



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

Geopolímeros - Influência da Quantidade de Ligante e da Composição dos Inertes

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

Autor

Diana Isabel Julião da Silva Guerra

Orientadores

Prof. Adelino Vasconcelos Lopes

Prof^a. Maria Isabel Moita Pinto

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

Coimbra, Julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível com a colaboração de algumas pessoas, que contribuíram de forma direta ou indireta com o seu apoio e incentivo e a quem gostaria de deixar desde já o meu agradecimento.

Ao Professor Adelino Lopes por toda a disponibilidade, orientação e partilha de conhecimentos que sempre mostrou, com destaque para o auxílio prestado na parte laboratorial.

À Professora Maria Isabel Pinto pelo interesse e disponibilidade prestados na preparação deste trabalho, bem como pelas sugestões de emenda dadas.

Pelo contributo dado na realização dos trabalhos executados nos Laboratórios de Estruturas e de Geotecnia, um reconhecimento ao Senhor Luís Gaspar, Senhor Ilídio Santos e ao Senhor José António Lopes.

Aos meus pais, pois sem eles nada disto teria sido possível, em especial à minha mãe que sempre contribui com o seu apoio e paciência, ajudando-me a enfrentar os desafios que foram surgindo. Também à minha irmã pelo incentivo e força necessária para alcançar este objetivo.

Aos meus amigos, pelo apoio e pelos momentos de descontração proporcionados durante o meu percurso académico. Em especial ao Francisco Simões pelo carinho, dedicação e motivação, essenciais nos momentos mais difíceis.

RESUMO

A mudança de paradigma relativa ao ambiente promoveu o desenvolvimento de novos materiais de construção, investindo-se em elementos com diminuto impacto ambiental, que reduzam a utilização de energias fósseis na sua concepção. Na aposta de novos compostos mais sustentáveis, a indústria do betão começou a utilizar os desperdícios dos produtos industriais, descobrindo assim materiais complementares das misturas de betão, com durabilidade e resistência superiores.

O tema desta dissertação vai de encontro a uma produção mais ecológica, afirmando-se o metacaulino como um material pouco poluente, com boas características resistentes e propriedades físicas que o tornam versátil no mundo da construção. Importa por isso estudar diferentes variantes que possam potenciar as qualidades deste material. Expectando-se um desenvolvimento semelhante ao do betão, foi estudada a influência da quantidade de ligante e da composição dos agregados em misturas de geopolímeros.

Neste contexto procedeu-se à caracterização das resistências à tração por flexão e à compressão, em misturas de geopolímeros com 10, 30, 50, 70, 90 e 100% de adição de metacaulino, face a uma mistura base. Depreendeu-se que numa mistura de geopolímero, a quantidade de ligante não influencia significativamente as resistências, obtendo-se valores semelhantes entre as diferentes misturas.

Foram também analisadas misturas de geopolímeros com agregados compostos, por adição de britas de diâmetros diferentes, à areia base. Os quatro diâmetros máximos considerados, corresponderam aos peneiros regulamentares, ou seja 2,38, 4,76, 6,30 e 9,50 mm. Para as diferentes misturas não foi conseguida uma análise conclusiva sobre as dimensões ótimas dos agregados. Neste contexto, não se pode concluir acerca do efeito da composição dos agregados nas resistências das misturas.

ABSTRACT

Shifting the paradigm as far as the environment is concerned led to both an investment and the development of new construction materials, especially those with a more reduced environmental impact. By investing on new, more sustainable compounds, the concrete industry began to use recycled industrial waste. Improved cementing mixture compound materials were found, regarding strength and durability.

This dissertation intends to contribute to a more sustainable development by studying metakaolin. This is a low-polluting material with strength and good physical properties which gives it an excellent versatile quality for the construction industry. It is important to examine different aspects of this material as some of them may show improved qualities. Taking concrete behavior as a reference and hoping for a similar development, it would be expected that variations in metakaolin (binder) content and aggregate granulometric characteristics would influence also the strength of the geopolymer mixtures.

The work described herein studies and compares the tensile and compressive strengths of geopolymer mixtures with *10, 30, 50, 70, 90* and *100%* of metakaolin. The results showed that in a geopolymer mixture the binder content does not affect significantly the strength, as the different mixtures presented similar strength values.

Variations in the aggregate size for the geopolymer mixtures were also investigated. Different mixtures with different maximum aggregate diameters of 2.38, 4.76, 6.30 and 9.50 mm, which are correspondent to the standard sieve sizes, were analyzed. The results were found to be inconclusive therefore no conclusion can be given regarding the effect of granulometric characteristics of the aggregate.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Enquadramento geral	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Estrutura da dissertação	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	História	14
2.2	Relação cimento/resistência no betão	18
2.3	Relação agregado/resistência no betão	19
2.4	Relação betão com aditivos/resistência	20
2.5	Tempo de cura e ordem de adição dos compostos na mistura	21
3	ITENS E METODOLOGIA DE ENSAIO EXPERIMENTAL	24
3.1	Materiais utilizados	24
3.1.1	Metacaulino	24
3.1.2	Agregados	25
3.1.3	Água	29
3.1.4	Ativadores	30
3.2	Misturas Realizadas	30
3.2.1	Alteração Ligante	31
3.2.2	Alteração dos Agregados	32
3.3	Metodologia de produção das misturas com diferentes agregados	36
3.4	Ensaio Experimentais	38
3.4.1	Ensaio de resistência à tração por flexão	39
3.4.2	Ensaio à compressão	41
4	RESULTADOS E ANÁLISE	44
4.1	Influência da quantidade de ligante	44
4.1.1	Ensaio à tração por flexão	48

4.1.2	Ensaio à compressão	51
4.2	Influência dos agregados.....	56
4.2.1	Ensaio à tração por flexão	59
4.2.2	Ensaio à compressão	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5.1	Trabalhos Futuros	66
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 – Coliseu de Roma (Planet ware).	14
Figura 2-2 – Resistência em função da quantidade cimento por m ³	19
Figura 2-3 – Tensão de compressão em função da adição de 5, 10, 15 e 20% de metacaulino em substituição do cimento e da idade da mistura.....	21
Figura 2-4 – Relação entre a tensão de compressão/flexão de acordo com o tempo de cura e da percentagem de hidróxido de cálcio para uma dada concentração de hidróxido de sódio.	23
Figura 3-1 – Curva Granulométrica e aspeto físico do Metacaulino (dados cedidos pela empresa Argeco, França).....	25
Figura 3-2 – Processo de peneiração Mecânica e Manual (ACI, 1978)	26
Figura 3-3 – Curva Granulométrica Areia. Disposição das Partículas de Areia.	27
Figura 3-4 – Brita 1 (esquerda). Brita 2 (direita).....	28
Figura 3-5 – Curva Granulométrica das Britas utilizadas.	28
Figura 3-6 – Agregados por diâmetro.	29
Figura 3-7 – Curva granulométricas e de referência para a 1. ^a Mistura.....	34
Figura 3-8 – Curva granulométricas e de referência para a 2. ^a Mistura.....	34
Figura 3-9 – Curva granulométricas e de referência para a 3. ^a Mistura.....	35
Figura 3-10 – Curva granulométricas e de referência para a 4. ^a Mistura.....	35
Figura 3-11 – Misturadora (esquerda). Realização da mistura (direita).	36
Figura 3-12 – Consistência da mistura com alteração das quantidades de ligante (esquerda) e de agregados (direita).....	37
Figura 3-13 – Moldes utilizados (esquerda). Mesa vibratória e espátula (direita).	37
Figura 3-14 – Provetes P50 e 4. ^a mistura.	38
Figura 3-15 – Ensaio à tração por flexão.	40
Figura 3-16 – Provetes após rotura à tração por flexão (esquerda). Pormenor da superfície de rotura (direita).....	41
Figura 3-17 – Superfície de rotura do ensaio à tração por flexão numa mistura com britas....	41
Figura 3-18 – Dispositivo de compressão. Ensaio à compressão.....	42
Figura 3-19 – Roturas aceitáveis dos provetes. Ensaio de compressão.	43
Figura 3-20 – Roturas obtidas. Ensaio de compressão.	43
Figura 4-1 – Baridade média das misturas.	47

Figura 4-2 – Vazios dos provetes nas faces exteriores e no interior.....	48
Figura 4-3 – Valores médios da tensão resistente à tração por flexão. Percentagem de ligante.	50
Figura 4-4 – Resistências médias à compressão. Percentagem de ligante.	54
Figura 4-5 – Normalização dos resultados obtidos. Ligante.	56
Figura 4-6 – Baridade média das misturas. Parâmetro granulometria.	59
Figura 4-7 – Valores médios da tensão resistente à tração por flexão. Parâmetro granulometria.	61
Figura 4-8 – Resistências médias à compressão. Parâmetro granulometria.	63
Figura 4-9 - Normalização dos resultados obtidos. Agregados.....	64

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3-1 – Composição Elementar do Metacaulino	25
Quadro 3-2 – Baridade por Granulometria das britas.	29
Quadro 3-3 – Mistura base.	31
Quadro 3-4 – Misturas realizadas. Parâmetro ligante.	31
Quadro 3-5 – Misturas realizadas. Parâmetro granulometria.	33
Quadro 4-1 – Calendarização dos trabalhos. Parâmetro ligante.	44
Quadro 4-2 – Características dos provetes <i>P0</i> e <i>P10</i>	45
Quadro 4-3 – Características dos provetes <i>P30</i> e <i>P50</i>	45
Quadro 4-4 – Características dos provetes <i>P70</i> e <i>P90</i>	46
Quadro 4-5 – Características dos provetes <i>P100</i>	46
Quadro 4-6 – Quadro de dados geométricos da totalidade de provetes.	46
Quadro 4-7 – Tensão resistente à tração das misturas <i>P0</i> , <i>P10</i> e <i>P30</i>	48
Quadro 4-8 – Tensão resistente à tração das misturas <i>P50</i> , <i>P70</i> e <i>P90</i>	49
Quadro 4-9 – Tensão resistente à tração da mistura <i>P100</i>	49
Quadro 4-10 – Resultados globais das misturas para a resistência à tração por flexão.	50
Quadro 4-11 – Coeficiente de variação da tensão resistente à tração por flexão.	51
Quadro 4-12 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas <i>P0</i> e <i>P10</i>	52
Quadro 4-13 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas <i>P30</i> e <i>P50</i>	52
Quadro 4-14 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas <i>P70</i> e <i>P90</i>	53
Quadro 4-15 – Valores da tensão resistente à compressão para a mistura <i>P100</i>	53
Quadro 4-17 – Qualidade de distribuição dos resultados experimentais. Ensaio de compressão.	55
Quadro 4-17 – Calendarização dos trabalhos. Parâmetro granulometria.	57
Quadro 4-18 – Características dos provetes <i>P2,38</i> e <i>P4,76</i>	58
Quadro 4-19 – Características dos provetes <i>P6,30</i> e <i>P9,50</i>	58
Quadro 4-20 – Quadro de dados geométricos da totalidade de provetes. Parâmetro granulometria.	59
Quadro 4-21 – Tensão resistente à tração das misturas <i>P2,38</i> , <i>P4,76</i> e <i>P6,30</i>	60
Quadro 4-22 – Tensão resistente à tração da mistura <i>P9,50</i>	60
Quadro 4-24 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas <i>P2,38</i> e <i>P4,76</i>	62

Quadro 4-25 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas *P6,30* e *P9,50*.... 62

ABREVIATURAS

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio

CaO – Óxido de Cálcio (Cal)

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro (III)

K – Potássio

K_2O – Óxido de Potássio

Li – Lítio

MgO – Óxido de Magnésio

MnO – Óxido de Manganês

NaO_2 – Superóxido de Sódio

SiO_2 – Dióxido de Silicato

TiO_2 – Dióxido de Titânio

SIMBOLOGIA

f_t – Resistência à Tração

f_c – Resistência à Compressão

f_{tm} – Valor da Resistência à Tração Média

f_{cm} – Valor da Resistência à Compressão Média

σ_m – Desvio Padrão Médio

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

Desde as obras de arte, até à simples construção de um edifício, ou poste de iluminação, as construções encontram-se expostas aos diversos agentes erosivos (químicos e biológicos), que degradam e diminuem a sua longevidade e podem condicionar a sua beleza estética. Encontrar soluções que garantam não só as condições de segurança regulamentares, como a sua integridade arquitetónica, tornou-se um dos atuais objetivos, idealizando compostos que sejam também menos nocivos para o ambiente.

No início do século XX, pensou-se ter descoberto a solução para boa parte dos problemas da construção, o betão armado, com o seu auge ao longo do mesmo século. De facto, o betão armado é um material que permite uma vida útil de médio prazo, e com uma elevada resistência. No entanto, com o passar do tempo também este material começou a revelar alguns problemas, não só pela comparação com outros materiais que foram surgindo, tal como o aço, bem como pela crescente preocupação com o ambiente (Mateus, 2004).

Um dos problemas do betão consiste no consumo de energia durante a sua produção, nomeadamente as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera durante o fabrico do cimento. Na produção de cimento, por cada tonelada de cimento produzem-se aproximadamente 0,94 toneladas de dióxido de carbono CO₂. Estas emissões irão contribuir para o efeito de estufa, bem como para o aquecimento global do planeta, pondo em causa a viabilidade do uso deste material, contrariando a consciência para o uso de energias menos poluentes e uma diminuição do uso de recursos finitos (Malhotra VM, 2005).

Com o aumento da população, sobretudo em países em vias de desenvolvimento, urge a necessidade de encontrar soluções para uma construção que tenha um impacto mais reduzido sobre o ambiente, mas que seja simultaneamente resistente e confortável. Como a construção é a indústria que mais consome matérias-primas não renováveis, deve atuar-se a este nível, de forma a associar os resíduos que daí se produzem, bem como os resultantes de outras atividades, na construção de um material que dê resposta às necessidades atuais, promovendo assim um desenvolvimento sustentável (Henriques, 2011).

Uma das soluções que já se demonstrou ser viável consiste na substituição parcial ou total do cimento por outro tipo de ligantes resultantes do desperdício da produção de outros materiais, tal como as escórias de alto-forno ou as cinzas, que resultam da indústria siderúrgica ou das centrais térmicas. Com a introdução destes materiais, o betão mantém a sua resistência e são ainda resolvidos problemas, tais como degradação por corrosão, a elevada alcalinidade, durabilidade e a diminuição de emissões de dióxido de carbono.

O estudo de materiais com um baixo impacto ambiental representam um incremento à sustentabilidade, vendo-se no metacaulino um forte candidato à construção com parâmetros resistentes e de durabilidade apreciáveis, e ainda com baixas taxas de poluição quando comparado com o cimento.

1.2 Objetivos

Esta dissertação fará uma breve análise do impacto dos geopolímeros no ambiente, por oposição ao efeito dos materiais constituintes do betão, sendo que a principal preocupação consiste em analisar as propriedades mecânicas de resistência destes materiais. Neste caso, considerando os parâmetros correspondentes à, percentagem de ligante na produção de geopolímeros e ainda a alteração da composição dos inertes, pretende-se avaliar, de forma experimental, o seu impacto nas tensões resistentes à tração e à compressão. Neste sentido serão abordados os seguintes aspetos:

- Comparação dos efeitos ambientais do betão com o metacaulino;
- Características físicas e mecânicas do metacaulino;
- Análise da variação das propriedades resistentes dos geopolímeros com o aumento da percentagem de ligante e da variação da granulometria;
- Análise e comparação dos resultados obtidos e viabilidade da solução obtida.

Este trabalho insere-se num trabalho mais vasto, correspondente ao conhecimento dos parâmetros que influenciam o comportamento resistente dos geopolímeros. Pretende-se assegurar um conjunto necessário de conhecimentos que garantam a substituição segura do tradicional betão.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita a introdução deste trabalho, enquadrando e fundamentando o propósito e objetivos deste estudo.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica, partindo de uma visão mais vasta e abrangente, até o foco se direccionar com mais pormenor para o âmbito da dissertação. Assim, inicia-se o estado da arte com as origens do metacaulino, enaltecendo as suas vantagens e

importância na atualidade. Comparou-se ainda o impacto da produção do betão com outras soluções menos poluentes, enumerando-se estudos na área do betão com a finalidade de se avaliar os resultados obtidos.

No terceiro capítulo são descritos e analisados os procedimentos experimentais realizados até à obtenção das misturas, indicando-se os métodos orientadores, os agregados e respetivas descrição granulométrica, bem como os princípios idealizados para alcançar as misturas pretendidas.

No quarto capítulo referem-se os resultados obtidos, fazendo-se ainda uma análise quanto à sua fiabilidade, indicando também o significado dos valores obtidos.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões globais, sendo feita uma interpretação e análise crítica dos mesmos, indicando ainda alguns trabalhos que poderão ser complementares a esta dissertação, bem como outros que promovam o uso do metacaulino.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma breve introdução ao desenvolvimento da construção civil ao longo da História, sendo referida a importância de alguns materiais que levaram a formação dos geopolímeros, construídos com base no metacaulino, bem como de outros que se demarcaram pelas suas características resistentes e de durabilidade até aos dias de hoje. É ainda feita uma descrição dos parâmetros que permitem obter melhores resultados quanto ao tipo de ligante e quanto aos agregados, noutro tipo de materiais que não o geopolímero, referindo-se estudos realizados e os resultados alcançados com a variação destes parâmetros, de forma a poderem ser comparados com os resultados obtidos nesta dissertação. Por fim refere-se a importância da cura na obtenção de melhores resultados, bem como os passos a serem seguidos para alcançar essa meta.

2.1 História

Desde a antiguidade que se tentam construir edifícios que deixem a sua marca no tempo, tanto pela sua grandiosidade, como pela duração da sua construção e pela sua durabilidade. Para isso procuraram-se materiais que conferissem essas características aos edifícios. Um desses exemplos é o coliseu de Roma (Figura 2-1), eleito uma das sete maravilhas do mundo e construído entre 68 e 79 d.C., que perdurou até os dias de hoje, mesmo depois de percorrido por milhares de pessoas.



Figura 2-1 – Coliseu de Roma (Planet ware).

Já na antiguidade se fazia uma seleção dos produtos a usar na construção consoante a escala das obras, sendo que, para as obras consideradas mais nobres e em que se pretendia um comportamento melhor, usava-se a *testa*, uma argila caulinítrica calcinada e o *carbunculus*,

um tufo de natureza aluminosilicada, que associados originavam materiais estáveis constituídos por fases hidratadas de silicato de cálcico (C-S-H) [(Pinto, 2006); (Davidovits J. , 2006)].

Um outro marco na história da construção corresponde às pirâmides do Egito, em que na sua conceção foram usadas matérias-primas como lamas argilosas do rio Nilo, que eram ricas em sílica, alumina, carbonato de sódio, a cal e o caulino. Já nessa altura se conhecia a ativação da sílica a partir da reação do carbonato de sódio com a água, formando assim uma pasta ligante (Pinto, 2006). Segundo Davidovits, a ativação alcalina pode ser feita sem a presença de cálcio, em que alumino-silicatos, como a sílica e a alumina reagem entre si, em meios alcalinos, originando novos compostos rearranjados nos seus átomos de oxigénio, a que o autor deu o nome de geopolímeros. Estes caracterizam-se ainda pela sua elevada resistência mecânica e por endurecerem rapidamente a baixa temperatura.

Atualmente, é uma preocupação cada vez mais frequente a utilização de materiais reciclados e a diminuição do consumo de energias não renováveis. Sabe-se que a produção do betão implica o uso de aglutinantes, tais como agregados provenientes da exploração mineral ou de cimentos, sendo que a exploração destes recursos causa um grande impacte ambiental, tanto fisicamente, alterando a estética das paisagens, como no gasto de recursos naturais. A produção de cimento implica ainda grandes consumos energéticos na fase de fabrico, visto ser necessário obterem-se elevadas temperaturas nos fornos.

