



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

Resistência Mecânica de Geopolímeros com Resíduos Industriais

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

Autor

Alexandre Miguel Bravo Almendra

Orientador

Prof. Adelino Vasconcelos Lopes

Prof^a. Maria Isabel Moita Pinto

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

Coimbra, Julho, 2016

AGRADECIMENTOS

A realização da presente dissertação, embora se trate de um trabalho individual, contou com a indispensável colaboração de algumas pessoas. É então importante e oportuno expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador, Professor Doutor Adelino Lopes, um reconhecimento especial pelo constante apoio e disponibilidade ao longo de todo o trabalho, pelos ensinamentos que transmitiu e por toda a imprescindível colaboração laboratorial;

À minha orientadora, Professora Doutora Isabel Pinto, por todo o apoio prestado, disponibilidade demonstrada e por todas as suas oportunas sugestões;

Ao professor Doutor Sérgio Lopes pela sua participação e colaboração, em especial pelos seus ensinamentos e opiniões;

Ao Senhor José António, técnico do Laboratório de Geotecnia, por todo o apoio prestado na preparação do resíduo calcário, tornando possível a realização do trabalho experimental pretendido;

À empresa *MVC Mármore de Alcobaça, Lda.* pelo fornecimento do resíduo calcário;

A todos os meus colegas e amigos que de uma forma ou de outra colaboraram tornando este percurso possível;

À minha família, em particular para os meus pais, o meu maior agradecimento, à minha irmã, e mesmo já não estando entre nós, ao meu avô. Agradeço a todos o apoio incondicional e incentivo que me deram durante todo este percurso académico.

Obrigado.

RESUMO

O ser humano está cada vez mais consciencializado para a necessidade de existir uma preocupação com a preservação do meio ambiente, assim como uma melhor gestão dos recursos naturais para não colocar em causa a sustentabilidade das gerações futuras. Para isso é necessário o contributo de todos os intervenientes. É sabido que o setor da construção civil é um grande foco de poluição ambiental e que consome quantidades exorbitantes de recursos naturais. Sendo a construção um bem necessário, só resta minimizar o seu impacto, razão pela qual se devem procurar vias alternativas que sejam menos agressivas no que toca à produção, aplicação e exposição de materiais utilizados.

No âmbito desta dissertação procura-se viabilizar um ligante alternativo, obtido por ativação alcalina do metacaulino, em substituição do Cimento Portland Normal, o mais utilizado na construção. Seria ótimo a sua substituição por um material que no seu processo de fabrico não gerasse tão elevadas quantidades de dióxido de carbono. Com a utilização do metacaulino, procura-se também a incorporação de resíduos provenientes de indústrias, que já não têm qualquer utilidade, em substituição de parte deste ligante, perspetivando melhorar as características finais do material. Se for possível, consegue-se não só aproveitar os resíduos como se reduz na quantidade de ligante a utilizar.

Consiste então, a presente dissertação na avaliação experimental da resistência de geopolímeros com resíduo industrial proveniente de pedreiras transformadoras de pedra calcária. O estudo envolve a substituição de 20% e 33% de ligante (metacaulino) pelo referido resíduo. Em ambos os casos procura-se também a influência da utilização desse resíduo cru, tal como provem da pedra e a utilização deste previamente cozido a duas temperaturas distintas durante meia hora, 600° e 800°C.

Os resultados obtidos neste estudo, sendo um trabalho exploratório, permitem concluir que de um modo geral, a introdução dos diferentes tipos de calcário diminuiu a resistência à compressão e a resistência à tração por flexão do material de referência. A perda de resistência aumentou com o aumento da percentagem de resíduo na mistura. No entanto, o aumento da temperatura de cozedura traduz-se num ganho de resistência aparentando que a cozedura do calcário a aproximadamente 1000°C iguale os parâmetros resistentes da mistura de referência.

ABSTRACT

The human being is increasingly aware of the need concerning the preservation of the environment, and concerning a better management of natural resources, that would not jeopardize the sustainability of future generations. As a consequence, contribution of all the actors is needed. It is known that the construction industry is a major focus of environmental pollution, and it consumes high quantities of natural resources. Being the construction an essential need, all we can do is to minimize the impact. Therefore it is necessary to look for alternative ways that are less aggressive in terms of production, application and use of the materials.

