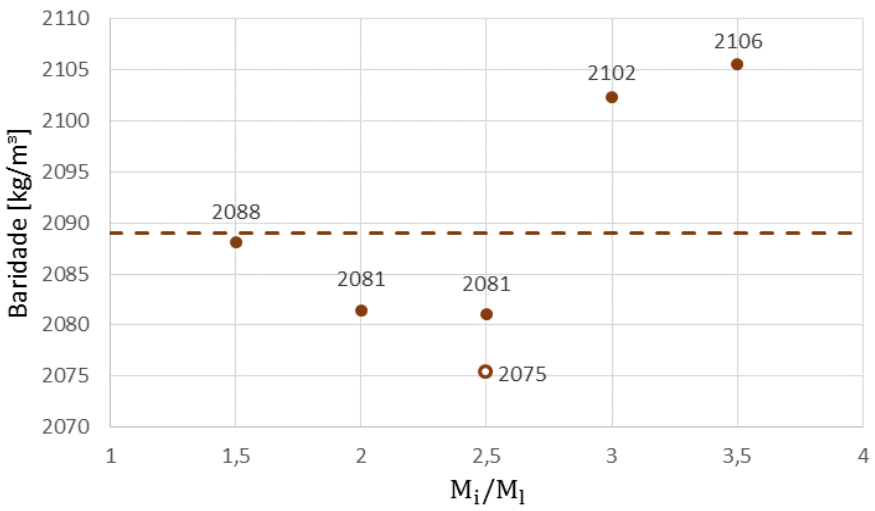


Figura 4.1- Baridades dos provetes. Parâmetro M_i/M_l.

Interessa referir que a dimensão b foi medida descontando possíveis irregularidades existentes na superfície superior dos provetes (ver Figura 4.2). Dependendo das irregularidades visualizadas, poder-se-ia descontar até 2,0mm. De qualquer modo, importa salientar que 1mm representa cerca de 2,5% do volume do provete. No entanto, a variabilidade máxima encontrada nos valores da baridade indicados na Figura 4.1 foi de cerca de 1,5%. O valor médio do conjunto é de 2089 kg/m^3, e encontra-se representado a traço descontínuo.

4.3.1 Resultados dos ensaios de tração por flexão

Cada provete de cada mistura foi submetido ao ensaio de tração por flexão, em conformidade com a norma NP EN 12390-5 (2009) tal como foi exposto em 3.4.1. De acordo com a expressão (3.4), o valor máximo da tensão de rotura à tração por flexão de cada provete foi determinado pela força máxima suportada pelo provete imediatamente antes da sua rotura. A rotura ocorreu sempre entre os dois roletes superiores (ver Figura 3.13) onde é aplicada a ação. Nas Figura 4.2 são apresentadas as superfícies de rotura dos provetes onde se fez variar o quociente da massa do agregado relativamente à massa do ligante. Importa ainda salientar que todos os ensaios demoraram mais do que 3 minutos a serem concluídos.

Figura 4.2- Rotura dos provetes após ensaio de tração por flexão.

A Figura 4.3 apresenta os valores médios das tensões de rotura à tração por flexão (f_{tm}), correspondentes a cada quociente agregado/ligante. O valor representado apenas com um contorno vazio corresponde à primeira mistura base *B1* realizada. A linha a tracejado indica o valor médio global.

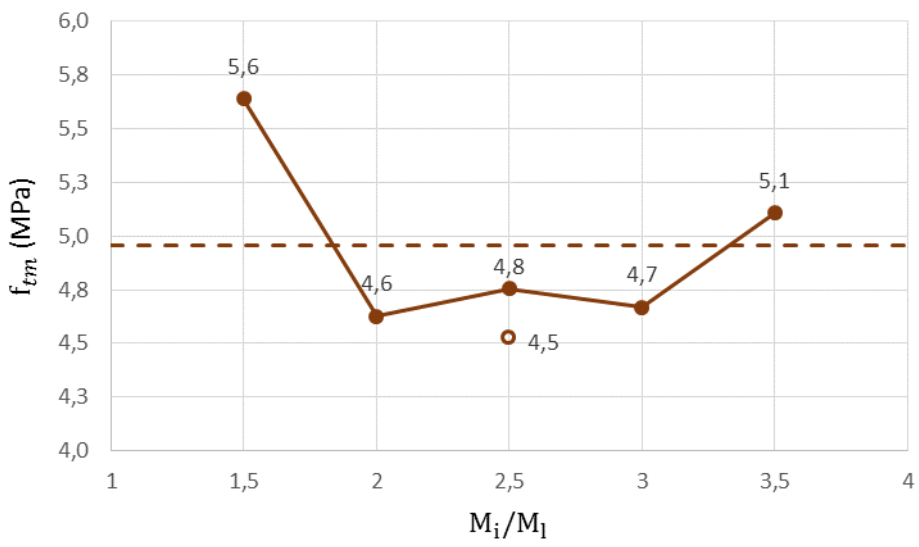


Figura 4.3- Tensões de rotura à tração por flexão. Parâmetro M_i/M_l.

Com a leitura do gráfico, verifica-se que não há linearidade nos resultados obtidos, com uma variação máxima de 1,0MPa. Tendo em consideração o facto empírico segundo o qual, uma maior quantidade de ligante conduz a maior resistência do provete, o resultado determinado pela mistura $M_i/M_l = 3{,}5$ é de todo inesperado. Neste contexto, a interpretação dos resultados não permite retirar conclusões definitivas. De qualquer modo, interessa realçar que a variação máxima de ftm vale 1MPa, ou seja, cerca de 20% do valor médio global, o que significa uma reduzida variabilidade de f_{tm} relativamente ao quociente M_i/M_l. Assim, considerados os valores apresentados não é possível concluir acerca das ligações relativas ligante/ligante e ligante/agregado em termos de resistência à tração.

Relativamente aos resultados individuais apurados, interessa referir que para cada mistura o coeficiente de variação oscila entre 3,3% e 7,6% o que indicam pequenas variações dos resultados dentro de cada mistura. Na Tabela 4.7 apresentam-se os respetivos coeficientes de variação.

Tabela 4.7- Coeficientes de variação. Tensões de rotura à tração. Parâmetro M_i/M_l.

Provetes	CV
P3	7,59%
P1	5,69%
B2	5,92%
P2	6,56%
P4	3,30%
B1	4,75%

Importa referir um pequeno aspeto. De facto, à mistura $M_i/M_l = 2,0$ foi involuntariamente adicionado um pouco mais de fase líquida do que o necessário. Na fase do trabalho em que esta mistura (a segunda) foi concebida, o estudo que permitiria definir as quantidades para a realização das misturas encontrava-se na fase inicial.

4.3.2 Resultados dos ensaios de compressão

Posteriormente aos ensaios de tração por flexão, cada provete resulta em duas metades, destinados ao ensaio à compressão. Estas metades são ensaiadas até a rotura de acordo com o procedimento descrito na norma NP EN 12390-3 (2011), tal como é indicado em 3.4.2. O valor da resistência à compressão é determinado pela Equação (3.5) considerando a força máxima suportada pelo provete. Na Figura 4.4 apresentam dois exemplos da rotura atingida pelos provetes ensaiados, as quais, de acordo com a norma mencionada, podem ser consideradas como roturas satisfatórias. Todos os ensaios demoraram mais do que 3 minutos a serem concluídos.

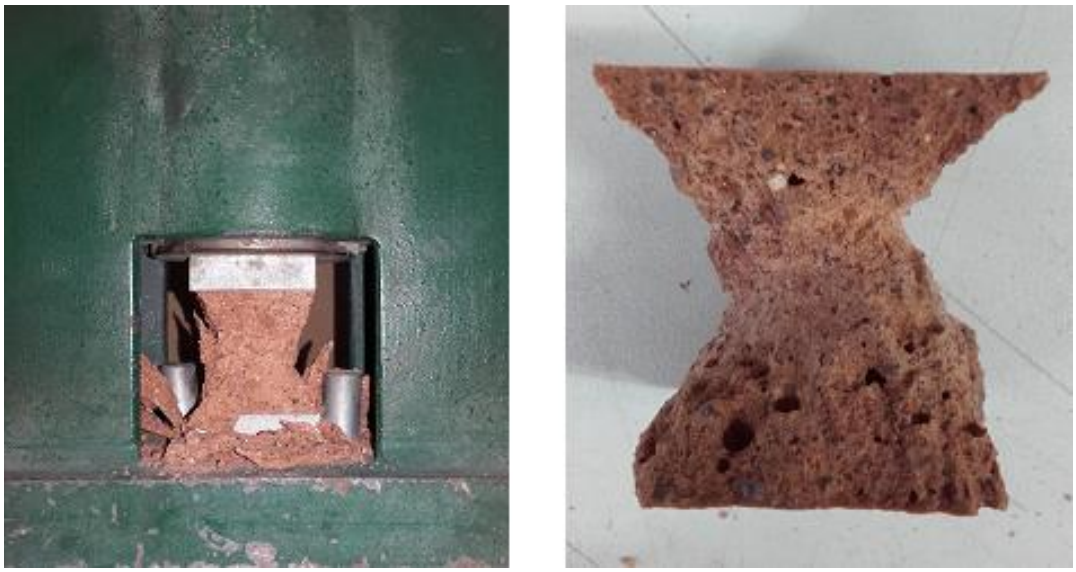


Figura 4.4- Rotura dos provetes no ensaio à compressão.