Um dos grandes problemas do betão corresponde à elevada porosidade, a qual permite a degradação das armaduras resultante do ataque químico a que o betão fica sujeito, fenómeno denominado de carbonatação, que provoca a diminuição do pH. Este decréscimo induz a corrosão e torna o betão permeável ao ataque dos cloretos. Como forma de combater este problema, pensou-se na adição de materiais com uma granulometria mais fina e que reagissem quimicamente com os compostos de betão, diminuindo assim a sua porosidade. Uma das alternativas pensadas consistiu na introdução de materiais pozolânicos, isto é, materiais que possuíssem na sua composição silicatos ou alumino-silicatos amorfos, quase sem atividade aglomerante e que em contacto com a água reagissem com o hidróxido de cálcio, conferindo as mesmas propriedades ligantes do cimento (Bastos, 2011).

Com a introdução de materiais pozolânicos na constituição do betão, verificou-se que as reações de carácter pozolânico ocorriam depois da formação de hidróxido de cálcio, que acontece devido à hidratação do cimento. Assim, segundo Armândio Pinto (2006), as pequenas partículas de pozolana geram um grande número de pontos de nucleação à volta dos quais se podem formar ou precipitar os produtos de hidratação, o que por sua vez provoca o preenchimento dos vazios. Uma outra forma de melhorar o comportamento mecânico do

betão consiste na utilização de polímeros inorgânicos, que se caracterizam pela ativação alcalina de aluminossilicatos resultantes dos desperdícios industriais, cujas aplicações têm inúmeras utilizações, melhorando significativamente o impacto sobre o ambiente, com a produção de menos 80% de CO₂ do que o cimento Portland (Pacheco-Torgal, Moura, Ding, & Jalali, 2010).

Os materiais ativados alcalinamente, também designados por geopolímeros, apresentam suficientes resistências mecânicas, evidenciam com baixa permeabilidade e, em alguns casos, não é conhecida qualquer retração, combinando-se numa reação alcalina que por sua vez promove a combinação dos diversos materiais, inclusive partículas de pó que não se teriam ligado até então, diminuindo assim a necessidade de utilizar misturas mais graduadas. Ao contrário do cimento Portland, que por norma funciona apenas como cola, os cimentos de escórias alcalinas, quando submetidos à ação da temperatura levam ao aumento da resistência mecânica e promovem a diminuição do tempo de indução, o qual é afetado pela introdução de materiais mais finos (Pinto, 2006).

Inicialmente, a ativação alcalina foi pensada tendo em vista objetivos associados à indústria cerâmica, de forma a diminuir os gastos de energia no processo de cozedura dos caulinos. Agora, pensa-se na sua aplicação estrutural. Esta reação pode ser descrita de forma mais explícita, como uma reação de hidratação de alumino-silicatos com compostos alcalino ou alcalino-terrosos, que deverão sofrer um tratamento térmico, para que fiquem desidratados e que os íons alumínio se reajustem com o oxigénio. Assim, após a perda de água, o metacaulino adquire uma estrutura amorfa, caracterizando-se pelo baixo uso de ativador, necessário apenas para garantir a trabalhabilidade da pasta. Trata-se por isso de uma reação rápida, em que não se chegam a formar muitos cristais (Pinto, 2006).

Davidovits (1999) sugeriu ainda uma nova possibilidade, reinventando o conceito de geopolímeros, em que a ativação alcalina podia ocorrer sem que estivessem presentes compostos com cálcio e em que a sílica e a alumina reagissem entre si, organizando-se numa nova distribuição química, partilhando os átomos de oxigénio. Foi assim, através da procura de cimentos ativados alcalinamente, que se descobriu o metacaulino produzido artificialmente. O metacaulino pode ser obtido através do “caulino”, um mineral argiloso, cujo nome deriva de uma palavra chinesa, “kao-ling”, que significa montanha elevada, dado o local onde este material foi encontrado. O seu principal constituinte é a caulinite, cerca de 79 %, cuja composição química é dada por $2\text{H}_2\text{OAl}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$. No entanto as propriedades físicas e químicas do caulino dependem muito das condições em que é formado, podendo diferir quanto ao maior ou menor grau de finura, superfície específica e quanto à cor (Rashad, 2012).

A caulinite é um mineral de argila que durante a sua queima fornece plasticidade, constituída por folhas octaédricas de alumina Al_2O_3 e folhas tetraédricas de sílica SiO_2 , justapostas alternadamente, com uma composição teórica de 46,54% de SiO_2 , 39,5% de Al_2O_3 e 13,96% de H_2O . A caulinite é transformada a baixa temperatura e num intervalo de tempo bastante curto, numa estrutura tridimensional típica dos tecto-silicatos. A capacidade de resistir às agressões ambientais deve-se exatamente à formação desses tecto-silicatos de natureza zeolítica (Rashad, 2012).

A produção do metacaulino implica a exposição a fornos de elevadas temperaturas cerca de $750^{\circ}C$, com uma velocidade de aquecimento de $3^{\circ}C$ /minuto, durante uma hora. Após este tempo a mistura obtida é triturada num moinho de bolas e peneirado (Billong, Melo, Njopwou, Louvet, & Bonnet, 2009). É então através do tratamento térmico do caulino, até se obter um elevado grau de desidratação, que se obtém o metacaulino. Usualmente o metacaulino é branco, tendo por isso bastantes aplicações em termos de arquitetura, sendo usado na produção de cimento, cerâmica, porcelana e tijolo. Na sua constituição, o metacaulino tem um teor em cálcio praticamente nulo, desmaterializando-se a ideia de que os materiais ativados alcalinamente tinham de possuir cálcio na sua génese, tal como acontecia com o cimento.

Para além disso, tem uma estrutura semelhante à dos zeólitos, a qual confere ao metacaulino características mais aglutinantes, visto que na sua constituição possuem uma elevada superfície interna de contacto e enorme capacidade de permutação de iões. Como um zeólito é constituído por alumino-silicatos de carga negativa, atraem outros compostos de carga positiva, tal como o sódio ou o potássio. Na natureza, os zeólitos formam-se pela junção de meios alcalinos, tal como água salgada, em contacto com depósitos de cinzas (Dyer, 1988).

Na génese de zeólitos naturais, pequenas diferenças como a temperatura, a alcalinidade das águas, entre outros, podem influenciar a sua estrutura molecular, daí que a sua produção industrial possa ser bastante diferente da natural. Também é possível a fabricação de zeólitos artificiais. No entanto, como estes são feitos em laboratório, a sua conceção é muito menos morosa e, por isso, o arranjo estrutural dos seus componentes é muito mais desorganizado e menos estável do que os seus similares naturais. Sabendo que os zeólitos são constituídos por silício, alumínio e oxigénio, com uma estrutura “aberta”, pois permitem a passagem de água, é possível variar facilmente a sua concentração em água, aumentando ou diminuindo a temperatura. O caulino sofre o tratamento térmico semelhante ao dos zeólitos naturais. É importante referir que o metacaulino não é um zeólito, mas que tem um comportamento semelhante em termos da forma como se liga e da sua estabilidade (Pinto, 2006).

Uma das aplicações do metacaulino é, como referido, na produção de geopolímeros. A ativação do metacaulino neste material envolve três passos: um primeiro de dissolução muito rápido e fortemente exotérmico; um segundo de indução com perdas de calor; e por último, um terceiro passo que consiste numa nova reação exotérmica de reativação do ligante, com perdas graduais de calor à medida que a reação ocorre (L. Granizo, Blanco-Varela, & Palomo, 2000). Os ligantes ativados alcalinamente podem utilizar qualquer material inorgânico constituído por sílica e alumina, desde que ocorra uma reação térmica que torne previamente o material mais amorfo (Bastos, 2011).

2.2 Relação cimento/resistência no betão

Na formulação do betão, cabe ao cimento a função de aglomerar diferentes materiais, tais como a areia, brita, entre outros agregados, conferindo-lhe grande coesão e resistência. De forma a obter uma composição de betão com elevada resistência, endurecimento rápido, baixo calor de hidratação, entre tantos outros aspetos que podiam ser melhorados no betão, surgiram modificações à mistura de betão, entre as quais, a adição de pozolanas ou escórias de alto forno. Estas adições permitiam alterar o equilíbrio químico, originando uma diminuição da alcalinidade e do calor de hidratação, sem alterar as tensões de rotura ou até melhorando-as (Coutinho, 1973).

J. Gunning (1983) estudou várias misturas de betão, estabelecendo uma relação entre o teor de cimento e a resistência à compressão, para misturas com apenas um tipo de cimento, agregados com o mesmo tamanho e do mesmo tipo, assumindo-se um dado valor de slump, ou seja, assumindo-se uma dada fluidez e trabalhabilidade para a mistura. Desse estudo verificou-se que a tensão cresce com adição de cimento por metro cúbico, obtendo-se uma resistência de cerca de 60 MPa para a mistura com 450 kg cimento/m³, e cerca de 20 MPa para uma mistura com 200 kg cimento/m³, tal como pode ser visto na Figura 2-2.

Também A. Coutinho e Arlindo Gonçalves (1973) analisaram a influência do parâmetro ligante numa mistura de betão, constatando-se que as tensões de rotura à tração aumentavam em função do aumento da quantidade de cimento por metro cúbico. O resultado do aumento da tensão de tração em função da quantidade de cimento por metro cúbico pode ser vista na Figura 2-2, onde se verifica uma tensão máxima próxima dos 4,5 MPa ao fim de um ano. Para betões produzidos com dosagens de cimento entre 200 e 400 kg/m³, as tensões de rotura à compressão, por cada 50 kg/m³ de aumento da dosagem de cimento sobem em média 20%, pressupondo condições de trabalhabilidade, idade e cura constantes.

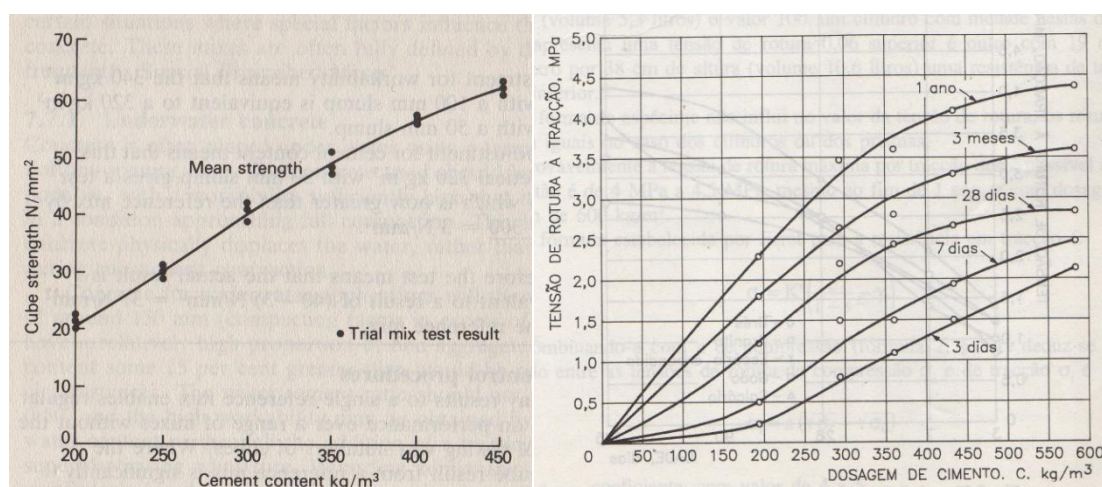


Figura 2-2 – Resistência em função da quantidade cimento por m^3 .

Também outros fatores influenciam o desempenho da resistência dos betões; por exemplo, a água desempenha um papel fundamental, pois se usada em demasia, aquando da sua evaporação, cria vazios que prejudicam a resistência e a durabilidade. Estes parâmetros são também influenciados pela dosagem de ligante, e pela utilização, ou não, de adjuvantes, os quais influenciam essencialmente a trabalhabilidade. O ligante, que quando usado em excesso, origina misturas muito coesivas e aderentes, sendo de difícil manuseamento (Costa & Appleton, 2002).

2.3 Relação agregado/resistência no betão

Os agregados são constituídos por elementos naturais ou artificiais, que se ligam ao cimento, contribuindo para a resistência do betão. A forma como esta ligação ocorre depende da forma, da rugosidade, da porosidade e da absorção do agregado, em que ocorre a reação de hidratação do cimento à superfície do inerte. Assim, as propriedades de cada agregado contribuem de forma significativa para a aderência, onde uma superfície arredondada e lisa confere maior trabalhabilidade, e uma superfície britada, um aumento da resistência à tração. Isto acontece porque num agregado rolado a sua energia superficial já foi desgastada devido à erosão sendo visível no ensaio à compressão o arranque das partículas, enquanto que num agregado britado, é visível a fracturação das partículas [(Coutinho, 1973); (Costa & Appleton, 2002)].

De forma a melhorar a compacidade de uma mistura, ou seja, de modo a reduzir os vazios, devem ser aumentadas as proporções de agregados grossos devem ser superiores à quantidade de finos. De referir que a compacidade é inversamente proporcional ao volume de vazios. No entanto, com o aumento da compacidade também se verifica a diminuição da trabalhabilidade, e potencia-se a segregação do betão. Por outro lado, permite obter, resistências, muito

elevadas, baixa porosidade, baixa retração e elevada durabilidade. Para se conseguir uma boa trabalhabilidade, sem que o betão segregue durante o transporte, é necessário encontrar a granulometria ótima da mistura, composta pelas quantidades ideais de agregados de diâmetro determinado.

2.4 Relação do betão com aditivos/resistência

O metacaulino é um material obtido a partir do caulino, em que, dependendo da génese do caulino, pode corresponder a diferentes tipos de metacaulino, o que por sua vez confere diferentes propriedades físicas e químicas ao metacaulino. Kasim Mermerdas et al. (2012) estudaram o uso de caulinos turcos obtidos de diferentes depósitos, em substituição do peso do cimento na mistura. Analisaram as propriedades químicas e mineralógicas do caulino, comprovando diferentes percentagens dos compostos minerais para cada tipo de caulino, e ainda todos diferentes dos metacaulino comerciais.

Nos ensaios realizados, partiram de uma mistura base de betão com uma razão água/cimento de 0,4, tendo substituído parcialmente o cimento por 5, 10, 15 e 20% de metacaulino. Dado que nas misturas de betão normal, a tensão de compressão variou entre 40 e 56 MPa, os autores compararam estes valores com os resultados obtidos para as diferentes misturas com adição de metacaulino, donde obtiveram tensões entre 23 e 64 MPa para os metacaulinos turcos e tensões entre 35 e 67 MPa para um metacaulino comercial, dependendo os valores da idade da mistura.

Concluíram então que as misturas de metacaulino obtido do caulino processado na Turquia apresentavam comportamento semelhante ao do metacaulino comercial, em função da mistura inicial de cimento. Mostraram ainda que as misturas com substituição do cimento por metacaulino, apresentavam melhores resultados à compressão e que os melhores resultados correspondiam à adição de 15% de metacaulino. Os resultados à compressão foram exibidos como semelhantes entre metacaulino de diferentes géneses. Apesar das suas propriedades químicas e mineralógicas serem diferentes. Os resultados da tensão de compressão em função da adição de metacaulino, para caulinos turcos e o caulino comercial (MK), podem ser vistos na Figura 2-3, bem como a mistura base de betão (control).

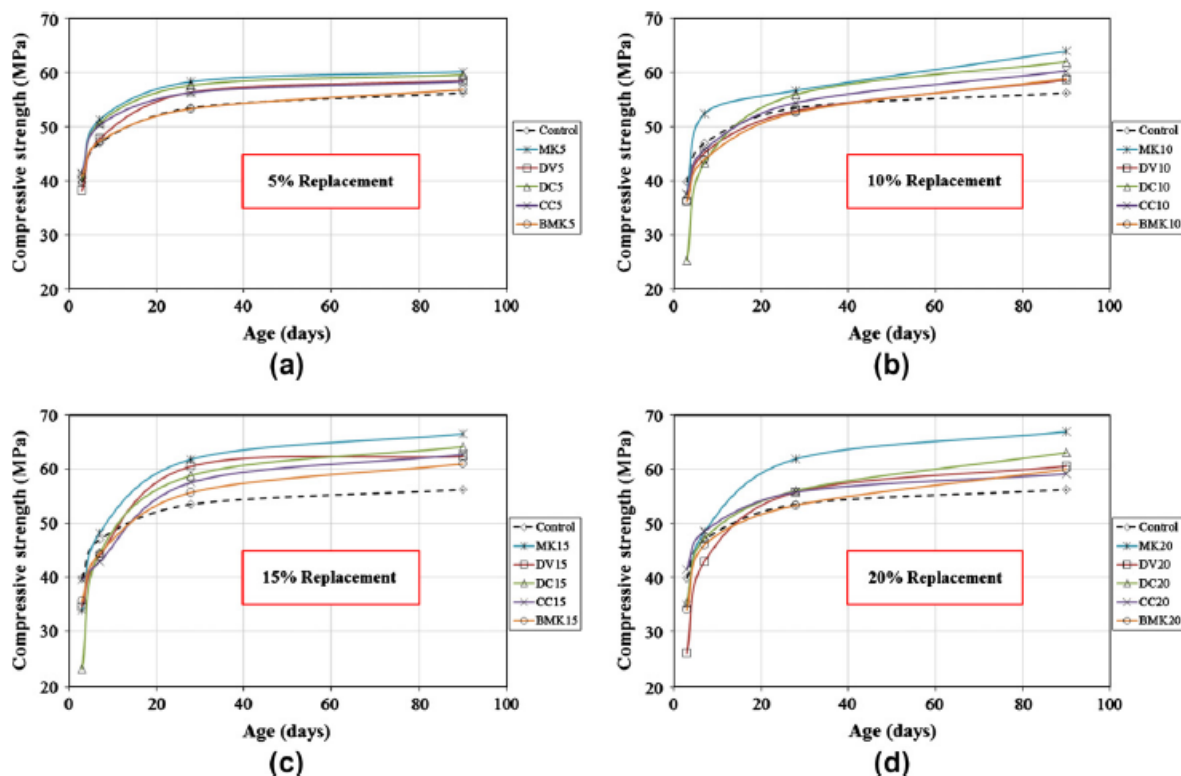
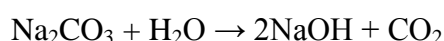


Figura 2-3 – Tensão de compressão em função da adição de 5, 10, 15 e 20% de metacaulino em substituição do cimento e da idade da mistura.

2.5 Tempo de cura e ordem de adição dos compostos na mistura

De forma a proporcionar máximas resistências mecânicas e de durabilidade deve ponderar-se sobre as proporções a adotar para cada composto, consoante a pasta que se pretende obter. Davidovits (1982) indica que as proporções ideais de compostos são: no ativador, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=1,85$; no metacaulino, $0,20 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0,48$; $3,30 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,50$; $0,80 < \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,60$; e entre o ativador e o metacaulino $10 < \text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 2$; sendo que Na pode ser substituído por K ou Li. No entanto na natureza é difícil encontrar estas proporções, sendo por isso necessário prepará-los quimicamente.

Na antiguidade, recorria-se a depósitos de carbonato de sódio, que se encontravam na natureza, e dissolvia-se em água, obtendo-se assim o hidróxido de sódio. Atualmente, já é possível encontrar este ativador em flocos, ou grãos, e com o mesmo processo de dissolução em água obter hidróxido de sódio. A reação é a seguinte (Pinto, 2006):



O hidróxido de sódio tem pois a função de dissolvente das matérias-primas, numa primeira fase, e depois de reorganizador da estrutura dos compostos, funcionando por isso como um ativador e como potenciador do ligante.