This dissertation intends to study some properties of a binder obtained by alkaline activation as an alternative material to Normal Portland cement, which is the most used binder in construction. It would be great if this material would be replaced by a material that in its manufacturing process would not generate such high amounts of carbon dioxide. Using such binder, the incorporation of wastes from industries is also intended. Some wastes, with no utility, could replace part of the binder and can even improve the characteristics of the material. This way we are not only taking advantage of waste, but we are reducing the amount of binder at the same time.

This dissertation presents an experimental program, which studies the strength of geopolymers coming from quarries of kaolin mixed together with industrial waste. The study involves the replacement of 20% and 33% of the binder by the waste. In both cases also to the intention is to study the influence of raw residue, coming directly from the quarry and the use of this material after being subjected to two levels of temperatures, 600°C and 800°C ,during 30 minutes.

The results obtained in this study, being an exploratory work, led to the conclusion that, in general, the introduction of different types of limestone, decreased the compressive strength and tensile strength by bending of the material. The loss of strength increased with the increasing in the percentage of waste material in the mixture. However, the increasing of the cooking temperature means to a gain of strength and, eventually, a cooking of limestone at approximately 1000°C equals the strength of the reference mixture.

ÍNDICE

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
2 CONCEITOS BÁSICOS	4
2.1 Cimento tipo Portland.....	6
2.2 Ligantes de Base Alcalina	8
2.2.1 Desenvolvimento no tempo	8
2.2.2 Metacaulino	10
2.2.3 Ativação alcalina	11
2.3 Resíduos industriais.....	11
2.3.1 Sustentabilidade ambiental	12
2.3.2 Incorporação de resíduos no cimento Portland.....	14
2.3.3 Incorporação de resíduos em ligantes de base alcalina	17
2.4 Caracterização do calcário.....	17
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1 Materiais utilizados nas misturas.....	19
3.1.1 Metacaulino	19
3.1.2 Ativador	21
3.1.3 Areia	22
3.1.2 Resíduo Calcário.....	22
3.2 Misturas	24
3.3 Procedimento experimental	26
3.4 Procedimento de ensaio	29
3.4.1 Ensaio de rotura à tração por flexão	30
3.4.1 Ensaio de rotura à compressão	32
4 RESULTADOS	34
4.1 Influência da substituição de metacaulino branco por calcário	35
4.1.1 Substituição de metacaulino por calcário não cozido.....	36
4.1.2 Substituição de metacaulino por calcário cozido a 600°C.....	38

4.1.3 Substituição de metacaulino por calcário cozido a 800°C.....	41
4.2 Influência do tipo de calcário na substituição de metacaulino branco	43
4.2.1 Substituição de 20% de metacaulino	43
4.2.2 Substituição de 33% de metacaulino por calcários	45
4.3 Influência da redução de metacaulino nas misturas	47
4.4 Influência da substituição de metacaulino castanho por calcário	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXO A	A-1
ANEXO B	B-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Resíduos industriais produzidos em Portugal (Torgal et al., 2005).....	12
Figura 3.1 – Metacaulinos utilizados nas misturas.....	20
Figura 3.2 – Curva granulométrica da areia utilizada (Pereira, 2013).....	22
Figura 3.3 – Calcário depois do processo de secagem.....	23
Figura 3.4 – Calcário não cozido utilizado nas misturas.....	24
Figura 3.5 – Moldes utilizados para a construção dos provetes.....	27
Figura 3.6 – Elaboração da mistura.....	28
Figura 3.7 – Modelo de carga do ensaio conforme a norma NP EN 12390-5.....	30
Figura 3.8 – Provetes antes e depois da rotura submetidos ao ensaio de rotura à tração por flexão.....	31
Figura 3.9 - Esquema do ensaio de compressão.....	32
Figura 3.10 – Rotura do provete após ensaio à compressão.....	33
Figura 3.11 – Modos de rotura satisfatórios conforme a norma NP EN 12390-3.....	33
Figura 4.1 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário não cozido na resistência à tração por flexão.....	36
Figura 4.2 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário não cozido na resistência à compressão.....	37
Figura 4.3 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido a 600° na resistência à tração por flexão.....	39
Figura 4.4 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido a 600°C na resistência à compressão.....	40
Figura 4.5 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido a 800° na resistência à tração por flexão.....	41
Figura 4.6 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido a 800°C na resistência à compressão.....	42