Na Figura 4.5 são apresentados os valores médios referentes à tensão de rotura por compressão (f_{cm}) de cada relação M_i/M_l realizada.

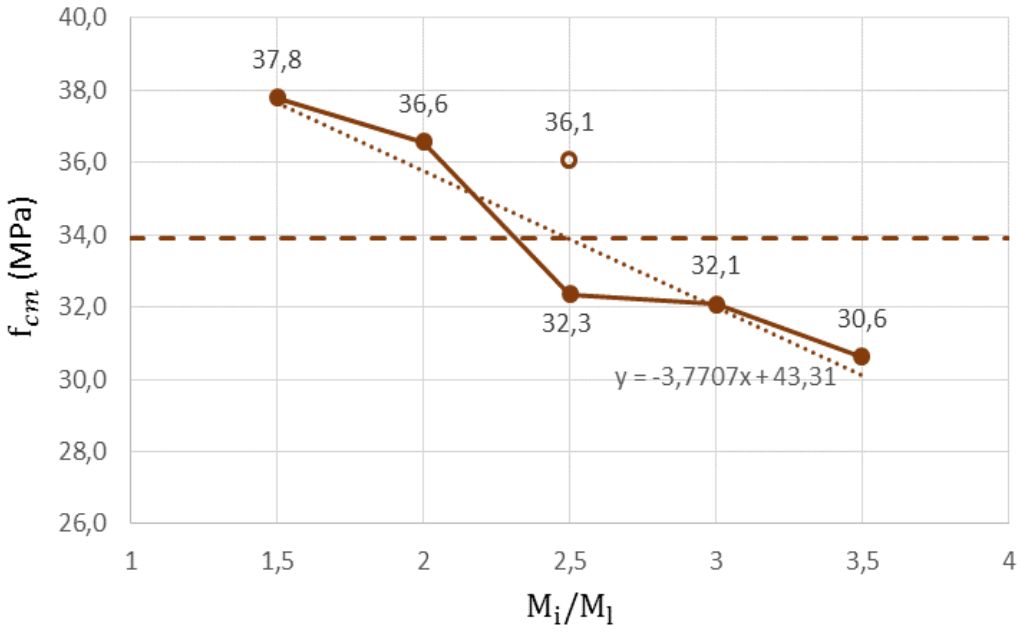


Figura 4.5- Tensões de rotura à compressão. Parâmetro M_i/M_l.

Como é possível observar, existe uma tendência decrescente na resistência à compressão à medida que se aumenta a relação M_i/M_l. Neste caso confirma-se a ideia empírica segundo a qual o aumento da quantidade de ligante conduz a maior resistência da mistura. No entanto, a variação máxima verificada vale cerca de 7,2MPa, equivalente a cerca de pouco mais do que 20% do valor médio global indicado a tracejado. Este valor não é significativo se se considerar que a mistura $M_i/M_l = 1,5$ contêm mais do dobro do ligante relativamente à mistura $M_i/M_l = 3,5$. A linha de tendência dos pontos do gráfico permite ainda concluir que o valor de f_{cm} da mistura de metacaulino puro seria de 43,3MPa, e para além disso, existe um decréscimo de 3,8MPa por unidade de M_i/M_l da mistura.

Relativamente à variabilidade individual dos resultados de cada mistura, o coeficiente de variação oscila entre 3,3% e 7,3%, o que significa que existem pequenas variações dos resultados dentro das misturas. Na Tabela 4.8 apresentam-se os coeficientes de variação e os desvios padrão σ para cada metade de cada mistura, em que 1 corresponde à metade maior do provete e 2 à metade menor.

Tabela 4.8- Coeficientes de variação e desvios padrão. Tensões de compressão. Parâmetro M_i/M_l.

Provetes	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	cv_1	cv_2
P3	1,53	2,84	4,18%	7,26%
P1	2,11	2,06	5,82%	5,58%
B2	1,62	2,41	5,10%	7,33%
P2	2,05	1,73	6,53%	5,26%
P4	2,01	1,00	6,58%	3,25%
B1	2,43	1,66	6,81%	4,53%

Com base na tabela 3.5 do ACI (The United States of America, 1980), é possível avaliar a qualidade dos resultados obtidos referentes aos ensaios de compressão do betão, através dos valores do desvio padrão de cada mistura. Segundo a referida norma, o desvio padrão deve reduzir-se, ou seja, as resistências devem manter-se inalteradas entre provetes, principalmente para resistências acima de 20,7MPa. Na referida tabela, apresenta-se a variabilidade admissível na execução dos ensaios à compressão em projetos sujeitos a diferentes graus de controlo. Na Tabela 4.9 apresentam-se os intervalos admissíveis para os valores do desvio padrão e a correspondente classificação. Relativamente aos resultados obtidos, apresenta-se na última coluna da Tabela 4.9 as percentagens apuradas. Como é possível observar, os resultados de desvio padrão apurados na Tabela 4.8 encontram-se maioritariamente na categoria de muito bom e bom, os quais garantem a qualidade dos provetes produzidos e ensaiados.

Tabela 4.9- Classificação dos resultados experimentais. Ensaio de compressão. Parâmetro M_i/M_l.

Intervalos [MPa]	Classificação	Percentagem de resultados
≤ 1,38	Excelente	8,8%
1,38 - 1,73	Muito Bom	33,8%
1,73 - 2,07	Bom	25,0%
2,07 - 2,41	Razoável	17,6%
≥ 2,41	Fraco	14,7%

4.4 Brita tipo calcário

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos dos provetes cujo parâmetro de influência consiste no tipo de agregados de brita tipo calcário adicionados à mistura sobretudo

o diâmetro máximo. Como já foi mencionado no ponto (3.4.2), a partir da mistura base inicialmente definida, alterou-se a quantidade e o tipo de agregados constituintes, aumentando-se nomeadamente o diâmetro máximo dos agregados de mistura para mistura. A percentagem de adição de cada dimensão de agregado foi definida com fundamento na curva de Faury (Coutinho, 1973), aproximando, o melhor possível, a curva de cada mistura à curva otimizada.

Na Tabela 4.10 apresentam-se as datas de realização das misturas compostas por brita calcária, bem como a desmoldagem e a execução dos ensaios de resistência dos provetes. Os resultados determinados pelas misturas serão comparados com os da mistura base (*B2*). Os provetes designados por *C1, C2* e *C3* correspondem respetivamente aos provetes com brita de diâmetro máximo de 2,0mm, 4,75mm e de 6,30mm, respetivamente.

Tabela 4.10- Cura dos provetes. Parâmetro brita calcária.

Provetes	$\emptyset_{máximo}$	Mistura	Desmoldagem	Ensaio	Cura [dias]
C1	*2mm*	14/out	17/out	31/out	17
C2	*4,75mm*	18/out	20/out	04/nov	17
C3	*6,30mm*	27/out	31/out	14/nov	18

Tal como anteriormente, também para os provetes de parâmetro brita calcária foram registadas as dimensões de cada provete. Nas Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam-se os valores médios e os respetivos coeficientes de variação das dimensões de cada mistura, a massa dos provetes logo após a desmoldagem (M_H) e imediatamente antes da realização dos ensaios (M_S). São também apresentados os desvios correspondentes às massas inicial e final e a baridade final (δ).

Tabela 4.11- Dimensões médias. Parâmetro brita calcária.

Provetes	$\emptyset_{máximo}$	b [mm]	h [mm]	M_H [g]	M_S [g]	Desvio	δ [kg/m³]
C1	2mm	40,4	40,0	566	565	0,16%	2186
C2	4,75mm	40,8	40,1	575	574	0,26%	2195
C3	6,30mm	40,7	40,1	581	579	0,27%	2221
B2	-	40,6	40,1	542	541	0,16%	2081

Tabela 4.12- Coeficientes de variação das dimensões médias. Parâmetro brita calcária.

Provetes	$\emptyset_{máximo}$	b [mm]	h [mm]	M_H [g]	M_S [g]	δ [kg/m³]
C1	2mm	0,51%	0,00%	0,66%	0,65%	0,60%
C2	4,75mm	0,62%	0,12%	0,79%	0,76%	0,45%
C3	6,30mm	0,87%	0,12%	0,82%	0,82%	0,32%
B2	-	0,93%	0,12%	0,63%	0,65%	0,49%

É possível verificar que estas misturas com adição de brita calcária têm coeficientes de variação muito baixos, inferiores a 1%, o que garante a qualidade dos provetes realizados.

Relativamente à baridade destes provetes, cujo valor médio apurado vale cerca de 2201 kg/m^3, observou-se um aumento de cerca de 5,4% do valor médio (a tracejado) em relação aos provetes referentes ao parâmetro M_i/M_l. Para além disso, verifica-se ainda um ligeiro aumento na baridade em sequência do aumento do diâmetro máximo da granulometria. Na Figura 4.6 apresentam-se as baridades médias de cada mistura relativamente ao parâmetro brita calcária. A mistura base *B2* está representada por um ponto vazio.