No betão, após o cimento ganhar presa continuam a dar-se reações de hidratação que promovem ganhos ao nível da resistência, sendo por isso um parâmetro fundamental na conceção do betão. No entanto, nem sempre é possível garantir as condições ideais para que estas reações se verifiquem. De facto, se o betão não estiver protegido contra a ação do vento, do sol ou das baixas humidades, a água evapora-se e o processo fica incompleto. Assim, num betão, quanto maior o tempo de cura, maior a tensão de rotura, assim como a resistência ao desgaste e aos ataques químicos, tendo-se sempre de garantir as condições de humidade (Weigler & Karl, 1974).

No entanto, para os ligantes de endurecimento rápido, o tempo de cura tem um intervalo de tempo reduzido, findo o qual, as reações terminam. Para o metacaulino, a resistência é influenciada pela temperatura de cura e também pelo tempo de cura. Ao contrário dos betões, o metacaulino tem um processo de endurecimento rápido que estabiliza entre 7 e 10 dias, em condições normais de temperatura ambiente (Bignozzi, et al., 2012). Este tempo pode ainda ser diminuído, podendo a reação geopolimérica ocorrer em apenas algumas horas, se a cura for feita a uma temperatura adequada (Bastos, 2011). Divya Khale e Rubina Chaudhary (2007) referem ainda que os processos de cura prolongados melhoram a resistência à compressão, sendo que a partir das 48 horas esse aumento não é significativo.

Também o aumento da quantidade de ativador na mistura influencia o desenrolar das reações, provocando um atraso no desenvolvimento do polímero, podendo ser compensado pelo aumento da temperatura (Siddique & Klaus, 2008). No entanto, se o processo de cura decorrer acima da temperatura ambiente, a estrutura do geopolímero fecha-se e torna-se quase impermeável. Outro fator que poderá influenciar os resultados consiste na ordem pela qual são adicionados os componentes de uma mistura de ativação alcalina, considerando-se que a introdução das partes sólidas, seguidas pela adição de ativador, induz melhores resultados nas misturas de metacaulino (Pinto, 2006).

Também F. Pacheco-Torgal et al. (2010) concluíram que a trabalhabilidade das argamassas é reduzida pelo aumento da concentração de hidróxido de sódio e pela substituição do metacaulino por hidróxido de sódio. Verificaram ainda que os resultados da tensão de compressão e tensão por tração aumentam com o aumento da concentração de hidróxido de sódio, em que esse acréscimo representa cerca de 35 %. Na Figura 2-3 podem ser observados alguns resultados obtidos por estes autores, avaliando-se a tensão à compressão em função da

concentração de hidróxido de sódio, do tempo de cura e da percentagem de hidróxido de sódio.

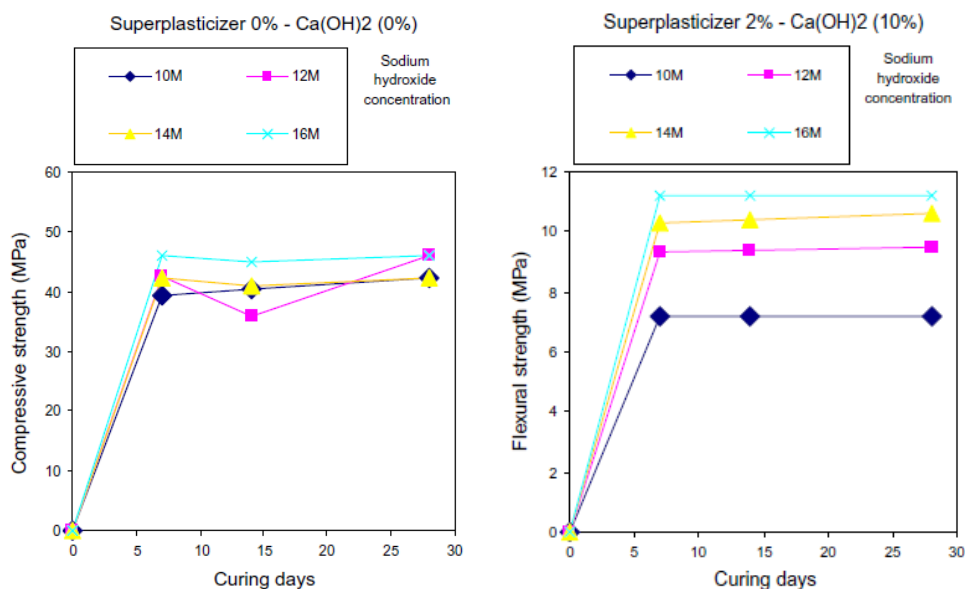


Figura 2-4 – Relação entre a tensão de compressão/flexão de acordo com o tempo de cura e da percentagem de hidróxido de sódio para uma dada concentração de hidróxido de sódio.

Outro fator que influencia a qualidade dos provetes corresponde à possível retração, provocada pela perda de água ou pelos agregados da mistura. De forma a evitar este problema os provetes devem ser envolvidos num filme plástico, evitando que se dêem trocas de água com o meio exterior. A utilização de areia na mistura também é fundamental, pois através deste agregado a retração pode ser diminuída, devido às propriedades mineralógicas da areia, que aumentam a coesão e resistência mecânica final (Pinto, 2006).

3 ITENS E METODOLOGIA DE ENSAIO EXPERIMENTAL

Tal como descrito no Capítulo 1, o objetivo principal do presente trabalho consistem na análise da influência da variação da percentagem de metacaulino e ainda a influência da granulometria do agregado numa mistura base. Neste capítulo é descrita a metodologia, bem como os materiais utilizados na construção dos provetes de ensaio, referindo-se a importância de cada parâmetro no decurso da experiência. Para além disso, serão ainda referidas as metodologias seguidas no ensaio.

A análise experimental dos parâmetros acima indicados foi realizada com base em dois indicadores de resistência mecânica: a resistência à tração por flexão e resistência à compressão. Para isso, e como não existe uma norma específica para este composto, recorreu-se à norma NP EN 196-1 (2006) relativa a metodologias de ensaio de cimentos, aplicável também a outros materiais se for adequado. Como não existe um regulamento para misturas cujo ligante é o metacaulino, e devido à semelhança da mistura à argamassa de cimento, adaptou-se a utilização desta norma ao composto de metacaulino. Foram ainda utilizadas outras normas referentes ao betão, tal como a NP EN 12390-5 (2009) entre outras que serão ainda indicadas, por se considerarem de uso adequado.

A NP EN 196-1 descreve então o método utilizado para avaliar a resistência à tração por flexão e à compressão, bem como os equipamentos a usar. Neste caso a norma indica a utilização de provetes de forma prismática, com as dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm.

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Metacaulino

O material usado como ligante é um metacaulino oriundo da empresa Argeco (França), que possui uma cor de tijolo, relacionando-se esta com o teor de impurezas que o caulino possui, em que à cor branca corresponde o metacaulino obtido através do caulino puro. É maioritariamente constituído por dióxido de silício SiO_2 correspondendo, em média, a 70 % dos componentes elementares. Relativamente ao óxido de cálcio CaO , um componente importante do cimento, a sua presença é muito reduzida, tendo apenas 0,02 %. A sua composição elementar é indicada na Quadro 3-1:

Quadro 3-1 – Composição Elementar do Metacaulino

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MnO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O
0,02	70,2	21,8	2,20	0,38	0,27	1,15	0,09	0,09

Um outro parâmetro importante na caracterização deste composto é a sua massa volúmica, sendo esta igual a 2510 kg/m³. A massa volúmica consiste na relação entre a massa das partículas individuais e o seu volume, não incluindo por isso os vazios. Também foi analisada a curva granulométrica, dado que a partir desta pode saber-se a distribuição das partículas de um dado agregado segundo as dimensões dessas partículas, que por sua vez influenciam a compacidade e a trabalhabilidade de uma mistura. Na Figura 3-1 podem observar-se a curva granulométrica do metacaulino segundo a percentagem de passados em cada peneiro, bem como o seu aspeto físico.

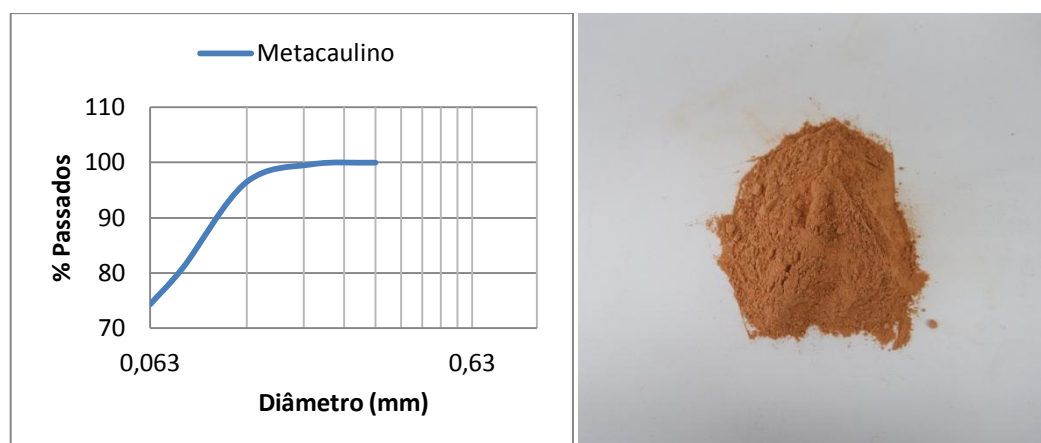


Figura 3-1 – Curva Granulométrica e aspeto físico do Metacaulino (dados cedidos pela empresa Argeco, França).

3.1.2 Agregados

De acordo com a norma EN 12620 (2010), um agregado é um material granular usado na construção, que pode ser natural, artificial ou reciclado. Durante a análise experimental foram usados diversos agregados, consoante o tipo de método que se iria realizar: no primeiro, em que se analisou a influência da quantidade de metacaulino nas propriedades resistentes da mistura foi usado apenas a areia como agregado; no segundo, avaliando-se a intervenção da granulometria nas mesmas propriedades, foram utilizadas areia e britas com granulometrias diferentes.

3.1.2.1 Areia

A areia utilizada foi obtida durante a execução de uma obra realizada na zona de Souselas em Coimbra, tendo-se posteriormente procedido à análise da curva granulométrica de acordo com a norma EN 933-1 (2000), aplicável a agregados naturais ou artificiais.

Assim, a amostra de areia foi colocada numa estufa durante 48 horas, garantindo-se assim que a areia a estudar estava seca. A norma indica o mínimo de 24 horas. Usando uma balança calibrada, pesou-se uma amostra de areia. De seguida, despejou-se a amostra numa coluna de peneiros, os quais foram agitados posteriormente, mecânica e manualmente, até se verificar que, após um minuto, a massa do material do peneiro de maior diâmetro não se alterava. Por fim, o material retido em cada peneiro foi pesado e registado.

Na Figura 3-2 pode observar-se o equipamento de peneiração mecânica e o método de colocação da amostra nos peneiros.

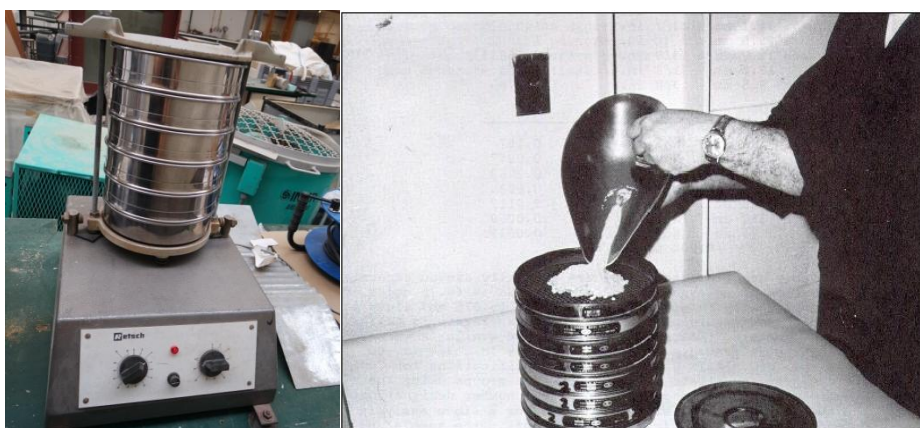


Figura 3-2 – Processo de peneiração Mecânica e Manual (ACI, 1978)

Os peneiros utilizados foram os correspondentes à norma americana ASTM (American Society for Testing Materials), expressando-se os resultados obtidos na seguinte curva granulométrica da Figura 3-3. A mesma figura mostra ainda as várias frações da areia.

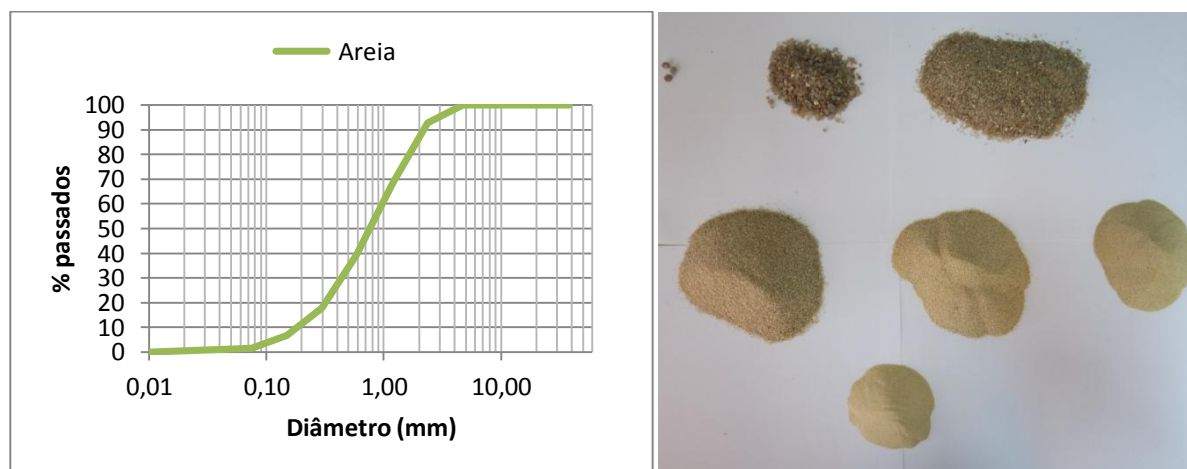


Figura 3-3 – Curva Granulométrica da Areia. Disposição das Partículas de Areia.

Pela análise da distribuição granulométrica da Figura 3-3 observa-se que a distribuição da areia é contínua na parte dos finos, pois tem uma distribuição uniforme das partículas de menores dimensões para as de maior dimensão.

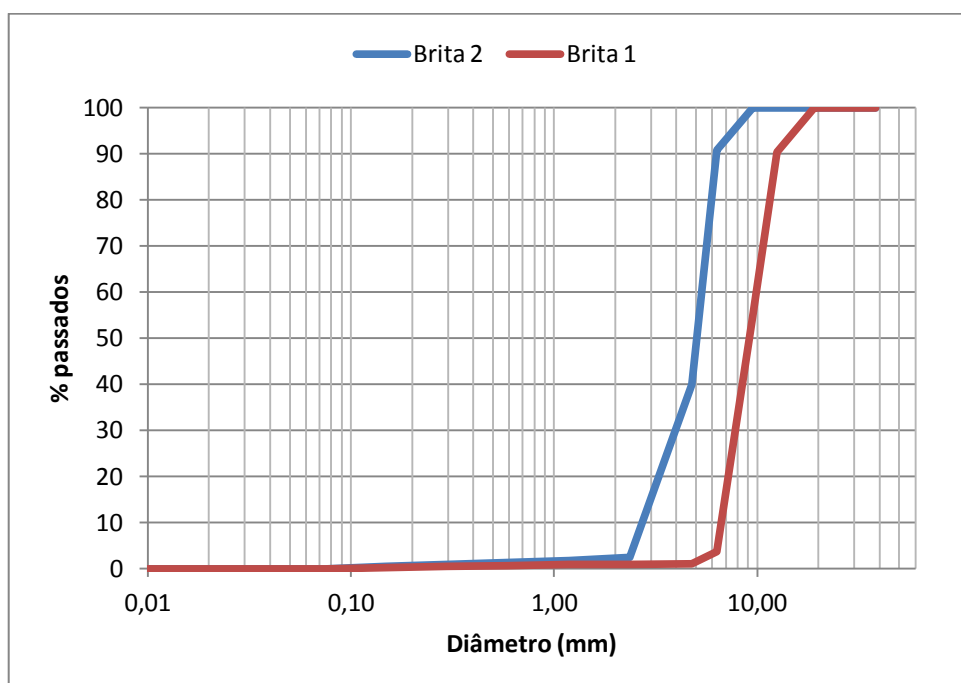
Quanto a outras características da areia, nomeadamente a baridade e massa volúmica, estimaram-se para estes parâmetros os valores de $\delta=1600 \text{ kg/m}^3$ (baridade) e $\gamma=2600 \text{ kg/m}^3$ (massa volúmica). A baridade foi obtida através do cálculo da massa num litro de areia, enquanto que a massa volúmica foi obtida pelo cálculo médio da massa num litro, retirando-se ao volume total o volume de vazios preenchidos pela água. Importa por isso referir que o conceito de baridade consiste na massa por unidade de volume aparente. Existe um requisito na NP EN 196-1, relativa a argamassas de cimento, referente à quantidade mínima de sílica de 98%; neste caso, a areia utilizada continha apenas 85%, não se sabendo a influência desta componente nos resultados.

3.1.2.2 Britas

Foram usadas dois tipos de britas; uma com um diâmetro máximo de 12,5 mm, que se denominou Brita 1 e outra com um máximo de 9,50 mm, denominada Brita 2. Ambas foram analisadas segunda a norma EN 933-1, tal como a areia, recorrendo-se apenas, neste caso, a peneiração manual. Foram analisados os resultados e obtidas as seguintes distribuições granulométricas representadas nas Figuras 3-4 e 3-5.



Figura 3-4 – Brita 1 (esquerda). Brita 2 (direita).



Quadro 3-2 – Baridade por Granulometria das britas.

Baridade dos Agregados (kg/m³)			
Brita 2,36	Brita 4,75	Brita 6,30	Brita 9,5
1158	1171	1168	1151

Quanto à massa volúmica destas britas foram consultadas as Tabelas Técnicas (Reis, Farinha, & Farinha, 2006), onde a massa volúmica correspondente a um calcário compacto corresponde a um valor de $\gamma=27 \text{ kN/m}^3$. Neste caso, após uma medição rápida, adotou-se $\gamma=28 \text{ kN/m}^3$, sendo considerandos como inertes normais, pois a sua massa volúmica está compreendida entre 20 e 30 kN/m^3 (Coutinho, 1973).

Embora a NP EN 196-1 (2006) refira o uso de um diâmetro máximo de 2 mm, acredita-se que este valor seja conservativo, e por isso consideraram-se diâmetros superiores, de até 9,50 mm. Foi ainda analisada as curvas granulométricas da totalidade das britas, no entanto, nas misturas foram apenas usados os diâmetros correspondentes a cada peneiro da curva granulométrica, até um máximo de 9,50 mm. De facto, este foi o procedimento achado mais adequado para construir as curvas granulométricas mais ajustadas à curva referência, sendo que esta consiste numa linha contínua de pontos que indicam a composição ótima do betão (Coutinho, 1973). E apesar de por vezes se referir a utilização de britas com diâmetro específico, tal não significa que os agregados tenham exatamente essas dimensões, apenas representam os agregados destas britas que ficaram retidos no peneiro com esse diâmetro. Na Figura 3-6 podem observar-se os agregados finais utilizados nas misturas.