Figura 4.7 – Influência da substituição de 20% metacaulino por diferentes tipos de calcários na resistência à tração por flexão.....	43
Figura 4.8 – Influência da substituição de 20% metacaulino por diferentes tipos de calcários na resistência à compressão.....	44
Figura 4.9 – Influência da substituição de 33% metacaulino por diferentes tipos de calcários na resistência à tração por flexão.....	45
Figura 4.10 – Influência da substituição de 33% metacaulino por diferentes tipos de calcários na resistência à compressão.....	46
Figura 4.11 – Influência da redução da quantidade de ligante na resistência à tração.....	47
Figura 4.12 – Influência da redução da quantidade de ligante na resistência à compressão.....	48
Figura 4.13 – Influência da substituição parcial de metacaulino castanho por calcário cozido a 800° na resistência à tração por flexão.....	49
Figura 4.14 – Influência da substituição parcial de metacaulino castanho por calcário cozido a 800° na resistência à compressão.....	50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constituintes utilizados no fabrico de cimento Portland.....	6
Tabela 2.2 – Componentes principais.....	7
Tabela 2.3 – Evolução dos cimentos obtidos por ativação alcalina. (Torgal et al., 2007).....	9
Tabela 2.4 – Volume de exploração de rochas com fins ornamentais (DGEG, 2011).....	13
Tabela 3.1 – Composição elementar do metacaulino branco (Oliveira, 2014).....	20
Tabela 3.2 – Composição do metacaulino castanho.....	21
Tabela 3.3 – Composição elementar da areia.....	22
Tabela 3.4 – Composição das misturas realizadas.....	26
Tabela 3.5 – Data de construção e dia do ensaio das misturas.....	29
Tabela 4.1 – Designação das misturas e diferenças em relação à mistura base <i>MB100</i>	35
Tabela A.1 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>MB100</i>	A-2
Tabela A.2 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>MB80</i>	A-2
Tabela A.3 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>MB67</i>	A-3
Tabela A.4 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>CNC20</i>	A-3
Tabela A.5 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>CNC33</i>	A-4
Tabela A.6 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>CC620</i>	A-4
Tabela A.7 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>CC633</i>	A-5
Tabela A.8 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>CC820</i>	A-5
Tabela A.9 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>CC833</i>	A-6
Tabela A.10 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>MC100</i>	A-6
Tabela A.11 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>MC80</i>	A-7
Tabela A.12 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>MC67</i>	A-7
Tabela A.13 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura <i>CC833*</i>	A-8
Tabela B.1 – Peso dos provetes das misturas.....	B-1
Tabela B.2 – Peso específico dos provetes das misturas em kg/m^3	B-2
Tabela B.3 – Valores médios do peso e peso específico das misturas.....	B-3

SIMBOLOGIA

Notação Química

Al_2O_3	Óxido de alumínio (Alumina)
CO_2	Dióxido de carbono
CaCO_3	Carbonato de cálcio (Calcário)
CaO	Óxido de cálcio (Cal)
Ca_3SiO_5	Silicato tricálcico
Cl	Cloro
FeO	Óxido de ferro (II)
Fe_2O_3	Óxido de ferro (III) (Ferrugem)
H_2O	Água
K_2O	Óxido de potássio
MgO	Óxido de magnésio
MnO	Óxido de manganês
NaOH	Hidróxido de sódio
NaSiO_4	Silicato de sódio
Na_2O	Óxido de sódio
P_2O_5	Pentóxido de fósforo
SO_3	Óxido sulfúrico
SiO_2	Dióxido de silício (Sílica)
TiO_2	Dióxido de titânio

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O avanço da ciência e da tecnologia tem permitido ao Homem obter maior conforto e qualidade de vida. Mas, por vezes, este aumento do conforto faz-se às custas de agressões ao meio ambiente, tais como, a desflorestação e a exploração exagerada dos recursos naturais a poluição das águas, dos solos e do ar. Foi no último século que se assistiu a um crescimento do ritmo de consumo desses recursos levando o planeta para um elevado estado de degradação. A sociedade tem vindo a consciencializar-se de que os recursos não são inesgotáveis e que se tem de tomar medidas mais responsáveis e tornar as suas ações mais sustentáveis.