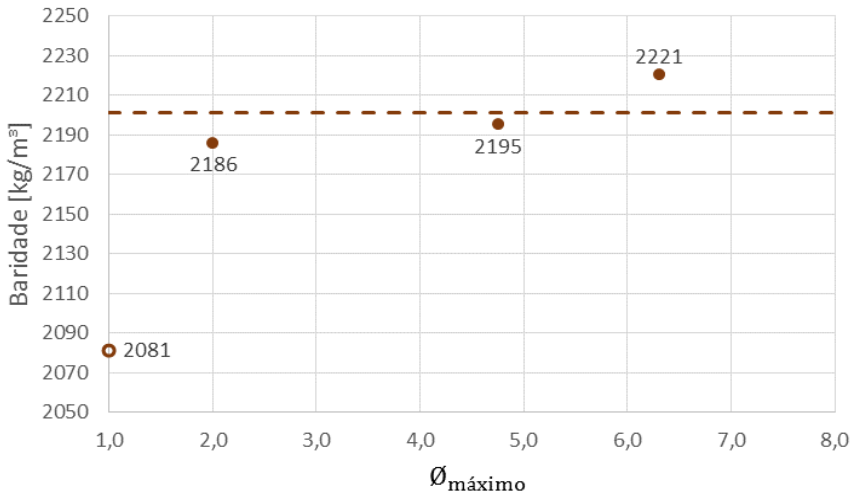


Figura 4.6- Baridade dos provetes. Parâmetro brita calcária.

Tal como foi referido anteriormente, devido às irregularidades das superfícies superiores dos provetes, foi descontado um máximo de 2,0mm na dimensão b de cada provete. No que diz respeito às misturas, referentes ao parâmetro brita calcária, existe uma variabilidade máxima de cerca de 1,6%.

4.4.1 Resultados dos ensaios de tração por flexão

No presente ponto apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por flexão, para as misturas relativas ao parâmetro brita calcária, de acordo com a norma NP EN 12390-5 (2009), cujo procedimento se encontra explicado no ponto 3.4.1.

No decorrer dos ensaios de tração por flexão, verificou-se a ocorrência de alguma segregação das britas nos provetes de agregados de diâmetro máximo de 6,30mm, o qual pode ter ocorrido devido ao excesso de vibração da mistura. O tempo de vibração não foi muito abordado ao longo deste trabalho, adotando-se um intervalo de tempo de vibração de cerca de

um minuto para cada mistura realizada. Esta circunstância pode influenciar os resultados das resistências dos provetes. Os exemplos na Figura 4.7 apresentam a rotura dos provetes de agregado de diâmetro máximo de 2,0mm (à esquerda) e 6,30mm (à direita). É possível observar alguma segregação no provete de diâmetro máximo 6,30mm.

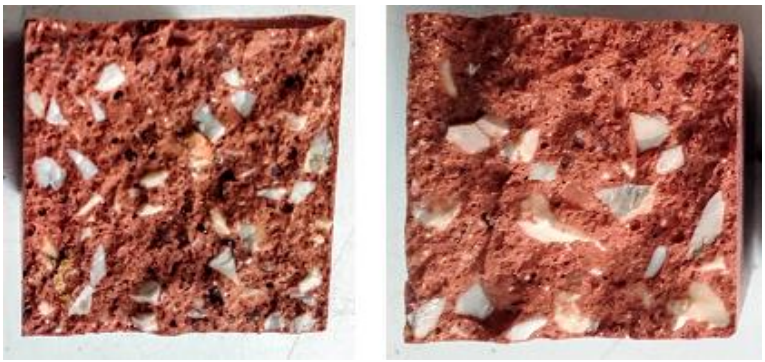


Figura 4.7- Secções de rotura de tração por flexão. Provetes com agregados de diâmetro máximo de 2,0mm e de diâmetro máximo de 6,30mm.

A Figura 4.8 indica os resultados médios das tensões de rotura à tração por flexão para cada mistura de adição de agregados de granulometrias diferentes. Fez-se referência ao resultado da mistura base B2 ($Ø_{máximo}=1mm$) com o intuito de comparar os resultados. O traço descontínuo representa o valor médio global das misturas de parâmetro brita calcária.

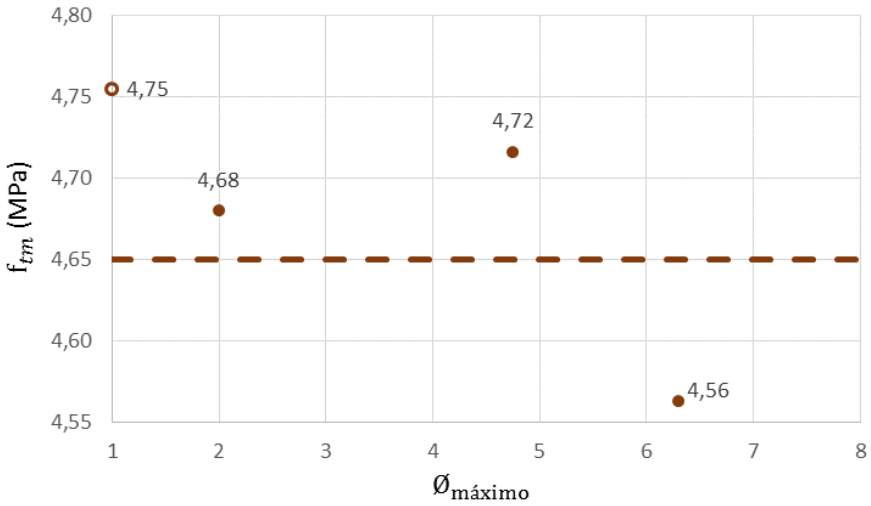


Figura 4.8- Tensões de rotura à tração por flexão. Parâmetro brita calcária.

Tal como ocorreu nos resultados relativos ao quociente M_i/M_l, não é possível visualizar uma tendência nos resultados. Porventura poder-se-á concluir pela não influência deste parâmetro na avaliação da tensão de rotura à tração por flexão. De facto, a variação destes resultados é

reduzida, com uma variação máxima de 0,15MPa entre os valores das misturas de brita calcária, a qual representa apenas 3,3% do valor médio global, o que indica uma reduzida variabilidade. Comparando com a mistura base *B2*, existe uma variação máxima de 0,19MPa, correspondendo a decréscimo de 4%, que por sua vez também é insignificante. De recordar que as estimativas para a largura b dos provetes podem oscilar cerca de 2,5%.

Na Tabela 4.13 apresentam-se os coeficientes de variação dos resultados individuais relativos às tensões de rotura à tração por flexão, de cada mistura com adição de brita calcária. As reduzidas variabilidades entre 3,1% e 9,1% garantem a fiabilidade dos resultados. É de evidenciar um ponto consideravelmente importante, na realização das misturas. Tal como se pode constatar na Tabela 4.3, a adição das britas conduziu a uma redução de fase líquida relativamente à mistura base *B2*, ou por outras palavras, a mistura de areia e do ligante não perdia trabalhabilidade aquando da adição das britas.

Tabela 4.13- Coeficientes de variação. Tensão de rotura à tração. Parâmetro brita calcária.

Provetes	CV
C1	3,10%
C2	8,51%
C3	9,07%
B2	5,92%

4.4.2 Resultados dos ensaios de compressão

De acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011), procedeu-se à realização dos ensaios de resistência à compressão, descrito no ponto 3.4.2. Na Figura 4.9 apresentam-se dois exemplos de roturas dos provetes após o ensaio de resistência à compressão. Estas roturas são consideradas satisfatórias, segundo descrito na referida norma.

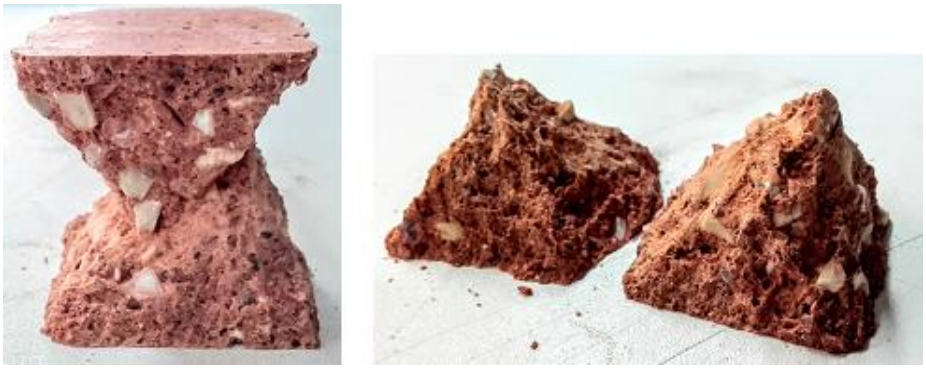


Figura 4.9- Rotura dos provetes no ensaio à compressão. Parâmetro brita calcária.

Na Figura 4.10 apresentam-se os valores médios da tensão de rotura à compressão de cada mistura referente ao parâmetro brita calcária. Tal como anteriormente, indica-se também o resultado obtido para a mistura base *B2* ($Ø_{máximo}=1mm$).