Figura 3-6 – Agregados por diâmetro.

3.1.3 Água

A água utilizada foi a da rede pública da cidade de Coimbra, não se tendo feito qualquer análise a esta.

3.1.4 Ativadores

Consideraram-se como ativadores das misturas realizadas o Hidróxido de Sódio e o Silicato de Sódio, em que a massa volúmica utilizada nos cálculos para o ativador composto foi $\gamma=2800 \text{ kg/m}^3$. Cada um destes compostos será descrito com mais rigor nos itens abaixo.

Os ativadores foram utilizados numa proporção 1:2, sendo que o silicato utilizado correspondia sempre ao dobro da quantidade de hidróxido, juntando-se os dois compostos previamente pesados numa balança, num recipiente de vidro. A utilização deste tipo de recipiente deve-se a que na junção destes dois componentes se liberte algum calor.

3.1.4.1 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio é uma base muito forte, sendo esta definida como eletrólitos fortes que se ionizam completamente em água. É muito solúvel em água, e é usado no fabrico de sabão e de muitos compostos orgânicos e inorgânicos (Chang, 2005). Na mistura, o hidróxido de sódio tem a função de quebrar as ligações químicas dos óxidos de alumínio do ligante.

A partir da soda cáustica, numa proporção de 400 g para um 1 l de água, pode-se obter o hidróxido de sódio, na sequência da seguinte reação química:



Este tipo de reação é exotérmica, devendo ser realizada com bastante cuidado, pois como se pode ver pela expressão acima indicada, na produção de hidróxido de sódio também resulta um subproduto, o hidrogénio em estado gasoso.

3.1.4.2 Silicato de Sódio

O silicato de sódio representa o outro ativador da mistura e foi adquirido através da empresa “Sociedade Portuense de Drogas, S.A”, com a designação “Silicato de Sódio D40”. O silicato de sódio é responsável pelas ligações químicas correspondentes aos alumino-silicatos, responsáveis pela resistência da mistura.

3.2 Misturas Realizadas

Todas as misturas foram realizadas a partir de uma mistura base indicada no Quadro 3-3. Esta mistura tem uma razão ativador composto/ligante de 0,86. Com base nesta foram realizadas dois outros tipos de misturas: na primeira variou-se a quantidade de ligante e de ativador proporcionalmente; na segunda composição variou-se a quantidade e o tipo agregado.

Quadro 3-3 – Mistura base.

Mistura Inicial (g)	
Metacaulino	750
Areia	1875
Hidróxido	215
Silicato de Sódio	430

3.2.1 Alteração do Ligante

Nas primeiras composições realizadas pretendia-se compreender a influência do parâmetro do metacaulino da mistura. Assim, adicionou-se ao traço inicial as quantidades 10%, 30%, 50%, 70%, 90% e 100% de metacaulino. Na mesma proporção foram aumentadas as quantidades do ativador composto. A escolha destas percentagens foi pensada como uma forma possível para avaliar a influência do metacaulino da mistura. Poderia, e deveria ter-se considerado a possibilidade de realizar composições com frações de metacaulino da mistura base. No entanto, acreditava-se que as resistências da mistura base seriam os valores mínimos a considerar em termos estruturais.

De forma a ser mantida a consistência da mistura, por vezes, às quantidades de ativador composto previsto adicionar, foram retiradas pequenas porções, tentando-se manter uma trabalhabilidade equivalente à da mistura original. No Quadro 3.4 são indicadas as quantidades utilizadas em cada mistura, quer de metacaulino quer de ativador composto. A quantidade de areia manteve-se constante: 1875g. A mistura base é designada por *P0* e a mistura *Pi* designa a mistura com *i*% adicional de metacaulino.

Quadro 3-4 – Misturas realizadas. Parâmetro ligante.

Provetes	Metacaulino (g)	Activador (g)
P0	750	645
P10	825	710
P30	975	839
P50	1125	967
P70	1275	972
P90	1425	1081
P100	1500	1161

Embora se devesse ter efetuado cálculos no domínio do volume total a ser mantido, tal não foi feito, tendo no entanto, as misturas realizadas, um volume correspondente ao volume dos moldes utilizados, com um máximo de desperdício de cerca de 10 % da mistura total.

3.2.2 Alteração dos Agregados

Numa segunda fase, pretendia-se avaliar a influência dos agregados nas propriedades resistentes. Assim, partiu-se da mistura indicada no Quadro 3-3 e recorrendo de forma consistente aos princípios usados no betão, determinaram-se as percentagens de agregados a usar, com a finalidade de se obter uma mistura com uma granulometria o mais próxima possível da ótima. Parte-se do princípio de que já era conhecida a curva granulométrica de cada agregado, nomeadamente a da areia e a de cada brita separada nos peneiros. Neste caso, adotou-se a curva de referência de Faury, que no caso do betão permite alcançar a granulometria ótima consoante os agregados que se tem em obra, tendo ainda em consideração as condições de colocação do betão, mais precisamente a trabalhabilidade.

Importa portanto referir o que é a trabalhabilidade. De acordo com A. Coutinho (1973) consiste em todo o processo de manuseamento que o betão sofre, desde a sua produção até ao local de destino, considerando-se como pontos fulcrais a menor ou maior facilidade com que este processo ocorre.

Os parâmetros necessários para a caracterização da curva de referência de Faury são as aberturas dos peneiros e a quantidade de material retido, em que a curva de referência assume a configuração das curvas granulométricas, e em que as abcissas crescem de forma logarítmica. Assim, assumindo como origem das abcissas a dimensão 0,01, correspondente à dimensão mais pequena do agregado, e usando a equação de Faury, é possível para determinar a ordenada do ponto de abcissa $D/2$ curva ótima $P_{D/2}$, onde D indica a dimensão máxima das partículas do agregado. É a seguinte a equação de Faury (Coutinho, 1973):

$$P_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{R/D - 0,75} \quad (3.1)$$

onde A e B são parâmetros que dependem da trabalhabilidade e da energia de compactação, R é o raio médio do molde e D o diâmetro máximo do agregado.

A dimensão máxima do agregado, parâmetro fundamental na definição da curva de referência, corresponde ao diâmetro máximo efetivo dos agregados a utilizar. Ou seja, no caso de uma mistura em que usava a areia e uma brita com granulometria do peneiro 2,36 mm, o diâmetro máximo da mistura seria $D=2,36$ mm.

Outro aspeto importante que se teve em consideração na adoção das quantidades de cada agregado, para a realização das misturas, foi o volume total da mistura e a proporção de cada material, adotando-se para isso a relação já existente para o betão, com as devidas alterações

de proporções que o metacaulino respeita. A fórmula fundamental usada é a seguinte (Coutinho, 1973):

$$1 = i + e + c + v \quad (3.2)$$

em que i é a fração volúmica de agregados, e representa a fração volúmica da água, que neste caso é desempenhada pelos ativadores, c representa a fração de cimento, neste caso será o metacaulino e v o volume de vazios, tendo-se adotado para esta parcela $v_v=0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (American Concrete Institute, 2015). Este valor é indicado para agregados com uma dimensão máxima de até 9,5 mm.

Portanto, tendo em consideração os aspetos acima indicados, a percentagem ótima de cada agregado, em cada mistura que se pretendia realizar, foi estimada consoante o diâmetro D que se iria utilizar. Foram realizados quatro tipos de misturas, cujas composições de agregados são indicadas no Quadro 3-5, bem como o volume total esperado para a amostra V_{total} . Neste Quadro, B_i corresponde a uma brita de dimensão i . A quantidade de metacaulino foi sempre a mesma, isto é, 750g. Tal como no caso anterior, por vezes, às quantidades de ativador composto previsto adicionar, foram retiradas pequenas porções, tentando-se manter uma trabalhabilidade equivalente à da mistura original.

Quadro 3-5 – Misturas realizadas. Parâmetro granulometria.

	Metacaulino (g)	Ativador (g)	Areia (g)	B 2,36 (g)	B 4,76 (g)	B 6,30 (g)	B 9,5 (g)	V_{total} (dm^3)
1. ^a Mistura	750	572	920	1313	0	0	0	1,58
2. ^a Mistura	750	577	1071	504	525	0	0	1,55
3. ^a Mistura	750	565	1050	105	420	525	0	1,54
4. ^a Mistura	750	570	1013	148	211	317	422	1,54

Nas Figuras 3-7 a 3-10 estão representadas as distribuições granulométricas para cada mistura, bem como as curvas granulométricas dos agregados que as compõem e a curva de Faury, considerada como ótima. Consegue-se observar que a das curvas das misturas obtidas com a curva de referência de Faury não é completa, devido a que a granulometria da areia não possui finos suficientes para os diâmetros inferiores. No entanto, pensa-se ter conseguido uma boa aproximação teórica à curva de referência tendo em conta os materiais utilizados.

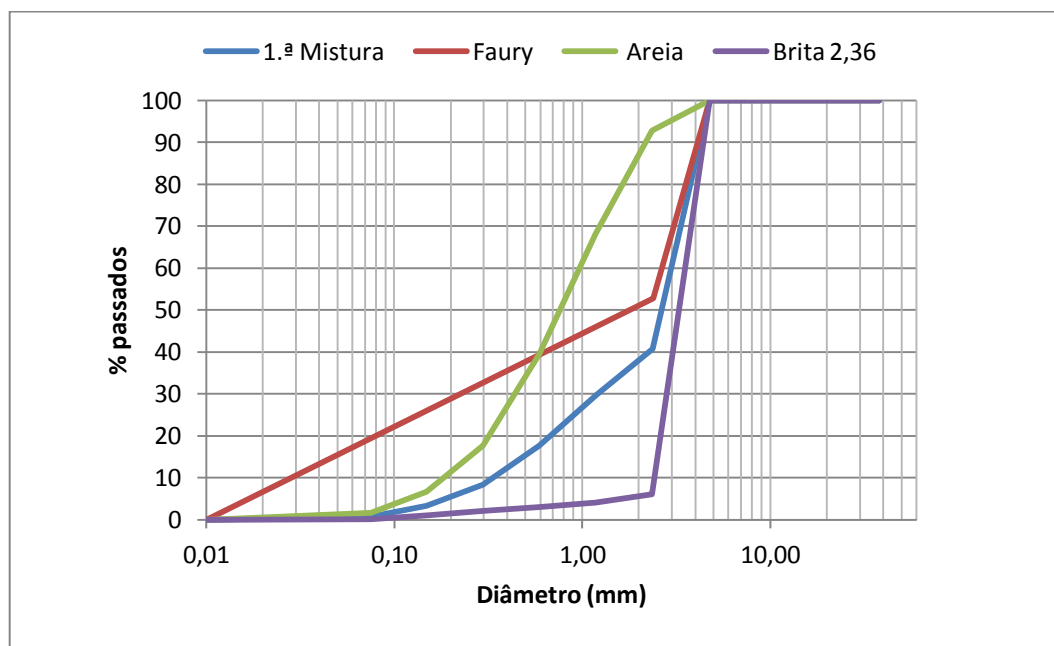


Figura 3-7 – Curvas granulométricas e de referência para a 1.ª Mistura.

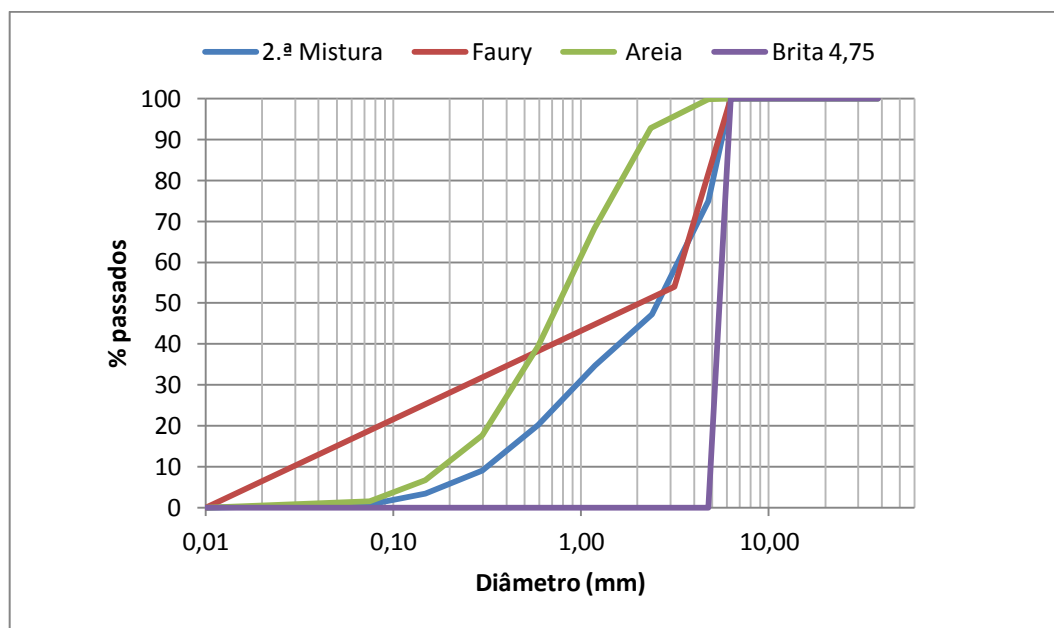


Figura 3-8 – Curvas granulométricas e de referência para a 2.ª Mistura.

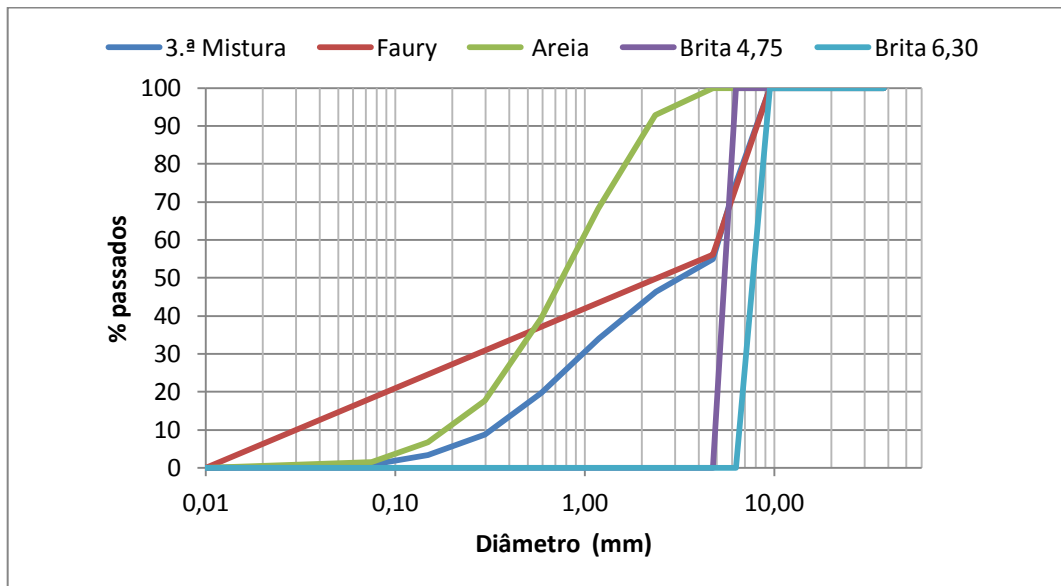


Figura 3-9 – Curvas granulométricas e de referência para a 3.ª Mistura.

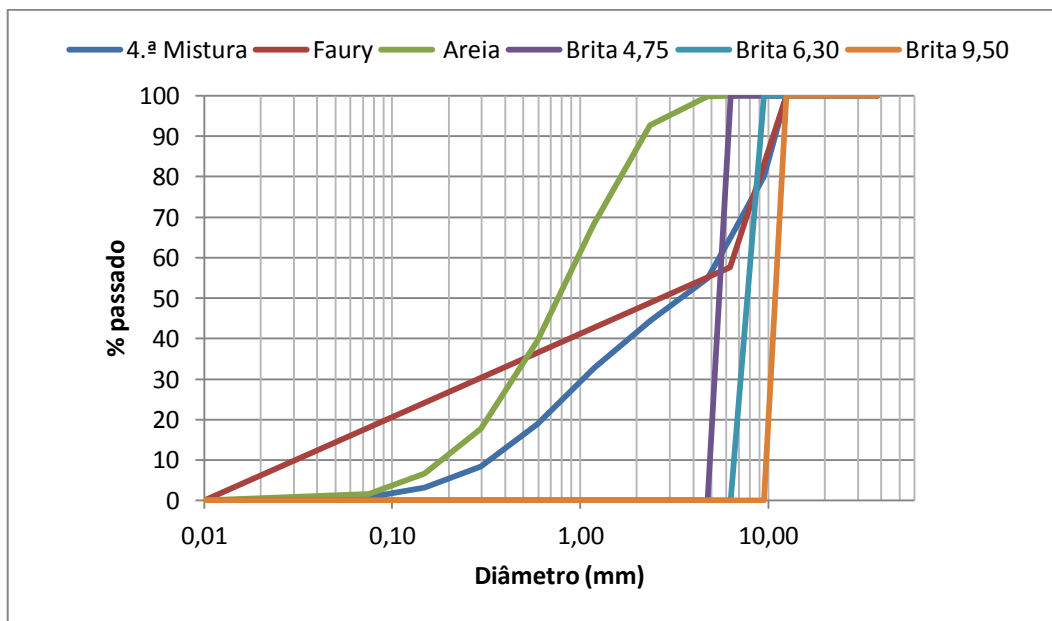


Figura 3-10 – Curvas granulométricas e de referência para a 4.ª Mistura.

3.3 Metodologia de produção das misturas com diferentes agregados

Para a produção dos provetes seguiram-se os procedimentos recomendados pelas normas NP EN 196-1 (2006) e NP EN 12390-5 (2009), bem como as recomendações de alguns autores que têm sido referenciados, tais como A. Coutinho e A. Pinto. Utilizou-se uma balança, com precisão de até 0,01 g, onde foram pesados os materiais a utilizar, e a mistura foi efetuada com recurso a uma misturadora, ilustrada na Figura 3-11. No recipiente da mistura foram colocados em primeiro lugar os agregados. De seguida foi-se juntando o metacaulino e o ativador composto mantendo a misturadora ligada até que a mistura obtivesse a trabalhabilidade desejada (Figura 3-12).

Importa recordar que, embora a norma NP EN 196-1 indicasse que para a realização deste tipo de misturas devesse ter sido usada uma areia com diâmetro inferior a 2 mm, tal não foi cumprido. Por outro lado, as misturas referentes à alteração dos agregados utilizados foram realizadas segundo a metodologia indicada acima, com exceção da 4.^a mistura, composta com agregados de diâmetro máximo igual a 9,5 mm, que foi parcialmente realizada com a ajuda da misturadora, sendo a ordem com que foram adicionados os compostos a mesma, mas os agregados mais grossos, com diâmetro 6,30 e 9,50, foram misturados no fim, manualmente.



Figura 3-11 – Misturadora (esquerda). Realização da mistura (direita).



Figura 3-12 – Consistência da mistura com alteração das quantidades de ligante (esquerda) e de agregados (direita).

Todos os moldes utilizados foram previamente “pintados” com isolador eletrônico e envoltos em filme plástico (Figura 3-13), adotando-se assim materiais que não interferissem com o processo de cura da mistura e que ajudassem a desmoldagem dos provetes. Antes de se colocarem as misturas nos moldes foi utilizada uma espátula para espalhar e alisar a argamassa e ainda uma mesa vibratória que foi acionada durante aproximadamente um minuto para cada molde, garantindo assim uma adequada compactação e eliminação de vazios (Figura 3-13).