E o sector da construção é responsável por muita da exploração dos recursos naturais, pois o betão, a seguir à água, é o produto mais consumido do planeta (CIMPOR, 2016). Na composição do betão é utilizado em geral como ligante o cimento do tipo Portland. Na sua produção a indústria cimenteira gera poluição desde a extração da matéria até à última etapa do processo recorrendo a grandes gastos energéticos provenientes de recursos naturais não renováveis, o carvão e o petróleo.

Para reduzir esses consumos tem-se vindo a verificar um aumento na utilização de adições e adjuvantes no cimento Portland, e estima-se que ocorra um crescimento dessa utilização devido ao desenvolvimento de plastificantes e pozolanas tais como sílica de fumo, cinzas volantes, metacaulino e escórias de alto-forno. No entanto, o metacaulino, material produzido com menores gastos energéticos quando comparado com o cimento Portland, utilizado como ligante, tem vindo a apresentar boas qualidades a vários níveis, capazes de superar limitações do cimento Portland, maior resistência mecânica, durabilidade e desempenho ambiental.

Paralelamente, outra questão preocupante consiste na produção de resíduos por parte de outras indústrias, material esse que não tem utilidade e por vezes é de difícil reciclagem. Uma boa solução passa por incorporar estes resíduos em novos materiais, não só reduzindo o impacto ambiental, como poderão ainda valorizar o próprio ligante.

Assim, com esta dissertação pretende-se estudar um material estrutural que, em relação aos utilizados atualmente, tenha vantagens em relação à sustentabilidade substituindo o consumo de recursos do cimento Portland por outros alternativos envolvendo a utilização de resíduos

provenientes de outras indústrias, de forma a tornar os materiais, tais como as argamassas e o betão, menos dependentes de cimento.

Estudaram-se misturas onde se utilizou como ligante o metacaulino, em substituição do cimento Portland. Para ativar alcalinamente o metacaulino da mistura, foi utilizado um ativador composto por Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio. Como agregado foi usada areia, devido à dimensão dos provetes. Para além disso, teve-se como objeto de estudo a incorporação de resíduo calcário, na perspetiva de poder ser considerado com a função de ligante.

O resíduo em estudo provém de uma indústria de processamento de pedra calcária. Ou seja, é o resíduo produzido pelo corte da pedra. Foi introduzido na mistura base em substituição parcial do metacaulino nas percentagens de 20 e 33%. Este resíduo foi ainda utilizado em 3 contextos distintos: na forma crua e na forma processada, tendo sido levado ao forno durante meia hora às temperaturas de 600 e 800° C.

Ao betão é-lhe exigido dispor de diversas características para aplicação estrutural; entre as mais importantes encontram-se a resistência à compressão e a durabilidade. Assim, de modo a avaliar os parâmetros de resistência, foram construídos provetes paralelepípedicos com dimensões 160x40x40mm, que foram sujeitos a ensaios de resistência à tração por flexão e a ensaios de resistência à compressão. Devido ao facto deste material ser recente, ainda não existe uma norma específica para a realização dos ensaios. Deste modo, os ensaios foram realizados segundo as normas específicas do betão armado.

Com a realização dos ensaios pretende-se estudar a influência da variação da percentagem da substituição parcial de metacaulino por calcário nos parâmetros resistentes de tração por flexão e compressão. Também se pretende conhecer a influência da variação da temperatura de cozedura do calcário.

Em suma, o que motivou esta dissertação foi a possibilidade de se produzir um betão alternativo, com menos impacto ambiental. Deste modo tenta-se compatibilizar a utilização de ligantes alternativos ao cimento com o destino a dar aos resíduos das indústrias, neste caso, as indústrias de exploração e processamento de pedra calcária. Deste ponto de vista, foram realizados ensaios experimentais que pretendem contribuir e aumentar os conhecimentos sobre o comportamento do metacaulino como ligante incorporando resíduos.

A dissertação está organizada em duas partes distintas. Na primeira parte é apresentada uma breve revisão da literatura existente acerca do presente estudo e temas que com este se relaciona. Ao longo desta parte justifica-se a motivação por este estudo, não só pela descoberta de novos

materiais bem como a tentativa de resolver assuntos relacionados com o meio ambiente. São também aqui expostos conhecimentos de alguns investigadores que estudaram assuntos semelhantes e que de certa forma deram incentivo e sustento ao presente estudo. A segunda parte dedica-se à campanha experimental realizada e aos resultados obtidos. Assim como a discussão desses resultados de onde se retiraram as devidas conclusões.