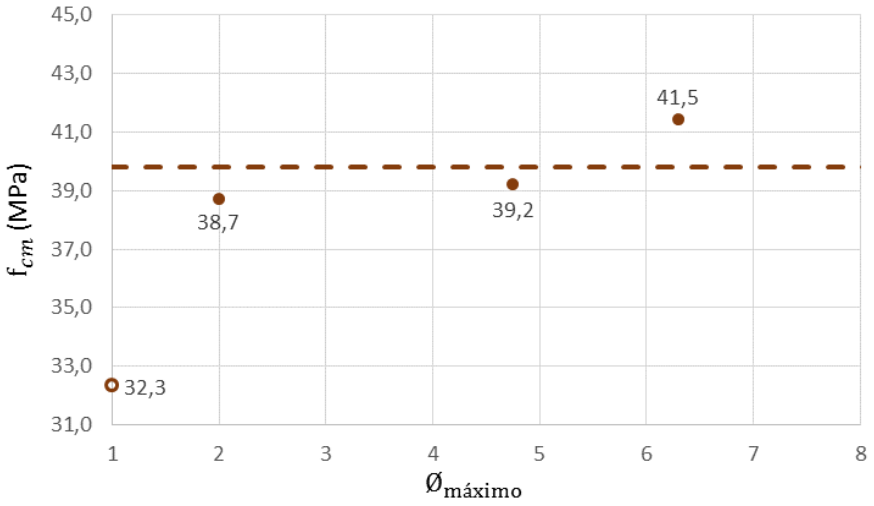


Figura 4.10- Tensões de rotura à compressão. Parâmetro brita calcária.

É possível verificar na figura anterior uma tendência crescente na resistência à compressão à medida que o diâmetro máximo do agregado aumenta. O acréscimo é mais significativo se comparado com a tensão de rotura da mistura base. A variação máxima entre provetes correspondentes às misturas com alteração das britas vale cerca de 2,8MPa, a qual corresponde a cerca de 7% do valor médio global indicado a traço descontínuo. Relativamente à mistura base *B2*, a variação máxima é de 9,1MPa, correspondendo a um aumento de 28%, o que já é significativo.

Tendo em consideração os resultados individuais das tensões de resistência por compressão de cada metade do provete, são apresentados os coeficientes de variação e os respetivos desvios padrão na Tabela 4.14. Os coeficientes de variação relativos aos provetes construídos com britas calcárias são inferiores ao valor máximo apurado para os provetes da mistura base *B2*, que já foi considerado como reduzido.

Tabela 4.14- Coeficientes de variação e desvios padrão. Tensão de compressão. Parâmetro brita calcária.

Provetes	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	CV_1	CV_2
C1	1,96	0,90	5,16%	2,28%
C2	1,42	0,85	3,60%	2,18%
C3	1,48	1,05	3,67%	2,46%
B2	1,62	2,41	5,10%	7,33%

Na Tabela 4.15 apresentam-se os intervalos de valores, a classificação e a percentagem de resultados apurados, de acordo com a norma ACI. A esmagadora maioria de resultados encontra-se entre a classificação de excelente e muito bom, o que garante a qualidade dos provetes construídos.

Tabela 4.15- Classificação dos resultados experimentais. Ensaio de compressão. Parâmetro brita calcária.

Intervalos [MPa]	Classificação	Percentagem de resultados
≤ 1,38	Excelente	35,6%
1,38 - 1,73	Muito Bom	26,7%
1,73 - 2,07	Bom	24,4%
2,07 - 2,41	Razoável	0,0%
≥ 2,41	Fraco	13,3%

4.5 Brita tipo granito

O presente subcapítulo refere-se aos resultados obtidos pela substituição de parte dos agregados da mistura base por agregados graníticos de diferentes dimensões, como é descrito no ponto 3.2.2. O procedimento efetuado para a realização dos provetes constituídos por brita granítica, foi idêntico ao usado para a composição dos provetes de brita calcária. Procedeu-se de um modo idêntico relativamente à execução dos ensaios de resistência.

São apresentadas na Tabela 4.16, as datas da realização das misturas, da desmoldagem dos provetes e da realização dos ensaios de resistência. Os provetes denominados por *G1*, *G2* e *G3* correspondem às misturas constituídas pela granulometria de diâmetro máximo de 2,0mm, 4,75mm e 6,30mm, respetivamente.

Tabela 4.16- Cura dos provetes. Parâmetro brita granítica.

Provetes	$\emptyset_{\text{máximo}}$	Mistura	Desmoldagem	Ensaio	Cura [dias]
G1	*2mm*	07/nov	09/nov	23/nov	16
G2	*4,75mm*	09/nov	11/nov	25/nov	16
G3	*6,30mm*	11/nov	14/nov	29/nov	18

Seguidamente foi feito o levantamento das dimensões de cada provete, após a desmoldagem, com a finalidade de obter o volume total de cada mistura. Registou-se também a massa de cada provete imediatamente após a desmoldagem e antes da execução dos ensaios de

resistência. Nas Tabelas 4.17 e 4.18 são apresentados os valores médios e os coeficientes de variação das respetivas medidas, juntamente com o desvio entre as massas e a baridade final de cada mistura.

Tabela 4.17- Dimensões médias. Parâmetro brita granítica.

Provetes	$\emptyset_{\text{máximo}}$	b [mm]	h [mm]	M_H [g]	M_S [g]	Desvio	δ [kg/m³]
G1	2mm	40,8	40,1	563	562	0,18%	2150
G2	4,75mm	41,0	40,0	569	568	0,19%	2166
G3	6,30mm	40,7	40,1	574	573	0,17%	2197
B2	-	40,6	40,1	542	541	0,16%	2081

Tabela 4.18- Coeficientes de variação das dimensões médias. Parâmetro brita granítica.

Provetes	$\emptyset_{\text{máximo}}$	b [mm]	h [mm]	M_H [g]	M_S [g]	δ [kg/m³]
G1	2mm	0,91%	0,12%	0,48%	0,49%	0,56%
G2	4,75mm	1,06%	0,12%	0,87%	0,86%	0,26%
G3	6,30mm	0,69%	0,12%	0,60%	0,58%	0,34%
B2	-	0,93%	0,12%	0,63%	0,65%	0,49%

Considerando as três misturas constituídas por brita granítica, verifica-se um coeficiente de variação inferior a 1%, expecto para a dimensão *b* no caso da mistura com diâmetro máximo de 4,75mm (*G2*), o que não é relevante tendo em conta o exposto anteriormente. Assim, as variações apuradas podem ser consideradas relativamente insignificantes, realçando a credibilidade dos resultados obtidos.

De notar o aumento da massa dos provetes *G1*, *G2* e *G3*, conduzindo a um aumento da sua baridade final comparativamente à mistura base *B2*. Constatou-se um aumento consecutivo da baridade com o diâmetro máximo constituinte da mistura. De modo a facilitar a comparação de valores, apresentam-se na Figura 4.11 os valores médios referentes à baridade das três misturas de granito e da mistura base *B2*.

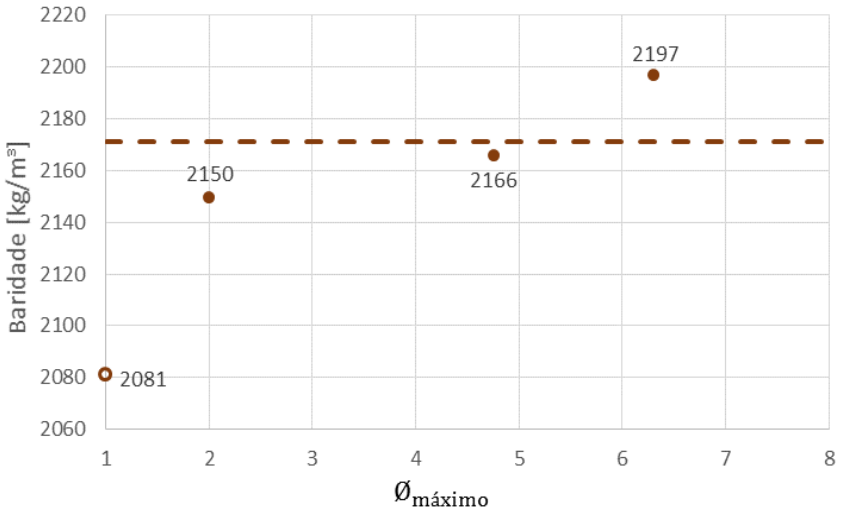


Figura 4.11- Baridade dos provetes. Parâmetro brita granítica.

Verificam-se pequenas variações nos resultados obtidos. A variação máxima é de 2,2% entre os valores correspondentes às misturas graníticas e de 5,3% quando comparado com a baridade média relativa à mistura base. O valor médio global das três misturas com britas graníticas é de 2171 kg/m^3.

4.5.1 Resultados dos ensaios de tração por flexão

Os ensaios de resistência à tração por flexão aos provetes, constituídos por britas graníticas, também foram realizados de acordo com a norma NP ENN 12390-5 (2009). Na Figura 4.12 apresentam-se duas superfícies de rotura dos provetes após a realização dos ensaios de tração por flexão. À esquerda um provete com a brita de 2,0mm diâmetro máximo, e com brita de 6,30mm à direita. Como pode se pode verificar, nestes casos não foram identificados quaisquer anomalias nos provetes.

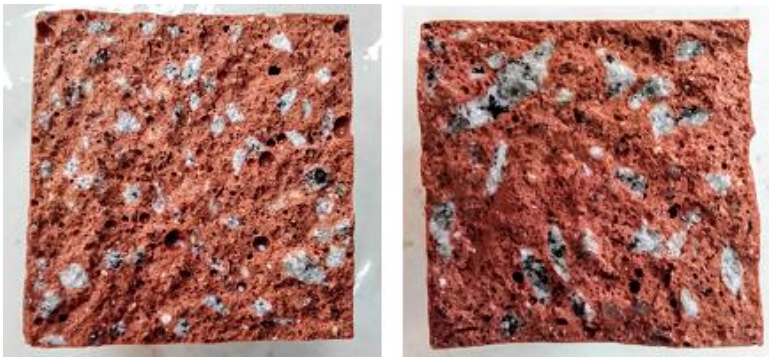


Figura 4.12- Secções de rotura de tração por flexão. Provetes com agregados de diâmetro máximo de 2,0mm, e de diâmetro máximo de 6,30mm.