Figura 3-13 – Moldes utilizados (esquerda). Mesa vibratória e espátula (direita).

Os moldes de 3 provetes cada, permitem construir provetes com as dimensões já referidas de 40 mm × 40 mm × 160 mm. O processo de cura decorreu em ambiente controlado, com uma temperatura média de 20°C e uma humidade de cerca de 60%, mantendo-se neste local até à

data da realização dos ensaios. De acordo com a NP EN 196-1 para argamassas, os provetes podem ser retirados dos moldes após 24 horas. Neste caso apenas foram retirados dos moldes após 48 horas. Como foram realizadas várias misturas, adotou-se a seguinte nomenclatura para facilitar a sua referência: (i) os grupos correspondentes a percentagem de metacaulino, ou aos agregados utilizados foram organizados por ordem alfabética/agregados utilizados, organizados por ordem numérica e (ii) a numeração sequencial dos provetes de cada grupo foi organizada por ordem numérica. Na Figura 3-14 à esquerda podem visualizar-se os provetes obtidos para a mistura corresponde à adição de 50% de ligante, isto é, P50, enquanto que à imagem da direita corresponde a mistura com a dimensão máxima 9,51 mm.

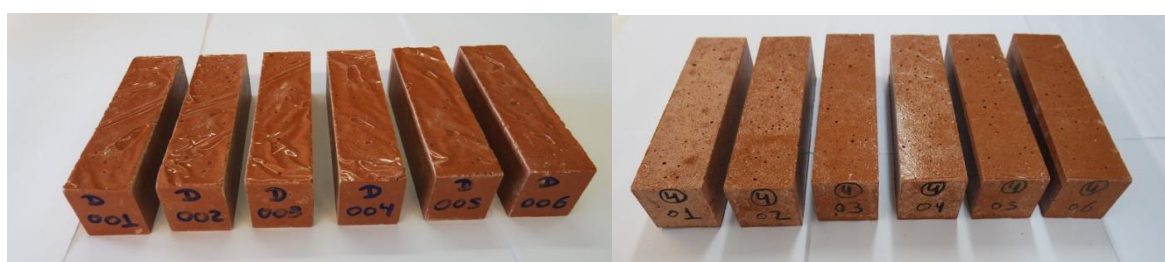


Figura 3-14 – Provetes P50 e 4.^a mistura.

No total foram construídos doze grupos de 6 provetes cada, correspondendo a 66 ensaios de tração por flexão e 132 ensaios à compressão.

3.4 Ensaios Experimentais

Tal como referido, foram realizados dois tipos de ensaios: um ensaio à tração por flexão e um outro à compressão. Estes ensaios permitem avaliar as características resistentes na rotura em termos de tensão resistente à tração por flexão e de tensão resistente à compressão. A rotura é definida em termos de engenharia consoante três aspetos principais: i) separação de um sólido contínuo em dois ou mais pedaços distintos (fratura); ii) a carga máxima suportada por uma peça solicitada de maneira geometricamente fixa e iii) o estado de deformação ou fissuração de tal modo excessivo que o material não seja mais utilizado (Coutinho & Gonçalves, 1994). Nestes ensaios, os casos i) e ii) ocorrem no ensaio de tração por flexão, enquanto que no ensaio de compressão se verificam os casos ii) e iii).

Por estar associado a um estado limite, no cálculo das tensões de rotura dependem de diversos parâmetros tais como a forma do provete, a idade, o tipo de conservação, as condições com que se fazem as distribuições das forças aplicadas, das tensões iniciais, da velocidade de aplicação da carga, entre tantos outros (Coutinho & Gonçalves, 1994). Neste trabalho, tem-se vindo a especificar as condições relativas aos provetes; misturas, condições e tempo de cura, etc. interessa agora abordar as metodologias de ensaio.

3.4.1 Ensaaios de resistência à tração por flexão

Os ensaios de resistência à tração (NP EN 12390-5, 2009) permitem avaliar a tensão de rotura à tração por flexão, o que por sua vez indica a continuidade do material sem apresentar fissuração exagerada. Antes de se realizarem os ensaios, os provetes foram medidos, pesados e as arestas foram polidas, para que quando fossem ensaiados a superfície fosse o mais plana possível de modo a garantir a uniformidade das ações a aplicar.

O esquema do ensaio pode ser visto na Figura 3-15. Na parte inferior do provete era colocada uma placa metálica onde se encontravam dois cilindros em aço para apoio do provete. Estes dois cilindros encontram-se distanciados, nos seus eixos, de aproximadamente 150 mm. Na parte superior do provete existia outra placa de aço, com outros dois cilindros, responsáveis pela aplicação da ação. O esquema de ensaio, vulgarmente conhecido por ensaio de 4 pontos, foi definido de modo a garantir 3 tramos de igual comprimento.

Sob a chapa metálica inferior, e sobre a chapa metálica superior, foram ainda utilizadas borrachas de forma a amortecer possíveis impulsos, para além de permitirem uma distribuição mais uniforme da ação. Todo este conjunto era então encaixado numa prensa, responsável pela aplicação da ação programada. Importa referir que o apoio inferior da prensa estava fixo, enquanto que o superior era parcialmente rotulado, possibilitando assim um paralelismo entre os correspondentes pratos, podendo, no caso de existir algum empenamento, este ser compensado pela ligação rotulada. A exatidão da prensa era de aproximadamente (0,1kN, 0,01mm).

Neste ensaio, programado para ser um ensaio com controlo de deformação, a deformação era imposta a uma dada velocidade, pelo prato inferior da prensa, sendo depois avaliada a resistência à flexão consoante a carga de rotura máxima registada F . A expressão utilizada para o cálculo do valor da tensão resistente à tração por flexão f_{cf} é:

$$f_{cf} = \frac{F \times I}{d_1 \times d_2^2} \quad (3.3)$$

em que I representa a distância entre os roletes inferiores do apoio; e d_1 corresponde à largura e d_2 à altura do provete. Ao longo deste documento, f_{cf} será substituído por f_t ; e F por F_t .

A aplicação da ação foi realizada através do controlo da velocidade de deformação. Como objectivo, pretendia-se realizar um ensaio estático, isto é, sem efeitos dinâmicos a salientar. Para tal, previa-se a duração mínima de 3 minutos. Neste contexto, foi idealizada uma metodologia a concretizar em duas fases: na primeira fase, para anular rapidamente o espaço deixado vago na colocação do provete, a deformação era aplicada a uma velocidade de inicial

de 0,06 mm/s, até se atingir uma carga próxima dos 5% da carga total esperada, ou seja, até uma pré carga de 0,1 kN. De seguida, na segunda fase, a velocidade era alterada para 0,006 mm/s até se encontrar a carga de rotura.

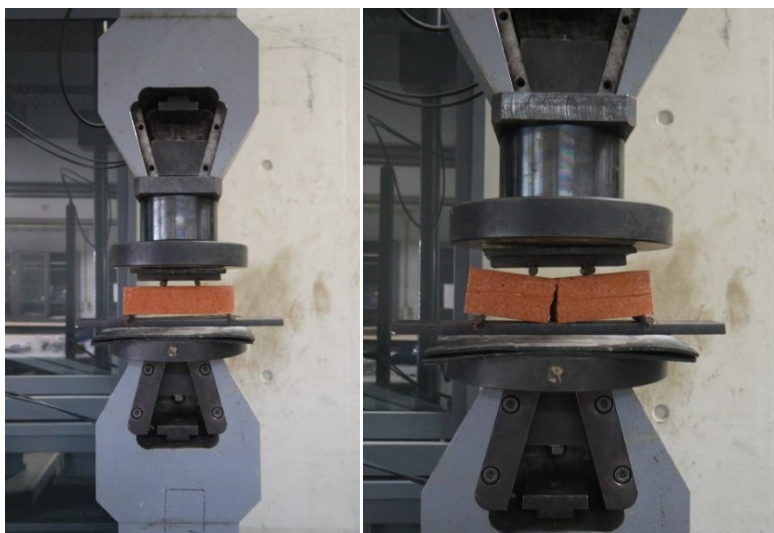


Figura 3-15 – Ensaio à tração por flexão.

Na Figura 3-16 pode ser observado um conjunto de provetes após ensaio à tração por flexão, em que o produto final mostra uma rotura bem definida, embora não simétrica face ao prisma original. Isto deve-se ao que já foi referido, nomeadamente à não uniformidade perfeita dos prismas, para além de que qualquer imperfeição a centrar o dispositivo teria como resultado algum desvio na posição da superfície de rotura. De qualquer modo, as superfícies de rotura sucederam-se sempre entre os cilindros centrais, adquirindo um aspeto muito próximo de uma superfície plana.

Outro aspeto que se pode visualizar na figura 3-16 consiste na fragmentação dos agregados, mais visíveis nos de maiores dimensões, pois quando ocorreu a rotura, estes não se soltaram e mantiveram a sua coesão na mistura, o que demonstra uma boa aderência dos agregados à mistura.



Figura 3-16 – Provetes após rotura à tração por flexão (esquerda). Pormenor da superfície de rotura (direita).

Pelo contrário nos ensaios das misturas com a variante agregado, o tipo de superfície de rotura era diverso. De facto os agregados já não mantinham a sua aderência com o resto da mistura, sendo visível a separação dos agregados de maiores dimensões. Daí que a superfície de rotura não tenha sido plana e tomasse formas aleatórias, tal como é exemplificado na Figura 3- 17.



Figura 3-17 – Superfície de rotura do ensaio à tração por flexão numa mistura com britas.

3.4.2 Ensaio à compressão

Como se pode constatar na Figura 3-16, do ensaio à tração por flexão de um provete resultaram duas “metades”, que constituíam os provetes para ensaio posterior à compressão. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011), recorrendo a um dispositivo de compressão (Figura 3-18), colocado entre os pratos da prensa. Cada semi-provete era então colocado no dispositivo de compressão, entre os pratos interiores de 40mm×40mm de área Ac. Entre os pratos da prensa e o dispositivo referido, também foram colocadas borrachas para amortecerem possíveis impulsos. O procedimento de ensaio também foi realizado em duas fases: na primeira aplicou-se uma pré-carga, à velocidade de 0,1 mm/s, até 5% da carga máxima; na segunda fase, a velocidade foi alterada para 0,007 mm/s, até à

rotura do provete. Pretendia-se igualmente que cada ensaio durasse pelo menos 3 minutos. Neste caso, o tempo de aplicação da ação foi bastante mais longo do que nos ensaios à flexão. Importa ainda referir que este tipo de ensaio é considerado destrutivo, uma vez que o provete fica inutilizado.

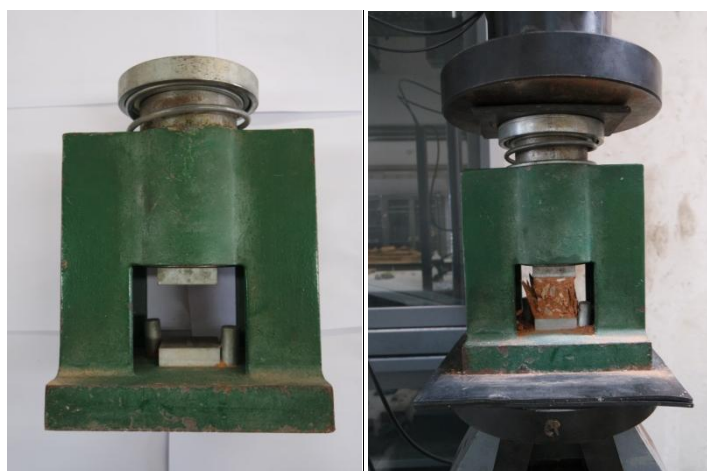


Figura 3-18 – Dispositivo de compressão. Ensaio à compressão.

Conhecida a força máxima aplicada F , do registo efetuado, a tensão resistente à compressão f_c pode ser avaliada recorrendo à seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.4)$$

Ao longo deste documento, por F foi substituída por F_c .

Para avaliar o tipo de rotura sofrido pelos semi-prismas foram utilizados os tipos de rotura dados como satisfatórios pela norma acima referida, avaliando-se assim a fidelidade em termos físicos dos resultados. Na Figura 3-19 podem ser observadas as roturas aceitáveis (NP EN 12390-3, 2011) e na Figura 3-20 o tipo de roturas obtidas nos ensaios.

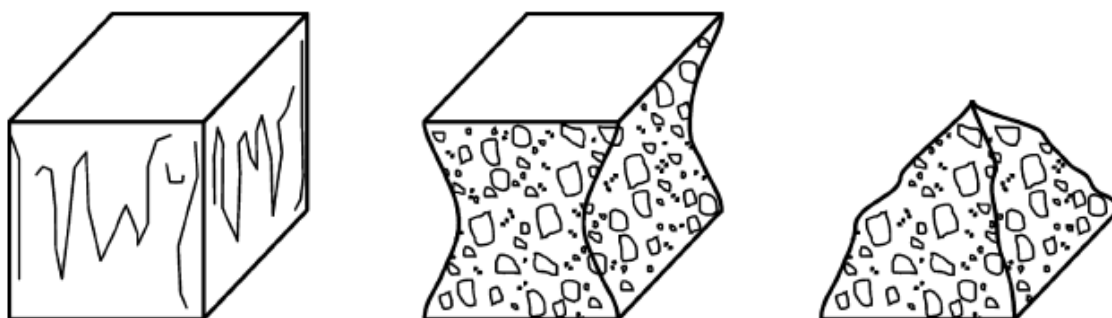


Figura 3-19 – Roturas aceitáveis dos provetes. Ensaio de compressão.



Figura 3-20 – Roturas obtidas. Ensaio de compressão.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 Influência da quantidade de ligante

Nesta seção serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios à tração por flexão e à compressão dos provetes construídos, tendo-se modificado os parâmetros quantidade de ligante e de ativador, com adição ao traço inicial de 10%, 30%, 50%, 70%, 90% e 100% de metacaulino, tal como foi referido no Capítulo 3. Os ensaios foram ainda realizados segundo as normas indicadas no Capítulo 2 e cujos requisitos de cálculo foram explicitados no Capítulo 3, donde se obtiveram as tensões de rotura de tração σ_t e de compressão σ_c .

Para avaliar as tensões resistentes, os provetes foram curados durante o prazo mínimo de 15 dias e um máximo de 47 dias. Tal como foi mostrado no Capítulo 2, após 48 horas o tempo de cura não é um parâmetro preponderante na obtenção da resistência. No Quadro 4-1 é indicada a calendarização dos trabalhos realizados relativamente aos provetes utilizados para avaliar a influência da quantidade de ligante, em particular o dia de realização da mistura, o dia de realização do ensaio e o número de dias de cura. A designação utilizada para os provetes é P_i , onde i indica a adição em percentagem de ligante na mistura.

Quadro 4-1 – Calendarização dos trabalhos. Parâmetro ligante.

Provete	Dia Mistura	Dia Ensaio	Cura (dias)
P0	25-Mar	09-Abr	15
P10	25-Mar	09-Abr	15
P30	10-Abr	07-Mai	27
P50	14-Abr	07-Mai	23
P70	04-Mai	01-Jun	28
P90	04-Mai	01-Jun	28
P100	14-Mai	30-Jun	47

Nos Quadros 4-2 a 4-5 estão representados os dados de cada provete consoante o tipo de mistura realizada, indicando-se as medidas de largura b e altura h , a massa M_p e a baridade γ , bem como as suas médias M_{p_i} , e desvio padrão, σ_i , em que i indica a variável analisada. É de realçar que o desvio padrão dos resultados é quase sempre inferior a 1% do valor médio,

exceto em 2 casos; nas massas dos provetes *P0* onde o desvio foi inferior a 1,5% e na massa dos provetes *P50* onde o desvio foi inferior a 1,05%. Estes valores comprovam a boa qualidade dos provetes utilizados. Para a globalidade dos itens ensaiados, construídos em dias diferentes, pode constatar-se no Quadro 4-6 que os desvios globais são da ordem de 1%. Relativamente às dimensões verifica-se que oscilam entre um mínimo de $b=39,7$ mm e $h=40,1$ mm e um máximo de $b=41,0$ mm e $b=40,0$ mm. A dimensão b foi construída na direção vertical, e portanto é aquela que mais pode variar. Ainda assim, o desvio vale 1,3 mm, ou seja, 3,25% da dimensão pretendida. Os valores h são quase iguais.

Quadro 4-2 – Características dos provetes *P0* e *P10*.

Provete P0	b ; h (mm;mm)	M_p (g)	γ (kg/m ³)	Provete P10	b ; h (mm;mm)	M_p (g)	γ (kg/m ³)
1	40,5 ; 40,1	527	203	1	40,6 ; 40,1	533	205
2	40,6 ; 40,1	528	203	2	40,6 ; 40,0	531	204
3	40,3 ; 40,1	522	202	3	40,5 ; 40,0	534	206
4	41,0 ; 40,0	541	206	4	40,4 ; 40,0	535	207
5	40,6 ; 40,0	534	205	5	40,4 ; 40,1	539	208
6	40,8 ; 40,1	544	208	6	40,7 ; 40,1	542	208
M_{pi}	40,6 ; 40,1	533	205	M_{pi}	40,6 ; 40,1	536	206
σ_i	0,22 ; 0,03	7,78	2,07	σ_i	0,11 ; 0,04	3,74	1,44

Quadro 4-3 – Características dos provetes *P30* e *P50*.

Provete P30	b ; h (mm;mm)	M_p (g)	γ (kg/m ³)	Provete P50	b ; h (mm;mm)	M_p (g)	γ (kg/m ³)
1	40,6 ; 40,0	534	205	1	40,5 ; 40,1	541	209
2	40,4 ; 40,1	532	206	2	40,9 ; 40,0	542	207
3	40,7 ; 40,0	537	206	3	40,3 ; 40,1	539	209
4	40,7 ; 40,1	537	206	4	40,5 ; 40,1	529	204
5	40,4 ; 40,1	532	206	5	39,7 ; 40,1	528	207
6	40,2 ; 40,1	534	207	6	40,1 ; 40,1	536	208
M_{pi}	40,5 ; 40,1	534	206	M_{pi}	40,3 ; 40,1	536	207
σ_i	0,18 ; 0,03	2,04	0,60	σ_i	0,37 ; 0,03	5,60	1,70

Quadro 4-4 – Características dos provetes P70 e P90.

Provete P70	b ; h (mm;mm)	Mp (g)	γ (kg/m ³)	Provete P90	b ; h (mm;mm)	Mp (g)	γ (kg/m ³)
1	40,6 ; 40,0	520	200	1	40,0 ; 40,0	523	204
2	40,5 ; 40,0	524	202	2	40,2 ; 40,1	523	203
3	40,4 ; 40,0	528	204	3	40,3 ; 40,0	520	202
4	40,8 ; 40,1	527	202	4	40,9 7 ; 40,0	520	199
5	40,8 ; 40,1	522	200	5	40,8 ; 40,0	527	202
6	40,5 ; 40,0	521	201	6	40,8 ; 40,0	524	201
M_{pi}	40,6 ; 40,03	524	201	M_{pi}	40,5 ; 40,0	523	202
σ_i	0,15 ; 0,02	3,00	1,47	σ_i	0,35 ; 0,02	2,17	1,65

Quadro 4-5 – Características dos provetes P100.