Em detalhe, a dissertação está estruturada em 5 capítulos. No Capítulo 1 é feita uma introdução ao tema, um enquadramento geral do estudo e o que motivou a elaboração desta dissertação.

No Capítulo 2 apresentam-se os temas relacionados com a produção de misturas com metacaulino e misturas realizadas com cimento Portland. Destacando-se temas que visam contribuir para betões e argamassas que tentam ter um melhor desempenho no meio ambiente, ou seja, que fazem recurso a produtos de certa forma inúteis, permitindo assim reduzir a quantidade de ligante a introduzir na mistura. Neste capítulo foi dada importância às questões relacionadas com o ambiente tentando mais uma vez alertar para aspetos que se devem ter em atenção devido à crescente e elevada procura por recursos naturais.

No Capítulo 3 descreve-se a campanha experimental, os materiais utilizados, as várias misturas realizadas bem como o processo de realização dos provetes. Apresenta-se também detalhadamente os respetivos procedimentos normalizados dos ensaios realizados que garantem credibilidade aos valores obtidos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados que se obtiveram nos ensaios efetuados, e são também analisados e comparados com as diferentes misturas realizadas.

No Capítulo 5, e último, são apresentadas as conclusões relevantes a que se chegou para o tema em causa. Com base nos conhecimentos que foram adquiridos, são descritas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados com este tema.

2 CONCEITOS BÁSICOS

Um dos objetivos primordiais da ação humana consiste em não comprometer o futuro das próximas gerações, por outras palavras, importa garantir a sustentabilidade do planeta. Ou seja, importa definir ações e atividades humanas que visam suprir as necessidades atuais dos seres humanos. Neste contexto, a sustentabilidade está diretamente relacionada com o desenvolvimento económico e material com o menor impacto no meio ambiente, usando os recursos naturais de forma inteligente para que eles se mantenham no futuro. A adoção de ações de sustentabilidade garantem a médio e longo prazo uma boa qualidade de vida para as gerações futuras.

No caso particular do sector da construção civil, ações tais como: a exploração planeada dos recursos minerais, i.e. de forma controlada e racionalizada; a diminuição do consumo de combustíveis fósseis de modo a preservar as reservas de recursos minerais e a diminuir a poluição do ar; decisões voltadas para a reciclagem de resíduos sólidos de modo a diminuir a exploração de recursos minerais do solo; o desenvolvimento de produtos com baixo consumo de energia, constituem exemplos a seguir.

De acordo com Kibert (2005), o termo “construção sustentável” contempla os aspetos ambientais, económicos e socioculturais de uma construção quando inserida na comunidade. O objetivo da “construção sustentável” consiste na criação e na manutenção, de uma forma responsável, de um ambiente saudável com base na utilização eficiente de recursos e princípios ecológicos (Kibert, 1994). De acordo com Mateus (2009), a partir da década de 60 começou-se a considerar que seria essencial para a sobrevivência humana a harmoniosa convivência com a natureza, pois não seria sustentável continuar a usar sistemas energéticos alimentados por recursos não renováveis. Este aspeto seria facilmente observado tendo em conta o enorme crescimento populacional e conseqüente aumento da exploração dos recursos naturais, comprometendo gravemente a sustentabilidade das gerações futuras.

Mateus (2009) afirma que na indústria da construção, devido aos processos construtivos que esta utiliza, existe um enorme e excessivo consumo de matérias-primas e de recursos energéticos, que por sua vez, promove uma produção excessiva de resíduos. Já não é de agora o conhecimento de alguns métodos mais sustentáveis que os tradicionalmente usados, só que as construtoras tendem a não considera-los uma vez que, de uma forma errada, concluíam que

eram processos mais dispendiosos e que poriam em causa a sua fiabilidade e comportamento a longo prazo. Segundo o mesmo autor, as empresas de construção e todos os órgãos intervenientes no setor da construção devem encarar a realidade para que se possa ter um mercado sólido e competitivo sem comprometer a sustentabilidade. Metha (2001) considera que uma forma de tornar a indústria da construção mais sustentável poderá passar pela inclusão de resíduos provenientes de outras indústrias nos materiais utilizados.