Na Figura 4.13 apresentam-se os valores médios das tensões de rotura à tração por flexão das misturas relativas à brita granítica, juntamente com a mistura base.

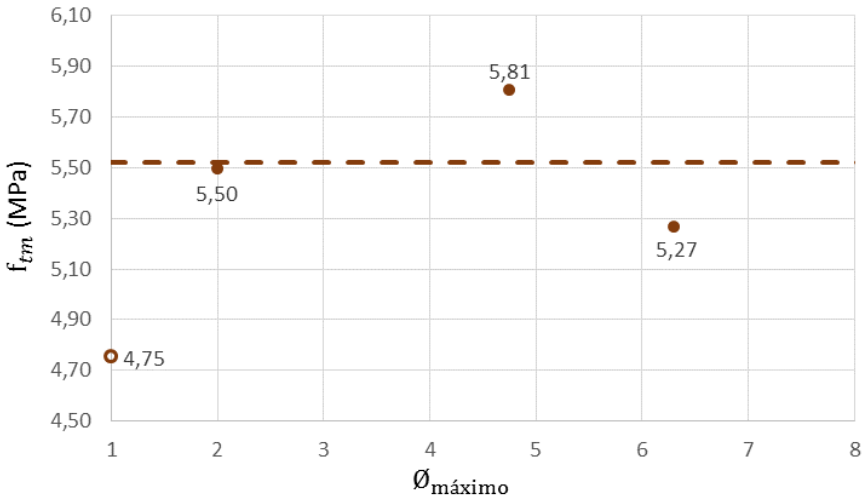


Figura 4.13- Tensões de rotura à tração por flexão. Parâmetro brita granítica.

A variação máxima entre os valores das misturas referentes ao parâmetro brita granítica é de 0,54MPa o que representa cerca de 10% do valor médio global. Não sendo desprezável a referida variação, contudo não está definida uma tendência do valor da tensão de rotura à tração por flexão relativamente ao diâmetro máximo dos agregados de granito. De qualquer modo, é considerável o aumento médio (0,77MPa) dos resultados em relação à mistura base *B2*, o que representa cerca de 14% em relação ao valor médio. Relativamente à mistura base, verifica-se uma variação máxima de 1,05MPa, representando um aumento de aproximadamente 22%.

A Tabela 4.19 apresenta os coeficientes de variação apurados nas misturas com adição de brita granítica. As variações dos valores são desprezáveis.

Tabela 4.19- Coeficientes de variação. Tensões de tração. Parâmetro brita granítica.

Provetes	CV
G1	4,84%
G2	2,89%
G3	4,01%
B2	5,92%

4.5.2 Resultados dos ensaios de compressão

Nos ensaios de resistência à compressão, obteve-se sempre uma rotura satisfatória, de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011), como se pode verificar nos exemplos expostos na Figura 4.14.

Figura 4.14- Rotura dos provetes no ensaio à compressão. Parâmetro brita granítica.

Os valores médios das tensões de rotura por compressão relativos aos provetes *G1*, *G2* e *G3* são apresentados na Figura 4.15. O valor referente à mistura base *B2* ($Ø_{máximo}=1mm$) também é indicado nesta figura. Em primeiro lugar, é possível visualizar um aumento acentuado das capacidades resistentes do conjunto de misturas de brita granítica em relação à mistura base. O aumento máximo que ocorre vale cerca de 11,6MPa, o qual corresponde a um amento de 36% relativamente à mistura base. Por sua vez, entre os resultados obtidos para o conjunto das três misturas com agregados graníticos, existe uma variação máxima de 2,2MPa, que por sua vez representa cerca de 5,2% do valor médio global (43,1MPa). Constata-se ainda um aumento gradual do valor da tensão de rotura à compressão com o diâmetro máximo das misturas entre o conjunto de misturas com brita granítica.

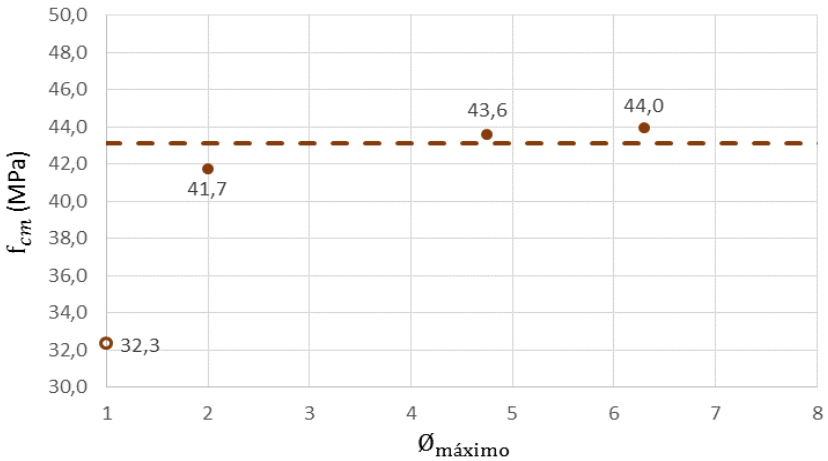


Figura 4.15- Tensões de rotura à compressão. Parâmetro brita granítica.

No sentido de certificar a qualidade dos provetes construídos, avaliaram-se os resultados globais de cada mistura através do coeficiente de variação e o seu desvio padrão, descritos na Tabela 4.20. Estes coeficientes variam entre 2% e 6,8%, o que pode ser interpretado como sendo uma variação reduzida.

Tabela 4.20- Coeficientes de variação e desvios padrão. Parâmetro brita granítica.

Provetes	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	CV_1	CV_2
G1	2,08	2,86	5,04%	6,78%
G2	0,88	1,51	2,03%	3,44%
G3	2,01	1,47	4,58%	3,33%
B2	1,62	2,41	5,10%	7,33%

Também se avaliou o desvio padrão obtido pelas misturas com base na norma ACI, tal como é exposto na Tabela 4.21. Visto que a maioria dos resultados se encontra nas designações de excelente e de muito bom, garante-se a fiabilidade dos provetes realizados.

Tabela 4.21- Classificação dos resultados experimentais relativos ao ensaio de compressão. Parâmetro brita granítica.

Intervalos [MPa]	Classificação	Percentagem de resultados
≤ 1,38	Excelente	12,5%
1,38 - 1,73	Muito Bom	37,5%
1,73 - 2,07	Bom	12,5%
2,07 - 2,41	Razoável	12,5%
≥ 2,41	Fraco	25,0%

4.6 Variação da composição do ativador

Foram realizadas novas misturas com base nas misturas de variação de metacaulino (parâmetro M_i/M_l), nas quais se procurou aferir eventuais alterações das capacidades resistentes por alteração da composição do ativador. Assim repetiram-se as misturas $M_i/M_l=1,5$ e $M_i/M_l=3,5$, considerando agora uma composição do ativador, de hidróxido de sódio e silicato de sódio, na proporção de 1:1, respetivamente. Na Tabela 4.22 apresentam as datas de realização das misturas referentes ao parâmetro ativador, juntamente com as datas de desmoldagem e de realização dos respetivos ensaios.

Tabela 4.22- Cura dos provetes. Parâmetro ativador.

Provetes	M_i/M_l	Mistura	Desmoldagem	Ensaio	Cura [dias]
R1	*1,5*	14/nov	16/nov	30/nov	16
R2	*3,5*	16/nov	18/nov	02/dez	16

As Tabelas 4.23 e 4.24 dizem respeito aos valores médios e aos respetivos coeficientes de variação das dimensões dos provetes relativos às misturas realizadas. Também apresentam-se os resultados obtidos para as misturas *P3* e *P4*, correspondentes às misturas $M_i/M_l=1,5$ e $M_i/M_l=3,5$, respetivamente, com o intuito de comparação. De recordar que para estas misturas foi utilizada uma composição do ativador nas proporções de 1:2, de hidróxido de sódio e de silicato de sódio, respetivamente.

Tabela 4.23- Dimensões médias. Parâmetro ativador.

Provetes	M_i/M_l	b [mm]	h [mm]	M_H [g]	M_S [g]	Desvio	δ [kg/m³]
R1	1,5	40,9	40,1	539	538	0,20%	2055
R2	3,5	40,8	40,1	550	549	0,18%	2101
P3	1,5	40,4	40,0	541	540	0,13%	2088
P4	3,5	40,4	40,0	546	545	0,16%	2106

Tabela 4.24- Coeficientes de variação das dimensões médias. Parâmetro ativador.

Provetes	M_i/M_l	b [mm]	h [mm]	M_H [g]	M_S [g]	δ [kg/m³]
R1	1,5	1,25%	0,12%	1,35%	1,37%	0,31%
R2	3,5	0,95%	0,12%	1,08%	1,07%	0,18%
P3	1,5	0,73%	0,10%	0,70%	0,69%	0,36%
P4	3,5	0,68%	0,12%	0,71%	0,72%	0,27%

Como se pode verificar, a variação máxima dos valores referentes ao parâmetro ativador é inferior a 1,4%, aumentando ligeiramente quando comparado com as misturas anteriores. Relativamente à baridade, ocorre um ligeiro decréscimo.