Provete P100	b ; h (mm;mm)	Mp (g)	γ (kg/m ³)
1	40,4 ; 40,0	530	205
2	40,5 ; 40,0	527	203
3	40,8 ; 40,0	528	202
4	40,6 ; 40,1	523	201
5	40,6 ; 40,0	525	202
6	40, 8 ; 40,0	526	202
M_{pi}	40,6 ; 40,0	527	203
σ_i	0,16 ; 0,02	2,15	1,29

Quadro 4-6 – Quadro de dados geométricos da totalidade de provetes.

	b ; h (mm;mm)	Mp (g)	γ (kg/m ³)
Mg	40,5 ; 40,1	530	204
σ_g	0,09 ; 0,02	5,34	2,19

Outro parâmetro avaliado foi a baridade, registrando-se uma média mínima dos seis provetes de 201 kg/m³, para as misturas com 70% de adição de ligante, e uma média máxima de 207 g para as misturas com 50% de adição. Este intervalo é inferior a 3% do valor médio. Na Figura

4-1 são apresentados os valores médios da baridade γ dos provetes em função da percentagem do ligante adicional da mistura. Pode verificar-se que os quatro primeiros conjuntos têm baridades semelhantes, e os restantes três também, o que não evidência qualquer tendência lógica de variação de baridade em função da percentagem de ligante adicionado. Contudo, a distância da média ao valor mais afastado vale $1,38\sigma$, o que pode ser considerado globalmente como muito bom.

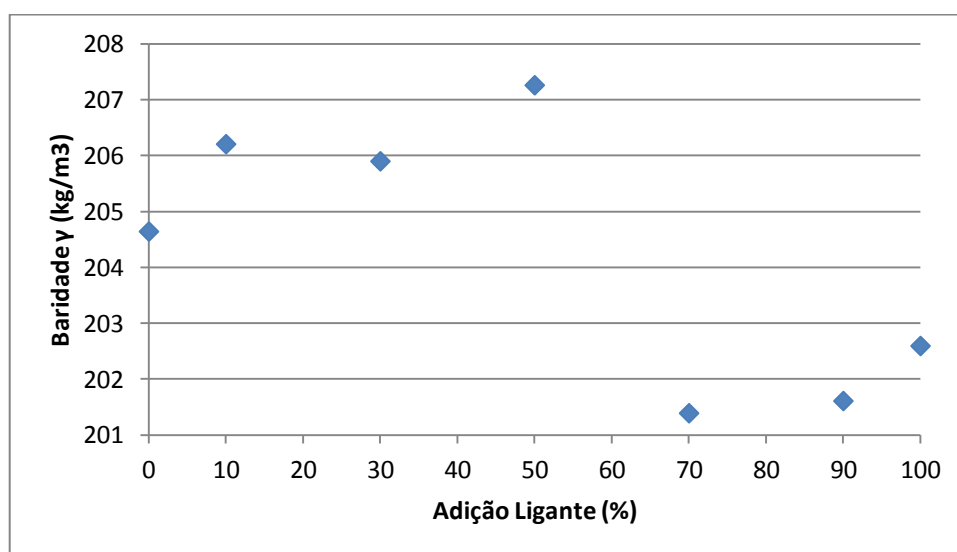


Figura 4-1 – Baridade média das misturas.

No decurso do processo de realização das misturas foram observadas certas peculiaridades, sendo a mais notória a dificuldade de eliminação dos vazios à medida que a percentagem de ligante ia aumentando, pois com o aumento deste parâmetro também era aumentada a fase líquida da mistura e a viscosidade diminuía. Isto acontece porque num sólido as moléculas mantêm-se próximas e organizadas, com quase nenhuma liberdade de movimento, enquanto num líquido as moléculas passam a ter mais liberdade de movimento e não mantêm uma posição rígida. Tendo em consideração os resultados apresentados anteriormente na Figura 4-1, este aspeto poderá constituir uma justificação para que os provetes com maior quantidade de metacaulino tenham apresentado menores baridades. Mas, tal como ficou expresso, não ficou clara essa evidência. Com o aumento da percentagem de ligante na mistura, a eliminação dos vazios foi tornando-se mais difícil, pelos motivos descritos, tendo-se aumentado gradualmente a duração da vibração das misturas, mas em apenas alguns segundos. Durante a vibração das últimas misturas, era visível o aumento das bolhas de ar expurgadas. Apesar de tudo, foram ainda observados alguns vazios, que permaneceram nas misturas de todos os provetes, tanto nas faces exteriores como no interior, tal como se pode visualizar na Figura 4-2.

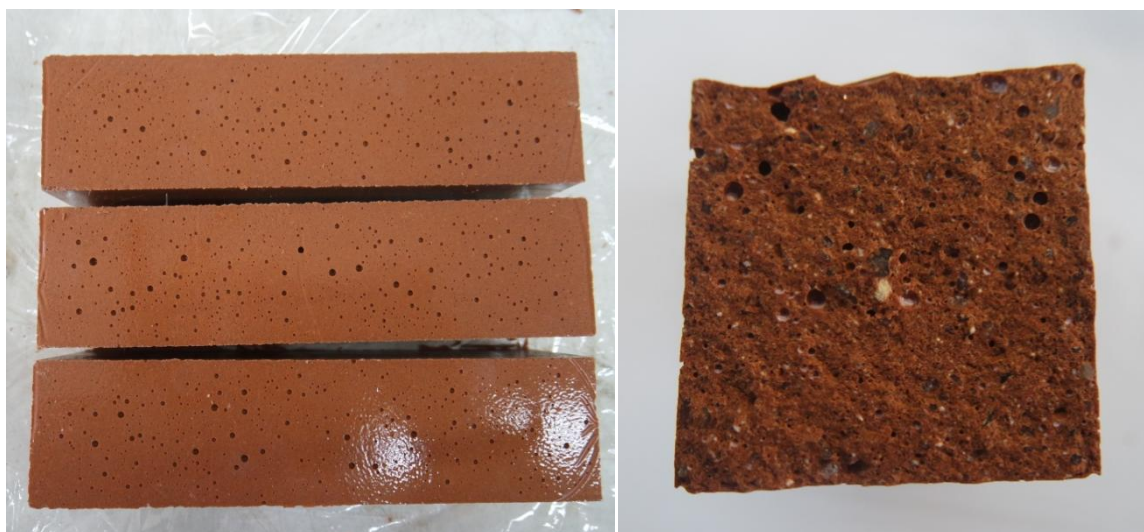


Figura 4-2 – Vazios dos provetes nas faces exteriores e no interior.

4.1.1 Ensaio à tração por flexão

No ensaio à tração por flexão, executado de acordo com a NP EN 12390-5 (2009), tal como foi descrito anteriormente, importa apurar a força máxima F_{fi} a que o provete i consegue resistir. Com base na expressão (3.1), é possível avaliar o valor da tensão resistente à tração por flexão f_{fi} do mesmo provete.

Nos Quadros 4-7 a 4-9 são expostos os resultados individuais do ensaio de resistência à tração por flexão das misturas $P0$ a $P100$ realizadas. São ainda indicados, nas duas últimas linhas, a média M_i e o desvio padrão σ_i dos resultados apurados.

Quadro 4-7 – Tensão resistente à tração das misturas $P0$, $P10$ e $P30$.

Provete P0	F_{fi} (kN)	f_{fi} (MPa)	Provete P10	F_{fi} (kN)	f_{fi} (MPa)	Provete P30	F_{fi} (kN)	f_{fi} (MPa)
1	2,39	5,51	1	2,11	4,84	1	1,99	4,59
2	2,32	5,33	2	1,99	4,59	2	1,95	4,51
3	2,63	6,10	3	2,05	4,74	3	2,2	5,06
4	2,48	5,67	4	2,35	5,45	4	2,27	5,21
5	1,99	4,59	5	2,3	5,31	5	2,28	5,28
6	2,15	4,92	6	2,38	5,46	6	2,01	4,67
M_i	2,33	5,35	M_i	2,20	5,07	M_i	2,12	4,89
σ_i	0,21	0,49	σ_i	0,15	0,35	σ_i	0,14	0,31

Quadro 4-8 – Tensão resistente à tração das misturas *P50*, *P70* e *P90*.

Provete P50	F_{ti} (kN)	f_{ti} (MPa)	Provete P70	F_{ti} (kN)	f_{ti} (MPa)	Provete P90	F_{ti} (kN)	f_{ti} (MPa)
1	2,11	4,87	1	2,06	4,76	1	2,36	5,53
2	2,42	5,54	2	2,01	4,65	2	2,16	5,02
3	2,07	4,80	3	1,89	4,38	3	2,27	5,28
4	2,13	4,91	4	2,03	4,66	4	2,32	5,32
5	1,81	4,25	5	2,23	5,11	5	2,14	4,91
6	2,08	4,84	6	2,06	4,76	6	2,3	5,28
M_i	2,10	4,87	M_i	2,05	4,72	M_i	2,26	5,22
σ_i	0,18	0,37	σ_i	0,10	0,22	σ_i	0,08	0,20

Quadro 4-9 – Tensão resistente à tração da mistura *P100*.

Provete P100	F_{ti} (kN)	f_{ti} (MPa)
1	1,82	4,23
2	2,22	5,13
3	2,07	4,75
4	2,21	5,10
5	2,05	4,73
6	2,17	4,99
M_i	2,09	4,82
σ_i	0,14	0,31

Observa-se um máximo da força de tração $F_t=2,63$ kN, a que corresponde a tensão resistente máxima de $f_t=6,10$ MPa para a mistura inicial *P0*. O mínimo de força $F_t=1,81$ kN ocorre para a mistura com 50% de adição. No entanto, a tensão resistente mínima ocorre para a mistura com adição de 100%, valendo $f_t=4,23$ MPa. Por outro lado, os desvios apresentados são sempre inferiores a 10% relativamente aos valores médios correspondentes. Por vezes, inferiores a 5%, o que indica que a qualidade dos provetes era muito boa. Para além disso, a maior diferença entre valores da resistência à tração relativamente à média é cerca de $1,52\sigma$, o que atesta a muito boa qualidade dos provetes.

Na Figura 4-4 encontram-se os valores médios da tensão resistente à tração por flexão das misturas, f_{tm} , em função da percentagem de adição de ligante face à mistura inicial. Verifica-

se que a tensão média máxima apurada foi $f_{tm}=5,35$ MPa, obtida para a mistura sem adição de ligante, enquanto que o mínimo registado ocorreu para a adição de 70% de ligante, com $f_{tm}=4,72$ MPa. A diferença entre estes extremos, de 0,63 MPa, equivalente a uma força de cerca de 0,27 kN. Pode ainda ser observada a linha de tendência face aos resultados obtidos para a tensão de rotura à tração, notando-se que as tensões tendem a decrescer com o aumento da adição de ligante, a uma taxa de 5,18%. Este decréscimo é apenas alterado para a mistura P90, que tem um aumento de 5% face ao valor médio, o que significa um valor baixo de variação.

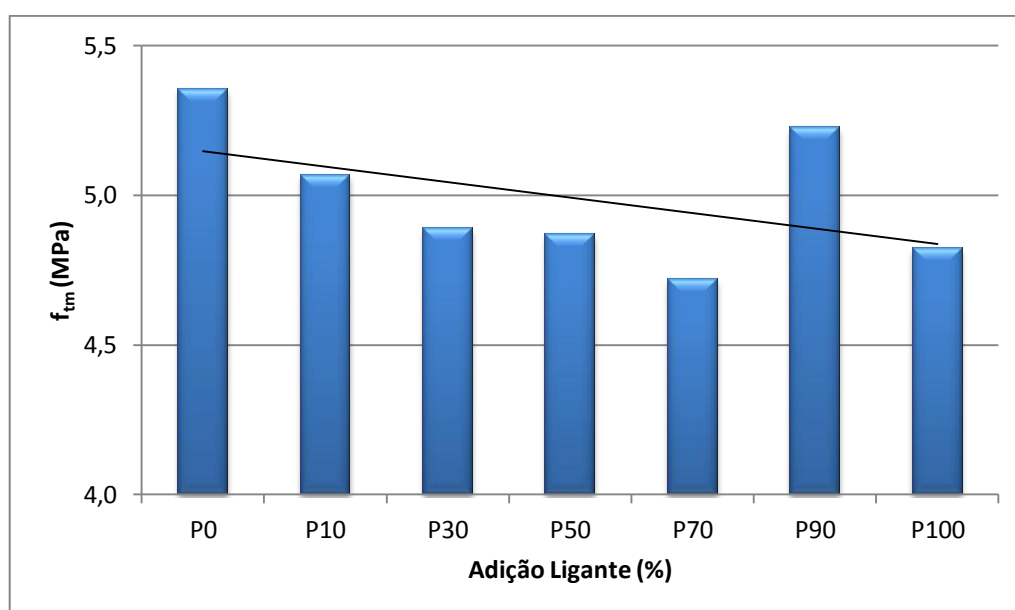


Figura 4-3 – Valores médios da tensão resistente à tração por flexão. Percentagem de ligante.

No Quadro 4-10 são expostos os resultados globais da análise conjunta das sete misturas, estimando-se a média Mg , o desvio padrão σ_g , e o coeficiente de variação Cvg do conjunto. Estes valores servem de complemento à Figura 4-4. O reduzido valor de 4,3% para o coeficiente de variação indicia que os valores estão muito próximos uns dos outros.

Quadro 4-10 – Resultados globais das misturas para a resistência à tração por flexão.

	F_{tm} (kN)	f_{tm} (MPa)
Mg	2,2	4,99
σ_g	0,09	0,21
Cvg	4,3%	4,3%

Pode ainda ser observado no Quadro 4-11 o coeficiente de variação para as tensões de tração, estando associado a estes valores de desvio, um máximo de 9,2% relativamente à média, o que representa muito pouco, o que indica que os resultados obtidos experimentalmente poderão ser aceites, com uma margem de erro baixa.

Quadro 4-11 – Coeficiente de variação da tensão resistente à tração por flexão.

Provete	f_{tm} (MPa)	Cv
P0	5,35	9,2%
P10	5,07	7,0%
P30	4,89	6,3%
P50	4,87	7,7%
P70	4,72	4,6%
P90	5,22	3,9%
P100	4,82	6,4%

4.1.2 Ensaio à compressão

Tal com referido no Capítulo 3, os ensaios de compressão foram realizados sobre as 12 metades resultantes do ensaio de tração por flexão. O valor da tensão resistente à compressão f_{ci} do provete i foi determinado segunda as indicações referidas no Capítulo 3. Denominou-se de $f_{ci} 1$ o valor correspondente à parte maior e de $f_{ci} 2$ o valor correspondente à parte menor, consoante a divisão face ao provete inicial. Os resultados apurados para os provetes $P0$ a $P100$ estão expostos nos Quadros 4-12 a 4-15.

Quadro 4-12 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas *P0* e *P10*.

Provete P0	F_{ci}1 (KN)	f_{ci}1 (MPa)	F_{ci}2 (KN)	f_{ci}2 (MPa)	Provete P10	F_{ci}1 (KN)	f_{ci}1 (MPa)	F_{ci}2 (KN)	f_{ci}2 (MPa)
1	55,0	33,8	56,0	34,5	1	52,3	32,1	54,1	33,2
2	55,3	34,0	54,0	33,1	2	56,1	34,5	55,0	33,9
3	57,1	35,4	54,8	34,0	3	46,4	28,6	51,3	31,6
4	56,1	34,2	54,6	33,3	4	55,1	34,1	56,6	35,0
5	54,9	33,8	52,8	32,5	5	56,4	34,8	54,3	33,5
6	57,8	35,4	54,6	33,4	6	53,5	32,8	54,4	33,4
M_i	56,0	34,4	54,5	33,5	M_i	53,3	32,8	54,3	33,4
σ_i	1,11	0,69	0,96	0,63	σ_i	3,39	2,11	1,56	1,00
Cv	2,0%	2,0%	1,8%	1,9%	Cv	6,4%	6,4%	2,9%	3,0%

Quadro 4-13 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas *P30* e *P50*.

Provete P30	F_{ci}1 (KN)	f_{ci}1 (MPa)	F_{ci}2 (KN)	f_{ci}2 (MPa)	Provete P50	F_{ci}1 (KN)	f_{ci}1 (MPa)	F_{ci}2 (KN)	f_{ci}2 (MPa)
1	60,0	36,9	59,1	36,4	1	66,9	41,2	56,8	35,0
2	64,9	40,1	58,9	36,4	2	60,8	37,2	61,2	37,4
3	66,7	41,0	65,9	40,5	3	67,9	42,1	63,9	39,6
4	55,0	33,7	63,9	39,2	4	69,2	42,6	63,8	39,3
5	65,3	40,4	62,5	38,6	5	68,9	43,2	68,0	42,7
6	61,8	38,4	58,5	36,3	6	61,9	38,5	67,4	41,9
M_i	62,3	38,4	61,4	37,9	M_i	65,9	40,8	63,5	39,3
σ_i	3,96	2,50	2,81	1,62	σ_i	3,31	2,21	3,76	2,59
Cv	6,4%	6,5%	4,6%	4,3%	Cv	5,0%	5,4%	5,9%	6,6%

Quadro 4-14 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas *P70* e *P90*.

Provete P70	F _{ci} 1 (KN)	f _{ci} 1 (MPa)	F _{ci} 2 (KN)	f _{ci} 2 (MPa)	Provete P90	F _{ci} 1 (KN)	f _{ci} 1 (MPa)	F _{ci} 2 (KN)	f _{ci} 2 (MPa)
1	54,7	33,7	59,8	36,8	1	59,2	37,0	55,8	34,8
2	54,8	33,8	60,8	37,6	2	52,3	32,5	54,8	34,1
3	54,4	33,6	60,3	37,3	3	58,0	36,0	52,3	32,4
4	58,5	35,8	56,0	34,3	4	53,5	32,7	59,3	36,2
5	52,7	32,3	51,0	31,2	5	54,5	33,3	61,6	37,7
6	57,6	35,5	54,7	33,7	6	52,8	32,4	57,1	34,9
M _i	55,5	34,1	57,1	35,1	M _i	55,0	34,0	56,8	35,0
σ _i	1,98	1,21	3,56	2,30	σ _i	2,64	1,83	3,02	1,66
C _v	3,6%	3,5%	6,2%	6,5%	C _v	4,8%	5,4%	5,3%	4,7%

Quadro 4-15 – Valores da tensão resistente à compressão para a mistura *P100*.

Provete P100	F _{ci} 1 (KN)	f _{ci} 1 (MPa)	F _{ci} 2 (KN)	f _{ci} 2 (MPa)
1	60,8	37,7	59,1	36,6
2	56,9	35,1	68,2	42,1
3	55,3	33,8	51,7	31,6
4	61,2	37,7	54,9	33,8
5	60,5	37,3	61,4	37,8
6	59,0	36,1	64,6	39,6
M _i	58,9	36,3	60,0	36,9
σ _i	2,19	1,43	5,58	3,47
C _v	3,7%	3,9 %	9,3%	9,4%

Seria de esperar que os resultados de ambas as partes de um mesmo provete fossem equivalentes. No entanto tal não se verificou, apesar da diferença entre ambas as partes nunca ser muito significativa. O valor apurado da diferença máxima da tensão resistente foi de 6,2 MPa para a mistura com adição de 50% de ligante. Este valor vale quase 16% do valor médio, o que é significativo. Também é curioso ter sido encontrada, nesta mistura a diferença mínima entre as tensões, com um valor de 0,2 MPa. Se se olhar para a diferença entre os valores médios dessa mistura, de apenas 1,5 MPa, este valor representa cerca de 3,7% do valor médio global dessa mistura, sendo por isso um valor muito reduzido.