4.6.1 Resultados dos ensaios de tração por flexão

Os valores médios das tensões resistentes à tração por flexão, de acordo com a norma NP EN 12390-5 (2009), são indicados na Figura 4.16 nos marcadores a cheio. De modo a comparar, também são indicados os valores obtidos para as misturas de parâmetro M_i/M_l, representados por marcadores com interior vazio.

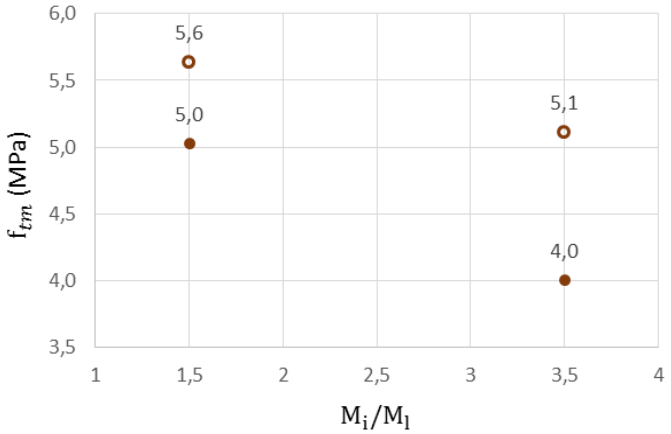


Figura 4.16- Tensões de rotura à tração por flexão. Parâmetro ativador.

Relativamente às misturas de parâmetro ativador, verifica-se um decréscimo nos valores da resistência à tração quando se utiliza uma composição do ativador em partes iguais. Relativamente aos valores da mistura $M_i/M_l=1,5$, ocorre um decréscimo de 0,6MPa, representando uma diminuição de 11%, o que não é significante. Em relação à mistura $M_i/M_l=3,5$, a redução da tensão é de 1,1MPa correspondendo a uma diminuição de 22%, o que já é considerável.

4.6.2 Resultados dos ensaios de compressão

Os valores médios das tensões de rotura à compressão, de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011), são indicados na Figura 4.17. Tal como nas tensões relativas aos ensaios de tração, ocorre uma diminuição das caraterísticas resistentes. Na mistura $M_i/M_l=1,5$, verifica-se uma diminuição de 5,5MPa o que corresponde a um decréscimo de cerca de 15%. Em relação à mistura de $M_i/M_l=3,5$, o decréscimo é de 7,5MPa, o que equivale a 25% de diminuição. Tal como anteriormente, estas reduções são consideráveis.

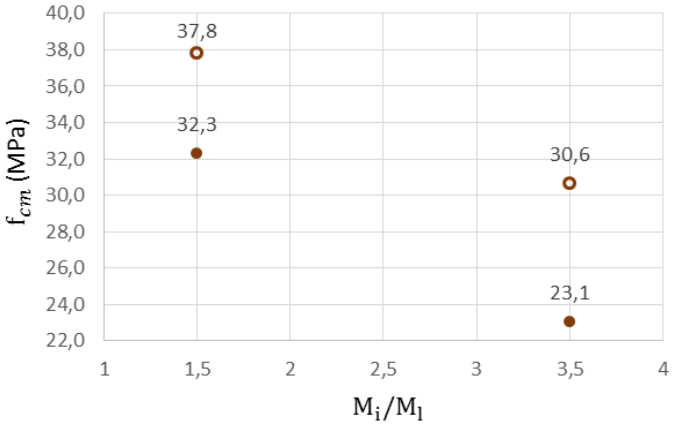


Figura 4.17- Tensões de rotura à compressão. Parâmetro ativador.

5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

5.1 Considerações gerais

No presente capítulo pretende-se comparar os resultados obtidos ao longo deste trabalho com outros resultados retirados em trabalhos realizados anteriormente na área dos geopolímeros. Tal como referido no Capítulo 2, Guerra (2015) também se debruçou sobre esta temática, tendo na altura deixado algumas dúvidas nos resultados obtidos. Neste contexto, pretende-se confrontar as principais caraterísticas mecânicas das misturas em função dos parâmetros de influência relativos à variação de ligante, à adição de britas e à variação do ativador.

5.2 Resistência à tração por flexão

No que diz respeito ao quociente entre a massa de agregado relativamente à massa do ligante da mistura M_i/M_l, apresentam-se na Figura 5.1 os resultados dos valores médios da resistência à tração por flexão avaliados neste trabalho e por Guerra (2015). No domínio em que as misturas são mais ricas na quantidade de ligante, ou seja, quando M_i/M_l assume os menores valores, verificam-se algumas irregularidades nos valores obtidos em ambos os trabalhos. Esta oscilação, no intervalo de 4,63MPa e 5,64MPa, correspondendo a uma variação de cerca de 1MPa, i.e. cerca de 20% do valor médio, o que é significativo. Para além disso, é possível descortinar alguma tendência para valores crescentes do valor médio da resistência à tração por flexão à medida que a quantidade de ligante diminui. Esta conclusão, não sendo evidente de todo, não pode deixar de parecer ilógica.

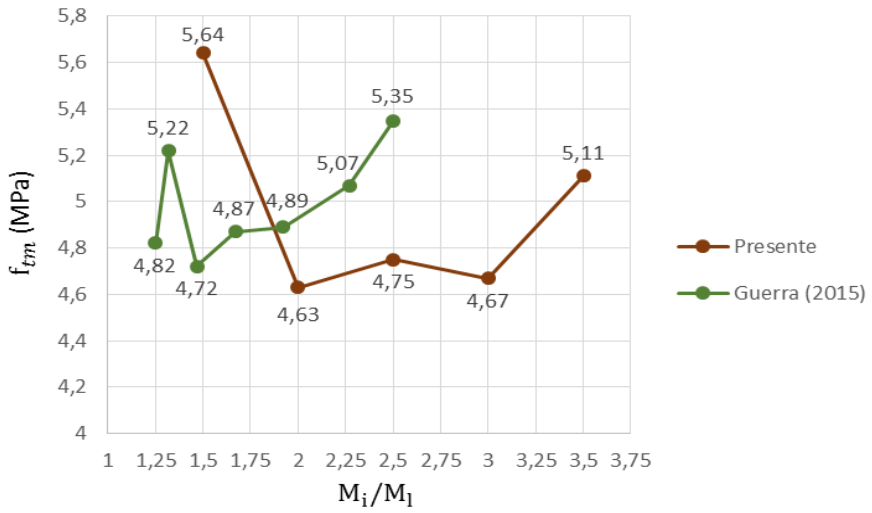


Figura 5.1- Resistência à tração por flexão. Parâmetro M_i/M_l.

Na Figura 5.2 são confrontados os valores médios da resistência à tração por flexão relativamente ao tipo de brita utilizada. Os resultados determinados por Guerra (2015) para agregados de calcário encontram-se a cor verde, a cor castanha os resultados apurados para as misturas com brita calcária, e a cor cinza os resultados apurados para as misturas com brita granítica. A primeira evidência diz respeito à oscilação de valores resistentes avaliada por Guerra (2015), que no presente trabalho não existiu. De facto, verifica-se que os valores médios da resistência à tração se mantém inalterados independentemente do diâmetro máximo da mistura. Para além disso, é possível concluir que as misturas constituídas pela brita granítica alcançam melhores resultados relativamente às misturas com brita calcária, cerca de mais 19%.

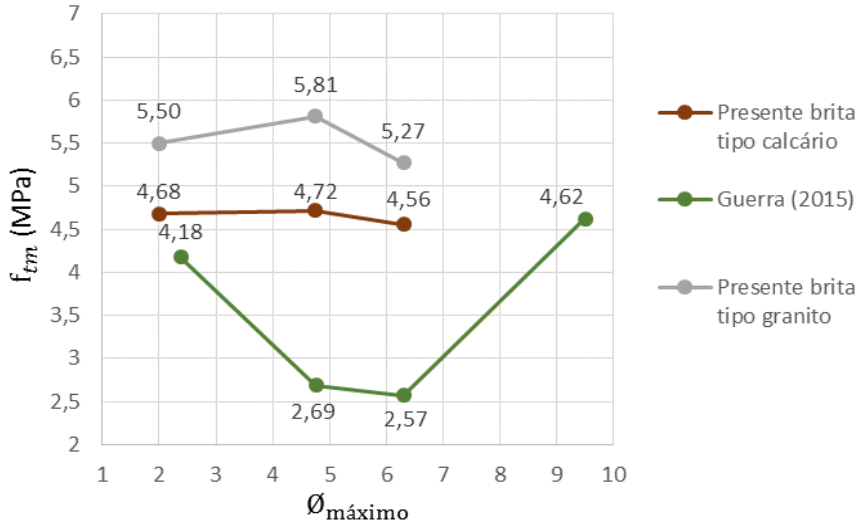


Figura 5.2- Resistência à tração por flexão. Brita tipo calcário e brita tipo granito.

Relativamente às misturas onde se fez variar o traço do ativador, são comparados, na Figura 5.3, os resultados obtidos ao longo deste trabalho com o trabalho de Oliveira (2014). Observou-se que tanto nas misturas onde $M_i/M_l=1,5$, como nas de $M_i/M_l=3,5$, com o aumento da relação hidróxido/silicato, aumenta a resistência à tração por flexão dos provetes. Nas misturas realizadas por Oliveira (2014), os valores mantêm-se aproximadamente constantes, embora importe referir que as suas misturas contêm mais ativador composto. Conclui-se que a mistura com maior quantidade de ligante, juntamente com a relação do composto de ativador de 1:2, e com uma fase líquida que garanta uma boa trabalhabilidade, determina melhores resultados ao nível da resistência à tração por flexão.

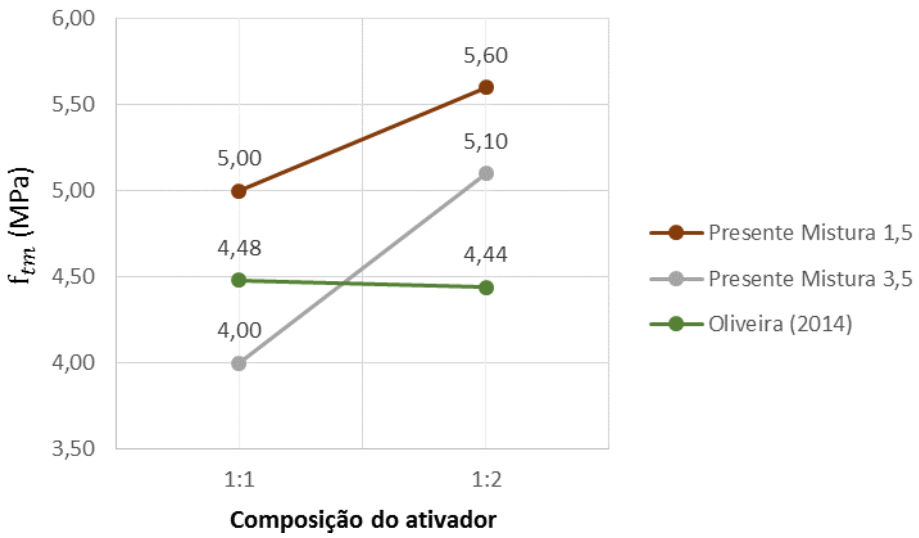


Figura 5.3- Resistência à tração por flexão. Composição do ativador.

5.3 Resistência à compressão

Relativamente ao valor médio da tensão resistente à compressão em função do parâmetro M_i/M_l, apresentam-se na Figura 5.4, os resultados apurados neste trabalho e por Guerra (2015). Globalmente, verifica-se uma tendência decrescente dos valores da resistência à compressão com a redução da quantidade de ligante nas misturas, tal como seria de esperar. Neste gráfico ficam claras as dúvidas levantadas perante os resultados determinados no trabalho de Guerra (2015). De facto, a oscilação encontrada nos valores das misturas com maior quantidade de ligante não é de todo compreensível. Resumidamente, é possível concluir que a resistência à compressão dos geopolímeros diminui cerca de 15% quando se reduz a quantidade de ligante para metade na mistura.

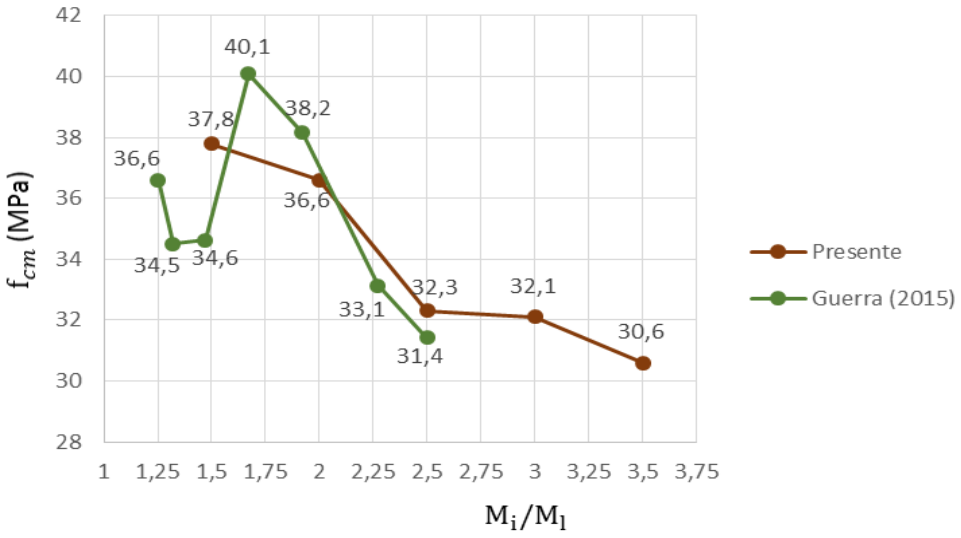


Figura 5.4- Resistência à compressão. Parâmetro M_i/M_l.

Relativamente ao tipo de brita calcária e tipo de brita granítica adicionadas à mistura, os resultados dos valores médios da resistência à compressão apurados neste trabalho e por Guerra (2015) são apresentados, na Figura 5.5. As conclusões são idênticas às retiradas no caso da tração: em primeiro lugar, verifica-se um aumento de resistência com o aumento do diâmetro máximo das misturas realizadas ao longo do presente trabalho; em segundo lugar, os resultados determinados pelas misturas realizadas por Guerra (2015) apresentam uma oscilação cujas justificações não foram encontradas; em terceiro lugar, conclui-se que as misturas de brita granítica conduzem a melhores resultados em termos de resistência à compressão do que os da brita calcária.

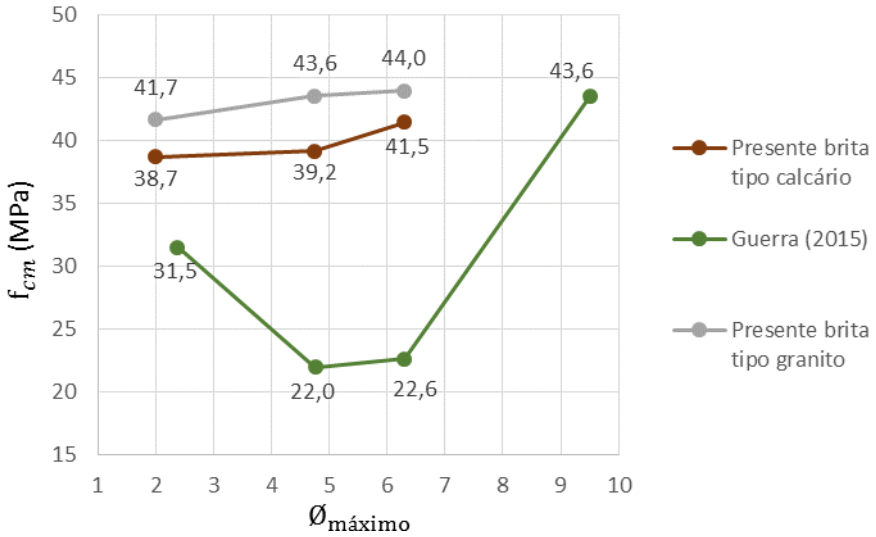


Figura 5.5- Resistência à compressão. Brita tipo calcário e brita tipo granito.

Em relação ao parâmetro composição do ativador, na Figura 5.6 apresentam-se as resistências à compressão das misturas $M_i/M_l=1,5$ e $M_i/M_l=3,5$, realizadas ao longo do presente trabalho, juntamente com as misturas efetuadas por Oliveira (2014). Neste caso, verifica-se um aumento considerável da resistência à compressão em todas as misturas com o aumento da relação de hidróxido/silicato, concluindo-se também que o traço 1:2 determina os melhores resultados de resistência.

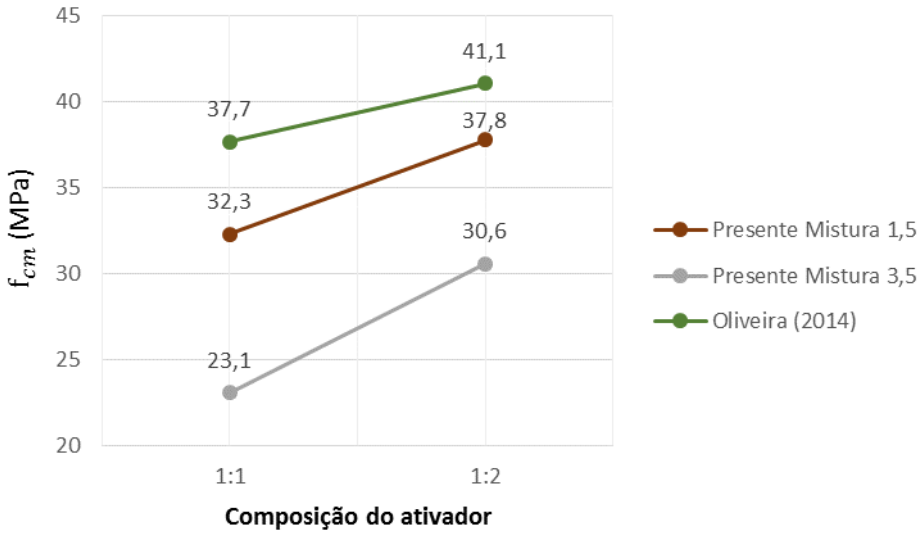


Figura 5.6- Resistência à compressão. Composição do ativador.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

A presente dissertação teve como principal objetivo avaliar as propriedades mecânicas de misturas geopoliméricas, nomeadamente a resistência à tração por flexão e a resistência à compressão. Nas primeiras misturas realizadas fez-se variar o quociente entre as massas de ligante M_l e de areia M_i nas misturas, tendo-se construído misturas onde M_i/M_l foi 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 e 3,5. Nas misturas seguintes, adicionou-se brita tipo calcário e brita tipo granito à mistura base ($M_i/M_l=2,5$), variando a sua granulometria e obtendo assim os diâmetros máximos do agregado de 2,0mm, 4,75mm e 6,30mm. Por fim, realizaram-se misturas variando a composição do ativador composto, realizando os traços de hidróxido/silicato de 1:1 e 1:2.