Para entender melhor a diferença entre valores médios obtidos para cada mistura, pode analisar-se a Figura 4-4. Pode verificar-se que a média dos provetes maiores é superior em 3 casos e é inferior em 4 casos. Portanto, não existe tendência a salientar. A maior diferença entre valores médios é sempre inferior a 1,1 MPa, o que equivale a cerca de 3% do valor médio global, o que também não é significativo.

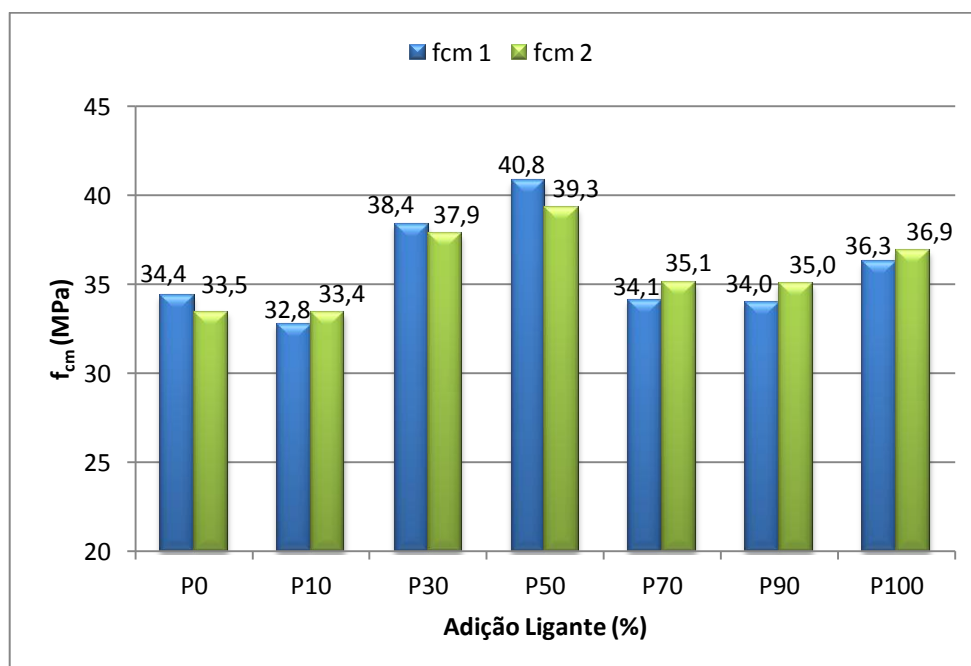


Figura 4-4 – Resistências médias à compressão. Percentagem de ligante.

Com uma adição de 50% de ligante e ativador à mistura inicial é alcançada a resistência máxima de cerca de 40 MPa para a globalidade das partes dos provetes, enquanto que a média mais baixa dos valores de resistência foi obtida para a mistura com 10% de adição de ligante, com um mínimo de 32,8 MPa. A diferença entre os resultados obtidos para as diferentes misturas realizadas é mais significativa do que para os resultados do ensaio à tração por flexão, correspondendo a uma força de 12,8 kN. As diferenças entre o valor máximo da tensão de rotura à compressão e a média e o valor mínimo e a média correspondem a cerca de 14% e 8% da média, respetivamente, o que são valores baixos.

Globalmente, também não se pode concluir que a adição de mais ligante à mistura tenha conduzido a resistências superiores, tal como é esperado no caso dos betões. De facto, a conclusão mais lógica neste caso é que a adição de mais ligante à mistura não altera a resistência final à compressão da mistura.

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos, foi ainda analisado o desvio padrão de cada mistura e confrontado com os valores da Tabela 3.5 do ACI (The United States of America, 1980), a qual é utilizada para controlo dos resultados experimentais do betão à compressão. Segundo esta norma, sempre que os valores da tensão de compressão sejam superiores a 20,7 MPa, os resultados obtidos através dos ensaios de compressão devem ser controlados pelo valor do desvio padrão. Assim para um desvio padrão abaixo de 1,38 MPa os resultados são considerados excelentes; entre 1,38 e 1,73 MPa muito bons; entre 1,73 e 2,07 MPa bons; até 2,41 MPa médios; acima deste valor são fracos.

Os resultados enquadrados na categoria excelente para ambas as partes apenas pertencem à mistura inicial, com 0% de adição de ligante. Observa-se ainda que 21,43% dos resultados obtidos estão catalogados como fracos, correspondendo a maior percentagem à caracterização como excelente, com uma percentagem de 28,57%. Esta distribuição de resultados permite concluir que os resultados obtidos são apenas representativos, uma vez que a maioria dos valores se encontra significativamente acima de 1,38 MPa. No Quadro 4-17 podem visualizar-se estes valores.

Quadro 4-16 – Qualidade de distribuição dos resultados experimentais. Ensaio de compressão.

σ		Percentagem de elementos
< 1,38	Excelente	28,6%
1,38-1,73	Muito bom	21,4%
1,73-2,07	Bom	7,1%
2,07-2,41	Médio	21,4%
> 2,41	Fraco	21,4%

Na Figura 4-5 são apresentados os resultados globais da baridade γ , da tensão de rotura à tração por flexão f_t , e da tensão de rotura de compressão da metade maior do prisma $f_c 1$, e da metade menor $f_c 2$, obtidos para cada mistura. Os resultados foram normalizados relativamente às médias globais obtidas. Observa-se que para os valores de tensão de rotura das misturas *P30*, *P70*, *P90* e *P100* existe uma boa articulação de resultados, não se verificando variações superiores a 10%, o que representa coeficientes de variação inferiores a 4%, podendo-se por isso considerar como semelhantes todos os resultados.

No entanto, uma conclusão óbvia deveria consistir na relação; maior baridade, maior resistência. Contudo, esta relação não se verifica em geral. Por exemplo; os provetes *P0*, de baridade quase unitária, têm valores superiores de f_t , mas valores inferiores de f_c . A este nível,

o conjunto de resultados mais homogêneo será o correspondente à mistura *P100*, seguida pelas misturas *P90* e *P70*. A mistura *P50*, seguida da *P0*, são as menos homogêneas. Mas, recorde-se, os valores são todos semelhantes.

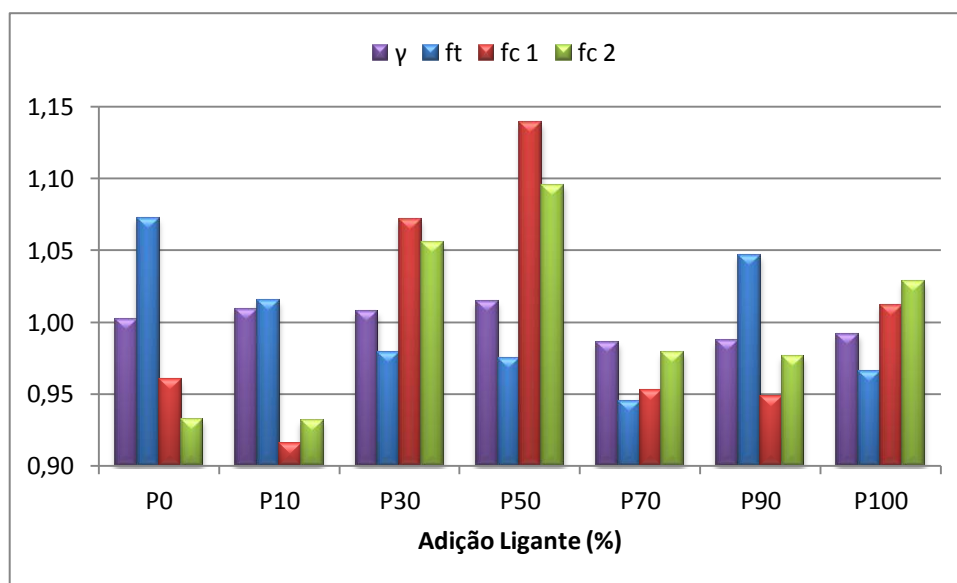


Figura 4-5 – Normalização dos resultados obtidos. Ligante.

4.2 Influência dos agregados

Após análise dos resultados obtidos para os provetes com alteração do ligante na mistura, são agora analisados os resultados correspondentes às misturas com modificação dos agregados constituintes da mistura base. Estas misturas foram descritas no Capítulo 3; no essencial foi-se aumentando, em cada nova mistura, o diâmetro máximo do agregado, condicionando as percentagens em peso à adequação da mistura dos agregados à curva de Faury. Os ensaios de tração por flexão e de compressão, realizados sobre os provetes agora considerados, foram realizados de modo idêntico ao anterior, isto é, tal como tinha sido feito para as misturas com adição de ligante.

De forma simplificada, a mistura designada por “1.^a mistura”, no Capítulo 3, foi aqui indicada como *P2,38*, visto que o diâmetro máximo dos agregados era de 2,38 mm, procedendo-se de igual forma para as restantes misturas, consoante o diâmetro máximo do agregado. A mistura base permaneceu com a mesma designação de *P0*.

Os resultados obtidos nestas novas misturas foram comparados com os da mistura base, cuja caracterização já foi realizada em 4.1, optando-se por não se repetir alguns resultados já enunciados. A realização das misturas, bem como dos ensaios efetuados está esquematizada no Quadro 4-17, existindo neste caso uma maior uniformização quanto ao tempo de cura dos provetes das diferentes misturas.

Quadro 4-17 – Calendarização dos trabalhos. Parâmetro granulometria.

Provete	Dia Mistura	Dia Ensaio	Cura (dias)
P0	25-Mar	09-Abr	15
P2,38	22-Jun	07-Jul	15
P4,76	02-Jul	20-Jul	18
P6,30	02-Jul	20-Jul	18
P9,50	06-Jul	22-Jul	16

Nos Quadros 4-18 e 4-19 podem ser observados os dados relativos às misturas com alteração da granulometria. Quanto às dimensões dos provetes é notória a aproximação da dimensão b à medida pretendida, com valores próximos das dimensões dos prismas referidos na NP EN 196-1 (2006), obtendo-se uma média de 40 mm × 40 mm para as quatro misturas com alteração de ligante e um coeficiente de variação, para esta medida, de apenas 1%. Verificou-se ainda uma diminuição gradual da baridade, desde a primeira mistura, $P2,38$, até à última, $P9,50$, onde o valor mais afastado do conjunto de resultados individuais, $\gamma_i=223$ kg/m³, ao valor médio representa $0,96\sigma$, valor bastante reduzido.

Nas misturas realizadas com alteração do diâmetro máximo, notou-se um aumento da liquidez da mistura à medida que se aumentava a dimensão do agregado, consequência da menor carência de fase líquida em volta dos inertes, provavelmente. Como resultado, a vibração foi realizada em menos tempo, uma vez que a expulsão das bolhas de ar terminava pouco depois de se ter iniciado o processo. Posteriormente, também não se notou a existência de grandes vazios, confirmado visualmente nos provetes destruídos. Esta particularidade vê-se refletida nas baridades das misturas, que não tiveram oscilações a salientar. Apesar das ligeiras alterações do seu valor, a variação foi no máximo de 1%, o que representa resultados muito bons e pressupõe-se um rearranjo gradual das partículas.

Quadro 4-18 – Características dos provetes *P2,38* e *P4,76*.

Provete P2,38	b ; h (mm;mm)	Mp (g)	γ (kg/m³)	Provete P4,76	b ; h (mm;mm)	Mp (g)	γ (kg/m³)
1	40,4 ; 40,0	576	223	1	40,6 ; 40,1	565	220
2	40,3 ; 40,0	561	218	2	40,6 ; 40,0	553	219
3	40,4 ; 40,0	563	218	3	40,5 ; 40,0	563	221
4	39,7 ; 40,0	563	222	4	40,4 ; 40,0	559	218
5	40,1 ; 40,0	573	223	5	40,4 ; 40,1	561	219
6	40,2 ; 40,0	570	222	6	40,7 ; 40,1	558	219
M_i	40,2 ; 40,0	568	221	M_i	40,5 ; 40,1	560	219
σ_i	0,22 ; 0,03	5,55	2,20	σ_i	0,11 ; 0,04	3,78	0,79

Quadro 4-19 – Características dos provetes *P6,30* e *P9,50*.

Provete P6,30	b ; h (mm;mm)	Mp (g)	γ (kg/m³)	Provete P9,50	b ; h (mm;mm)	Mp (g)	γ (kg/m³)
1	40,7 ; 40,0	566	217	1	40,0 ; 40,0	569	222
2	40,4 ; 40,0	569	220	2	40,0 ; 40,0	572	223
3	40,6 ; 40,0	567	218	3	38,6 ; 40,0	549	222
4	40,0 ; 40,0	561	219	4	39,7 ; 40,1	559	220
5	40,4 ; 40,1	570	221	5	39,9 ; 40,0	558	219
6	40,4 ; 40,0	557	215	6	40,0 ; 40,0	568	222
M_i	40,4 ; 40,0	565	218	M_i	39,7 ; 40,0	563	221
σ_i	0,22 ; 0,02	4,57	1,77	σ_i	0,50 ; 0,02	7,86	1,63

Quadro 4-20 – Quadro de dados geométricos da totalidade de provetes. Parâmetro granulometria.

	b ; h (mm;mm)	Mp (g)	γ (kg/m³)
Mg	40,0 ; 40,0	563,8	219,9
σg	0,26 ; 0	2,91	1,17
Cvg	1%	1%	1%

Na Figura 4-6 pode ser contemplado de forma mais esclarecedora a baridade das misturas desenvolvidas, observando-se que as quatro misturas com alteração da granulometria têm valores semelhantes, sendo o valor da mistura *P0* o mais dissonante do conjunto, no entanto verifica-se que este valor corresponde a uma diferença ao valor médio de $1,97\sigma$, o que é um valor reduzido. No conjunto das cinco misturas verifica-se um coeficiente de variação de apenas 3%, indicando uma boa aproximação de resultados. Analisando a diferença máxima de valores médios da baridade entre as misturas *P9,50* e *P0*, verifica-se que corresponde a 8% da média global das cinco misturas, o que se avalia como não sendo significativo. Provavelmente, a falta de finos da areia, que motivou uma fraca aproximação à curva de Faury, justificam em parte estes valores apurados.

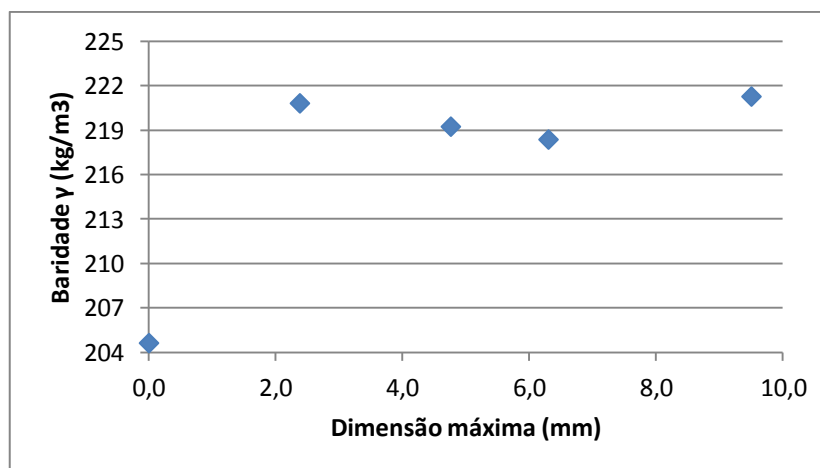


Figura 4-6 – Baridade média das misturas. Parâmetro granulometria.

4.2.1 Ensaio à tração por flexão

Os resultados dos ensaios à tração por flexão, realizados pela forma descrita no Capítulo 3, para o parâmetro granulometria, podem ser observados nos Quadros 4-21 e 4-22, onde os valores correspondentes à força máxima F_{ti} , foram inferiores a 2 kN, com exceção da mistura

P9,50, em que alguns provetes este valor foi superado. Também para esta mistura foi obtida a tensão de rotura à tração, f_{ti} , próxima de 5,20 MPa, correspondendo este resultado a uma diferença ao valor médio de $1,38\sigma$. Na mistura *P6,30* é verificado o valor mínimo de tensão com $f_{ti}=2,34$ MPa, a que corresponde uma diferença à média de $1,36\sigma$, correspondendo a valores baixos de desvio. Percebe-se ainda que, dentro da mesma mistura, os valores das tensões de rotura não diferem muito entre provetes, com um coeficiente de variação máximo de 9,1% para a mistura *P9,50*, o que indica uma boa fiabilidade nos resultados obtidos.

Quadro 4-21 – Tensão resistente à tração das misturas *P2,38*, *P4,76* e *P6,30*.

Provete P2,38	F_{ti} (kN)	f_{ti} (MPa)	Provete P4,76	F_{ti} (kN)	f_{ti} (MPa)	Provete P6,30	F_{ti} (kN)	f_{ti} (MPa)
1	1,60	3,71	1	1,25	2,91	1	1,13	2,60
2	1,80	4,19	2	1,02	2,42	2	1,01	2,34
3	1,83	4,24	3	1,25	2,94	3	1,17	2,70
4	1,75	4,13	4	1,19	2,79	4	1,18	2,76
5	1,82	4,25	5	1,12	2,62	5	1,01	2,34
6	1,96	4,57	6	1,04	2,44	6	1,14	2,64
M_i	1,79	4,18	M_i	1,15	2,69	M_i	1,11	2,57
σ_i	0,11	0,25	σ_i	0,09	0,21	σ_i	0,07	0,17
Cv	6,0%	6,0%	Cv	8,1%	7,7%	Cv	6,4%	6,5%

Quadro 4-22 – Tensão resistente à tração da mistura *P9,50*.

Provete P9,50	F_{ti} (kN)	f_{ti} (MPa)
1	2,22	5,20
2	1,86	4,36
3	1,73	4,20
4	2,12	4,99
5	1,74	4,09
6	2,08	4,87
M_i	1,96	4,62
σ_i	0,19	0,42
Cv	9,8%	9,1%

Na Figura 4-7 podem ser vistos os resultados obtidos para a globalidade das quatro misturas, em comparação com a mistura base. Embora exista, globalmente, uma tendência decrescente das tensões de rotura à tração, o aspeto mais significativo é que os resultados apurados não exibem uma tendência lógica. De facto, não são conhecidas razões para o decréscimo dos resultados das primeira e segunda misturas, pelo menos no grau a que se verificou; perda de 50% da capacidade resistente. Tomando por adquirido que a quantidade de metacaulino não alteraria os resultados, e que é muito boa a adesão do ligante aos inertes de calcário, tal como já foi comprovado em testes rápidos relativamente às argamassas, seria de esperar resultados equivalentes, no mínimo. Mas os resultados apurados mostram um decréscimo de cerca de 50% da capacidade resistente da mistura *P4,76* relativamente à mistura base. A mistura *P6,30* é equivalente em termos de capacidade resistente à tração. A falta de lógica sucede relativamente à mistura *P9,5*. De facto, não foi identificado o(s) parâmetro(s) que justifique esta alternância verificada; nem a origem diversa dos agregados, nem a metodologia seguida para a realização da mistura. Quanto ao resto, foram seguidos os procedimentos estabelecidos.