Para além dos resultados apresentados, no Capítulo 5 foram ainda confrontados com os resultados obtidos em trabalhos realizados por Guerra (2015) e Oliveira (2014), conferindo o potencial de adquirir conclusões mais gerais acerca das misturas geopoliméricas.

Seguidamente são resumidas, as principais conclusões obtidas na realização do presente trabalho.

Relativamente aos ensaios de resistência à tração por flexão, obtiveram-se pequenas variações em todos as misturas realizadas. No que diz respeito às misturas de variação de ligante, a mistura $M_i/M_l=1,5$ foi a que alcançou melhores resultados, sendo cerca de 19% superior à mistura base. No entanto, nem sempre foi possível determinar resultados que estivessem de acordo com o esperado, ou seja, melhor resistência à medida que a quantidade de ligante da mistura aumenta. Nas misturas de variação de agregado, verificaram-se valores de tensão de rotura 19% superiores nas misturas compostas por brita tipo granito em relação às misturas de brita tipo calcário, superando a mistura base em média cerca de 16%. Em relação às misturas de variação da composição do ativador, observou-se um aumento da resistência à tração das misturas ao traço 1:1 para o traço 1:2; 12% para as misturas de $M_i/M_l=1,5$ e finalmente 28% para as misturas de $M_i/M_l=3,5$.

No que diz respeito aos ensaios de resistência à compressão foi possível determinar resultados lógicos, de acordo com a quantidade de ligante. A questão prende-se com o grau de crescimento dessa resistência relativamente à quantidade relativa de ligante na mistura. De facto, verificou-se um aumento contínuo da tensão de rotura dos provetes com o aumento da proporção do ligante, obtendo-se um acréscimo de cerca de 24% entre as relações de $M_i/M_l=3,5$ e $M_i/M_l=1,5$. Mais uma vez, foram observados melhores resultados nas misturas de brita tipo granito do que nas de brita tipo calcário, verificando um aumento de 8% entre os dois tipos de britas. Existiu também uma tendência crescente entre estas misturas, dado que à medida que o diâmetro máximo nas misturas aumenta, aumenta também a tensão de rotura. A variação entre as misturas de brita tipo calcário foi de 7%, e de aproximadamente 6% para as brita tipo granito. Relativamente às misturas de variação da composição do ativador, verificou-se um aumento nas misturas referentes ao traço 1:2 face às misturas de 1:1, sendo este de cerca de 17% nas misturas de $M_i/M_l=1,5$ e de sensivelmente 33% nas misturas $M_i/M_l=3,5$.

Concluindo o trabalho, é possível elaborar o seguinte conjunto de conclusões genéricas: Aumentando a quantidade de ligante da mistura, aumentam-se as tensões de rotura dos provetes, embora com taxas inferiores ao conseguido por exemplo ao nível dos betões; O traço 1:2 do ativador composto é mais eficaz em termos resistentes, pelo menos relativamente ao traço 1:1; As propriedades resistentes aumentam com a granulometria dos agregados presentes nas misturas; A brita tipo granito apresenta os melhores resultados em ambas as propriedades mecânicas face à brita tipo calcário.

6.2 Trabalhos futuros

No contexto do presente trabalho, foram levantadas diversas questões que poderão vir a ser analisadas num futuro próximo, dando seguimento às investigações na área dos geopolímeros. Os possíveis temas de continuidade dos geopolímeros são:

- Considerar outros aditivos, como por exemplo plastificantes, com o intuito de aumentar a trabalhabilidade ou a plasticidade da pasta, reduzindo simultaneamente o consumo de ligante, ou acelerando, ou retardando o tempo de presa;

- Utilização de outros agregados ou ligantes, como por exemplo o vidro reciclado, cinzas volantes, entre outros materiais;

- Avaliar a influência de outros diâmetros máximos dos agregados;

- Consideração de outras composições variando o parâmetro M_i/M_l;
- Influência da variação de outras combinações do ativador composto;
- Avaliar o parâmetro tempo de vibração dos provetes, com o intuito de evitar a segregação nos provetes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI, (1980). Manual of Concrete Practice, part 1. American concrete institute.

Almendra, A., (2016). "Resistência mecânica de geopolímeros com resíduos industriais". Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

APEB, (2007). Agregados para betão – Da produção à utilização. Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, 1ª edição.

Bastos, I. (2011). "Contribuição para o conhecimento sobre o efeito de material pozolânico no fabrico de betões". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Geotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Billong, N., Melo, U., Njopwouo, D., Louvet, F., e Bonnet, J. (2009). Effect of mixture constituents on properties of slaked lime–metakaolin–sand mortars containing sodium hydroxide. Cement & Concrete Composites, pp. 658 – 662.

Branco, F. G. (2013). Sebenta de materiais de construção. Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Camões, A. (2011). Betão eco-eficiente com reduzido teor de cimento. C-TAC. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Carreira, N. (2015). "Deformação de Vigas Contruídas com Geopolímeros". Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Centeio, J. (2011). "Propriedades físicas de argamassa geopolimérica de lamas residuais das minas da panasqueira". Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da beira interior.

Correia, J. (2016). "Deformação de vigas construídas com geopolímeros". Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Costa, A., e Appleton, J. (2002). Estruturas de Betão I. Parte II - Materiais. Departamento de Engenharia Civil. Grupo de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado.

Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X. e Degeimbre, R. (2003). Durability of mortars modified with metakaolin. Cement and Concrete Research (33), pp. 1473–1479.

Coutinho, A. S. (1973). Fabrico e propriedades do Betão (Vol. 1). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Coutinho, A. S. (1974). Fabrico e Propriedades do Betão (Vol. II). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Coutinho, A. S. e Gonçalves, A. (1994). Fabrico e Propriedades do Betão (Vol. III). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Davidovits, J. (1991). "GEOPOLYMERS, inorganic polymeric new materials". Journal of Thermal Analysis, Vol.37, pp. 1633-1656.

Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, Terminology. Proceedings of Geopolymer, international Conference. France.

Fernandes, J. (2015). "Geopolímeros - Influência da adição de plastificante e da temperatura de cura nas propriedades resistentes". Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

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), pp. 41–49.

Fonseca, F. (2016). "Resistência à flexão de vigas de materiais ativados alcalinamente". Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Gonçalves, A. (2014). "Fendilhação em Vigas Construídas com Geopolímeros" Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Guerra, D. (2015). “Geopolímeros – Influência da quantidade de ligante e da composição dos inertes”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Guerra, F. (2014). “Avaliação experimental do Comportamento mecânico de materiais ativados alcalinamente”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Gunning, J. G. (1983). Concrete technology, Level 4. Published in the United States of America by Longman Inc., New York.

Li, Z. e Ding, J. (2003). Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete. ACI Materials Journal (99), pp. 393–398.

Mateus, R. (2004). “Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção”. Dissertação de Metrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Marques, P. (2016). “Fendilhação em vigas construídas com materiais ativados alcalinamente”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Melo, J. (2012). “Incorporação de Cal em Misturas Cimentícias com Elevados Teores de Adição de Minerais”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Oliveira, M. (2014). “Caracterização do comportamento mecânico de sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina; Evolução temporal e composição de ativador”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Pedroso, F. (2009). “Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem”. Concreto e construções, IBRACON, Instituto Brasileiro do concreto. Ano XXXVII, Nº 53, pp. 14-19.

Pinto, A. T. (2004). Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho.

Pinto, A. T. (2006). Introdução ao Estudo dos Geopolímeros. Vila Real, Portugal: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Poon, C., Lam, L., Kou, C., e Wong, Y. a. (2001). Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high performance cement pastes. pp. 1301-1306.

Ribeiro, J. (2014). "Resistência de Vigas Construídas com Geopolímeros". Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Santa R. (2016). "Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de solidificação/imobilização de resíduos tóxicos". Pós-graduação em engenharia química, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.

Škvára, F. (2007). Alkali Activated Materials or Geopolymers?. Department of glass and ceramics, Institute of Chemical Technology Prague, Technická 5, 166 28 Prague, Czech Republic; pp. 173– 177.

Teixeira, M. (2014). "Betão de elevado desempenho reforçado com fibras incorporando metacaulino". Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Torgal, F., Gomes J. e Jalali S. (2005). Cimento Portland versus Ligantes Geopoliméricos. Considerações económicas sobre as implicações do mercado de carbono no custo dos concretos. Geopolymer system.

Torgal, F., Gomes J. e Jalali S. (2007). Argamassas Antigas: Reacção pozolânica ou Activação Alcalina? Artigo-ativação alcalina.

Torgal, F. e Jalali S. (2009). Ligantes obtidos por activação alcalina. Guimarães, Universidade do Minho.

Torgal, F. e Jalali, S. (2010). Cimento Portland normal versus ligantes geopoliméricos: Durabilidade e desempenho ambiental. Teoria e prática na Engenharia Civil, n. 15, pp. 1-9.