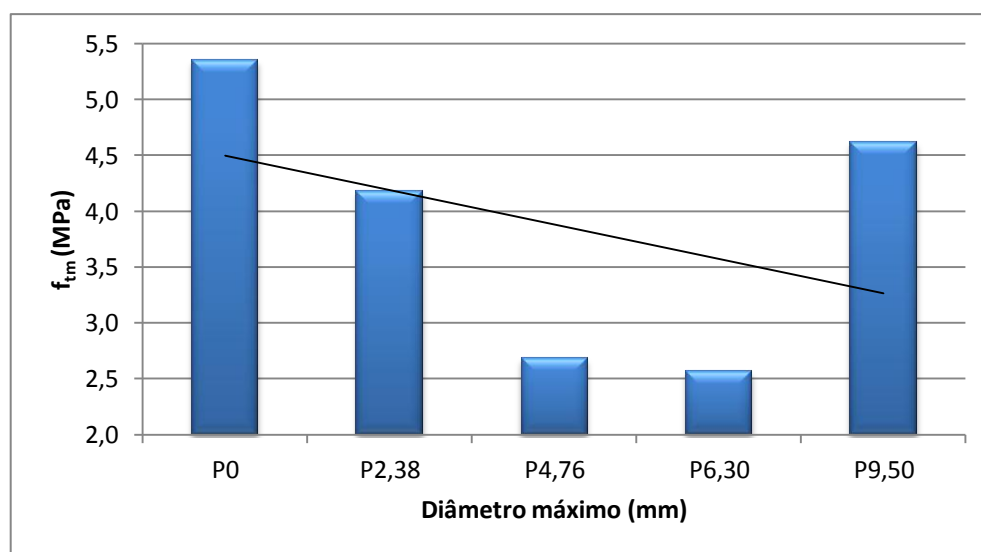


Figura 4-7 – Valores médios da tensão resistente à tração por flexão. Parâmetro granulometria.

4.2.2 Ensaio à compressão

Tal como descrito no Capítulo 3, as duas partes do ensaio à tração por flexão serviram de provetes para o ensaio à compressão. Desse ensaio é possível obter as tensões de rotura à compressão para a parte maior $f_{ci} 1$, e para a parte menor $f_{ci} 2$, apresentadas nos Quadros 4-24 e 4-25. Verifica-se um máximo de $f_{ci}=45,8$ MPa para a mistura *P9,50* e um mínimo de $f_{ci}=21,0$ MPa para a mistura *P4,76*, a que corresponde uma diferença de cerca de $2,95\sigma$ do desvio padrão das quatro misturas, ou seja, 84% do valor médio, o que é uma diferença considerável. Observa-se ainda uma diferença máxima da tensão de compressão entre as duas

metades de 3,9 MPa para a mistura *P2,38*, correspondendo a cerca de 13% do valor médio. Esta diferença máxima registada não é muito significativa. Consta-se que se pode ter uma boa fiabilidade sobre os resultados obtidos, pois todos apresentam coeficientes de variação inferiores a 7%.

Quadro 4-23 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas *P2,38* e *P4,76*.

Provete P2,38	F_{ci} 1 (KN)	f_{ci} 1 (MPa)	F_{ci} 2 (KN)	f_{ci} 2 (MPa)	Provete P4,76	F_{ci} 1 (KN)	f_{ci} 1 (MPa)	F_{ci} 2 (KN)	f_{ci} 2 (MPa)
1	50,5	31,2	56,8	35,2	1	35,0	21,8	35,0	21,8
2	51,2	31,8	49,8	30,9	2	34,9	22,1	34,3	21,7
3	50,0	30,9	54,5	33,7	3	36,0	22,6	34,2	21,5
4	46,5	29,3	46,6	29,3	4	34,8	21,8	36,5	22,8
5	51,6	32,1	49,6	30,9	5	33,6	21,0	34,8	21,8
6	50,6	31,5	50,6	31,5	6	34,9	21,9	36,4	22,8
M_i	50,0	31,1	51,3	31,9	M_i	34,9	21,8	35,2	22,0
σ_i	1,67	0,92	3,36	1,93	σ_i	0,70	0,48	0,93	0,56
Cv	3,3%	2,9%	6,5%	6,1%	Cv	2,0%	2,2%	2,7%	2,5%

Quadro 4-24 – Valores da tensão resistente à compressão para as misturas *P6,30* e *P9,50*.

Provete P6,30	F_{ci} 1 (KN)	f_{ci} 1 (MPa)	F_{ci} 2 (KN)	f_{ci} 2 (MPa)	Provete P9,50	F_{ci} 1 (KN)	f_{ci} 1 (MPa)	F_{ci} 2 (KN)	f_{ci} 2 (MPa)
1	34,1	21,0	38,6	23,7	1	71,5	44,7	68,6	42,9
2	37,2	23,0	34,8	21,5	2	70,2	43,8	72,0	45,0
3	37,5	23,1	37,6	23,2	3	62,2	40,3	69,8	45,2
4	36,0	22,5	35,8	22,3	4	63,4	39,8	69,9	43,9
5	37,5	23,2	36,2	22,4	5	67,2	42,1	71,3	44,7
6	38,0	23,5	35,7	22,1	6	73,3	45,8	71,1	44,4
M_i	36,7	22,7	36,5	22,5	M_i	68,0	42,8	70,5	44,3
σ_i	1,31	0,84	1,29	0,71	σ_i	4,08	2,20	1,12	0,76
Cv	3,6%	3,7%	3,5%	3,2%	Cv	6,0%	5,1%	1,6%	1,7%

Na Figura 4-8 podem ser observados os resultados médios das misturas obtidas, sendo notório o decréscimo das tensões da mistura base *P0* para as misturas *P4,76* e *P6,30*, em cerca de 33%. A mistura *P2,38* reduz a capacidade resistente em cerca de 10%, relativamente à mistura

base. No entanto, a mistura P9,50 evidencia os maiores valores; mais 30% do que na mistura base. Mais uma vez, não foi possível justificar a variabilidade destes resultados.

Quanto à diferença das tensões de rotura de compressão para as partes de cada provete, verificou-se uma diferença média máxima de 1,6 MPa para a mistura P9,50, e uma diferença média mínima de 0,2 MPa para a mistura P6,30, o que corresponde a cerca de 20 e 2%, respetivamente, do valor médio das duas partes. No primeiro caso, a diferença corresponde a um valor já apreciável. Observa-se neste caso que apenas duas misturas apresentam resultados acima da média para as partes maiores, enquanto que as restantes três apresentam valores superiores de compressão, na parte menor.

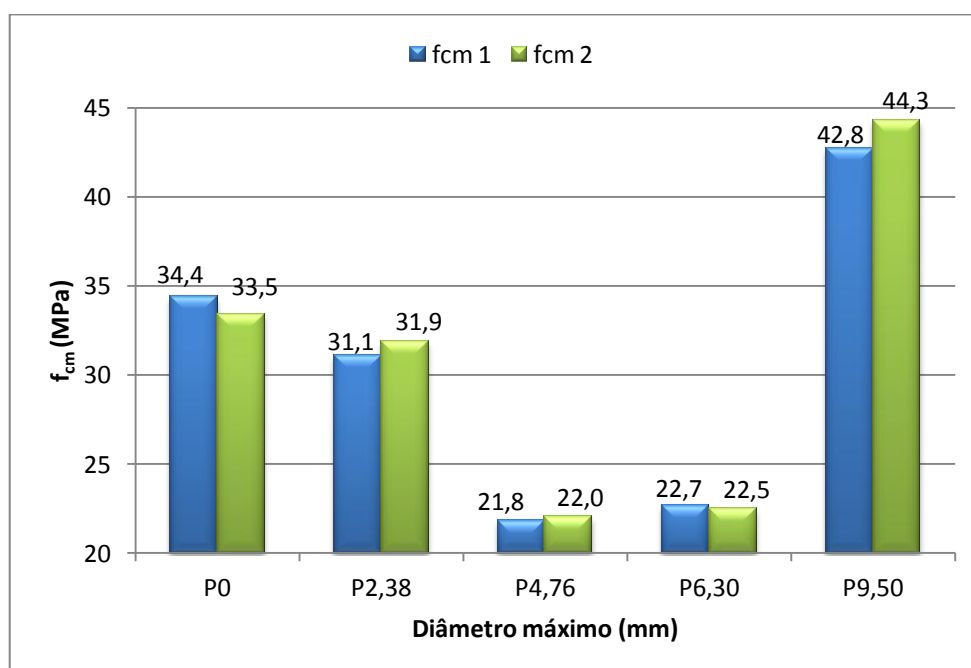


Figura 4-8 – Resistências médias à compressão. Parâmetro granulometria.

De forma a comparar a consistência normalizaram-se os diferentes valores resistentes relativamente aos valores médios globais. Os resultados podem ser consultados na Figura 4-9. Neste gráfico é possível constatar uma boa consistência entre os diferentes parâmetros para as misturas P2,38 e P0, se se excetuar o valor a tensão de rotura à tração por flexão na mistura P0; um valor de quase 1,4 é substancial. Fica uma vez mais expressa as reduzidas capacidades resistentes dos provetes associados às misturas P4,76 e P6,30. No caso da mistura P9,50, são evidentes os consideráveis acréscimos relativamente aos valores médios, apesar da semelhança em termos da baridade.

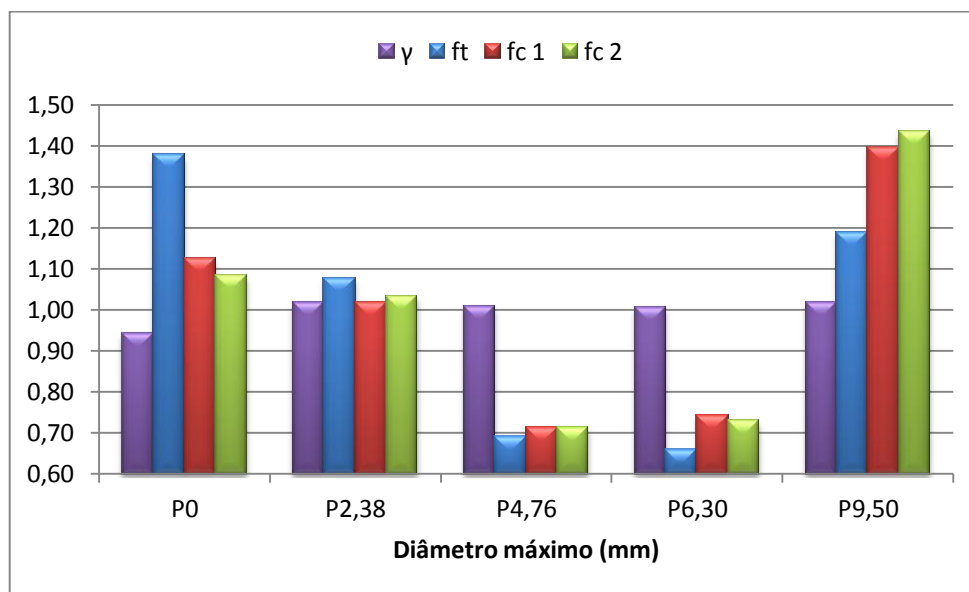


Figura 4-9 - Normalização dos resultados obtidos. Agregados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho experimental, pretendia-se caracterizar mecanicamente as misturas, variando a quantidade de ligante adicionado à mistura e composição dos agregados. Para o efeito recorreu-se aos parâmetros que se acharam necessários para avaliar as capacidades resistentes dos provetes. Na presente secção resumem-se as conclusões mais importantes desta dissertação.

Relativamente à variação da quantidade de ligante adicionada, verificou-se experimentalmente, que a quantidade de ligante não é um parâmetro fundamental para a melhorar a capacidade resistente do geopolímeros; quer em termos do valor da tensão resistente à tração por flexão, quer em termos do valor da tensão resistente à compressão. Inclusive o valor mais elevado da resistência à tração foi obtido para a mistura de referência, sem adições suplementares de ligante ou de ativador. Até a mistura contendo o dobro da quantidade de ligante não evidenciou qualquer melhoria relativamente a este parâmetro. Uma razão plausível para estes resultados poderá ser dada pelo aumento da fase líquida na mistura, conjuntamente com a de finos, correspondentes ao ligante, diminuindo a proporção de agregado no volume total da mistura. Neste contexto, aumentou-se a compacidade da mistura e a consequente dificuldade em expulsar as bolhas de ar.

De qualquer modo, é notória uma ligeira redução do valor médio resistente à tração por flexão das misturas à medida que aumenta a percentagem de ligante na mistura. Pelo menos, isso é seguro, não aumenta a resistência com a quantidade de ligante.

Relativamente ao ensaio de compressão, os resultados da tensão de rotura à compressão expressaram alguma variabilidade. No entanto, o desvio máximo entre os valores obtidos foi de 14%. A mistura com a adição de mais 50% de ligante, relativamente à mistura base, foi a que apresentou melhores resultados para este parâmetro. Neste caso, o conjunto global de resultados evidencia uma tendência crescente, mas muito ligeira. Na realidade, relativamente à adição da quantidade de ligante, é mais razoável aceitar a independência da capacidade resistente à compressão.

Estes resultados obtidos com a adição de ligante não são consistentes com o que acontece no betão e em argamassas de cimento. De facto, mantendo os inertes e a relação água/cimento, e

se aumentar a quantidade de cimento da mistura, é certo que aumentará a resistência à compressão e, conseqüentemente, a resistência à tração. No entanto, tal como referido anteriormente, para as misturas de betão realizadas com adição de metacaulino, dependendo do tipo de metacaulino usado, a adição não melhora significativamente a resistência à compressão, indo mais ao encontro dos resultados obtidos nesta dissertação sobre a variação do ligante.

Quanto aos resultados obtidos para as misturas com alteração da composição dos inertes, considerando diâmetros máximos crescentes, constatou-se que a tensão de rotura à tração por flexão foi decrescendo à medida que se aumentou o diâmetro máximo do agregado, sendo compatível com as conclusões obtidas para o betão em que o diâmetro do agregado tem influência na tensão de rotura de tração, tal como se tinha demonstrado no Capítulo 2. No entanto, para a mistura de maior diâmetro de agregado, 9,50 mm, a tensão de rotura aumentou, não tendo este resultado sido consistes com os das outras misturas.

Também os resultados à compressão das misturas com alteração do diâmetro máximo do agregado mostraram tendências não lógicas. Numa primeira fase, para diâmetros máximos do agregado entre 2,38 mm e 6,3mm, a capacidade resistente decresce com o aumento do diâmetro. Mas para o maior diâmetro de 9,50 mm, obtiveram-se tensões superiores à da mistura base. Neste contexto, pode dizer-se que os resultados obtidos não foram conclusivos dada a variabilidade avaliada.

5.1 Trabalhos Futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido e dos resultados obtidos são sugeridas e propostas as seguintes investigações futuras:

- estudar a influência da redução da quantidade de ligante, relativamente à mistura base, visto que a adição de ligante à mistura de metacaulino não melhorou significativamente os parâmetros de resistência desta mistura;
- importa ainda conhecer detalhadamente as razões que impedem os ganhos da capacidade resistente das misturas com maior quantidade de ligante, verificando por exemplo a capacidade resistente do metacaulino puro;
- com o intuito de melhorar a assertividade acerca das conclusões referidas sobre a alteração do diâmetro máximo, aconselha-se o estudo de misturas com diâmetros de agregados mais alargados, realizados noutra tipo de moldes, de forma a poder aferir-se sobre a influência dos agregados em misturas geopoliméricas;

- ainda no contexto da composição dos agregados, seria necessário realizar outras experiências com outras quantidades de agregados nas misturas, de forma a ser possível uma análise mais fiável acerca este parâmetro;
- analisar a influência da porosidade e da viscosidade sobre as misturas realizadas, verificando se tem o mesmo impacto que estes dois itens têm no betão;
- comparar as resistências obtidas de misturas com diferentes tipos de metacaulino.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute*. (2015). Obtido em Maio de 2015, de <http://www.concrete.org>
- Bastos, I. M. (2011). Contribuição para o conhecimento sobre o efeito de material pozolânico no fabrico de betões. Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Departamento de Engenharia Geoécnic.
- Bignozzi, M. C., Manzi, S., Lancellotti, I., Kamseu, E., Barbieri, L., & Leonelli, C. (April de 2012). Mix-design and characterization of alkali activated materials based on metakaolin and ladle slag. Modena, Italy: Elsevier.
- Billong, N., Melo, U., Njopwouo, D., Louvet, F., & Bonnet, J. (2009). Effect of mixture constituents on properties of slaked lime–metakaolin–sand mortars containing sodium hydroxide. *Cement & Concrete Composites*, 658–662.
- Chang, R. (2005). *Química* (8.^a Edição ed.). Lisboa: McGraw-Hill.
- Costa, A., & Appleton, J. (2002). Estruturas de Betão I. Parte II - Materiais. Departamento de Engenharia Civil. Grupo de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado.
- Coutinho, A. d. (1973). *Fabrico e propriedades do Betão* (Vol. 1). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Coutinho, A. d., & Gonçalves, A. (1994). *Fabrico e Propriedades do Betão* (Vol. III). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Davidovits, J. (1982). *Mineral Polymers and Methods of Making Them*. U.S. Patent 4349386.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, Terminology. Proceedings of Geopolymer, International Conference. France.
- Davidovits, J. (26 de Abril de 2006). *Geopolymer*. Obtido em 23 de Março de 2015, de <http://www.geopolymer.org/archaeology/roman-cement/high-performance-roman-cement-and-concrete-high-durable-buildings>
- Dyer, A. (1988). *An Introduction to Zeolite Molecular Sieves*. John Wiley & Sons.
- Gunning, J. G. (1983). *Concrete technology*. New York: Longman Group Limited.
-

-
- Henriques, V. A. (Outubro de 2011). Impacte Ambiental de Estruturas de Edifícios - A produção de CO₂. *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Militar*.
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Springer Science Business Media*.
- Khatib, J. (July de 2006). Metakaolin concrete at a low water to binder ratio. Elsevier.
- L.Granizo, M., Blanco-Varela, M. T., & Palomo, A. (2000). Influence of the starting kaolin on alkali-activated materials based on metakaolin. Study of the reaction parameters by isothermal conduction calorimetry. (K. A. Publishers, Ed.) *Journal of Materials Science*, 35, 6309 – 6315.
- Malhotra VM, M. P. (2005). High Performance, high volume fly ash concrete. *Supplementary crementing materials for sustainable development. 2nd ed. Ottawa: ONT*.
- Mateus, R. (2004). Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção. *Tese de Metrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho*. Obtido de <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/817>
- Mermerdas, K., Gesoglu, M., Güneyisi, E., & Özturan, T. (March de 2012). Strength development of concretes incorporated with metakaolin and different types of calcined kaolins. Turkey: Elsevier.
- NP EN 12390-3. (Dezembro de 2011). Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes. European Committee for Standardization.
- NP EN 12390-5. (2009). Ensaio do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes. European Committee for Standardization.
- NP EN 12620:2002+A1. (Outubro de 2010). Agregados para betão. European Committee for Standardization.
- NP EN 196-1. (Fevereiro de 2006). Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. European Committee for Standardization.
- NP EN 933-1. (Novembro de 2000). Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de Peneiração. European Committee for Standardization.
- Pacheco-Torgal, F., Moura, D., Ding, Y., & Jalali, S. (25 de October de 2010). Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. Elsevier.
-

- Pinto, A. T. (2006). *Introdução ao Estudo dos Geopolímeros*. Vila Real, Portugal: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Planet ware*. (s.d.). Obtido em Abril de 2015, de <http://www.planetware.com/rome/colosseum-i-la-rcl.htm>
- Rashad, A. M. (12 de September de 2012). Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition - A comprehensive overview . Elsevier.
- Reis, A. C., Farinha, M. B., & Farinha, J. P. (2006). *Tabelas Técnicas*. Alameda dos Oceanos, Lisboa: Edições Técnicas E. T. L., L.da.
- Siddique, R., & Klaus, J. (July de 2008). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. Rusko, Finland: Elsevier.
- The United States of America. (1980). *ACI: Manual of Concrete Practice, Part 1*. Michigan: American Concrete Institute.
- Weigler, H., & Karl, S. (1974). *Hormigones ligeros armados* (Versión española ed.). Barcelona: Gustavo Gili.