De referir que os resíduos podem ter origens diversas, para além dos processos de fabrico dos materiais. De facto, na destruição de construções para reutilização do espaço também são produzidas quantidades enormes de resíduos que importa tratar convenientemente de modo a não poluir outros espaços importantes. Para além disso, outros resíduos resultantes de indústrias poluidoras, podem ainda ser reutilizados ou, no limite, serem encerrados com invólucros construídos por estes materiais.

Para que se possa valorizar um resíduo proveniente de um processo de fabrico de uma determinada indústria, prevendo uma reutilização industrial, Guerra (2014) refere que em primeiro lugar é preciso conhecer a influência desse resíduo no desempenho da mistura. E é também de igual necessidade conhecer as quantidades em que a indústria o produz de forma a prever a sua indispensabilidade na mistura final. Só assim será possível avaliar a sua viabilidade.

É conhecida a utilização de ligantes na Antiguidade, muito antes do conhecimento do cimento Portland. Os ligantes obtidos por ativação alcalina vêm ao encontro de técnicas que já foram utilizadas no passado. São ainda hoje merecedoras da nossa atenção obras com milhares de anos, não só pela arquitetura mas também por apresentem na atualidade bom comportamento estrutural. Como exemplo, a construção do Coliseu de Roma consistiu em aglomerar de forma artificial materiais pétreos. Estes “blocos” eram ligados com recurso a solos de origem vulcânica que tinham a propriedade de endurecer sob a ação da água. Outro exemplo, ainda mais antigo, são os monumentos do Egito Antigo em que se utilizou um ligante constituído por uma mistura de gesso calcinado para unir as pedras que deram sustento à construção. Estes materiais naturais apontam superar as limitações que o cimento Portland apresenta. Tais limitações do cimento devem-se não só ao volume libertado de dióxido de carbono originado na sua produção como também ao seu comportamento mecânico e desempenho face às condições do meio ambiente (Pinto, 2004).

É importante obter sistemas de ligantes, em alternativa ao cimento Portland, que tenham igual desempenho e que ao mesmo tempo diminuam o impacto sobre o meio ambiente. Pinto (2004) afirma na sua obra que a (re)descoberta dos referidos materiais com capacidades cimentícias

pode ser uma mais valia. Em comparação com o cimento Portland, permitem não só a incorporação de um leque mais vasto de agregados no seu fabrico como a inclusão de resíduos sólidos provenientes de processos de outras indústrias tais como da queima e incineração bem como restos de pedreiras, demolições ou escombros de mineração.

2.1 Cimento tipo Portland

Na construção civil, o Cimento tipo Portland é o ligante mais utilizado. Esta invenção deve-se ao químico britânico Joseph Aspdin na primeira metade do século XIX. Este investigador foi o revolucionador das experiências com o cimento, obtendo-o da queima de pedra calcária e argila. Findo o processo, o material era triturado até se obter o cimento Portland propriamente dito, constituído por um pó muito fino, com propriedades ligantes, que na presença de água se torna numa pasta homogénea capaz de endurecer e de se tornar sólida como uma rocha (Pinto, 2006).

A produção do cimento é feita essencialmente a partir das matérias-primas calcário e argila. Basicamente o calcário é composto por cálcio e sílica, já a argila para além destes dois compostos, contém ainda alumina e ferro. São misturados em proporções bem determinadas e geralmente, em função da matéria-prima existente, as fábricas procedem à sua correção adicionando materiais tais como areia e minério de ferro. Idealmente utiliza-se as percentagens que a Tabela 2.1 apresenta (Erdem, 2014).

Tabela 2.1 – Constituintes utilizados no fabrico de cimento Portland.

	Óxidos	Designação	Quantidade em %
Principais	CaO	Cal	60 a 68%
	SiO ₂	Sílica	17 a 25%
Secundários	Al ₂ O ₃	Alumina	2 a 9%
	Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro	0,5 a 6%
	MgO	Magnésio	0,1 a 4%
	SO ₃	Trióxido de Enxofre	1 a 3%
	Na ₂ O	Alcalis	0,5 a 1,5%
	K ₂ O		

Para se obter os principais componentes do cimento Portland é preciso induzir transformações químicas e físicas de forma a combinar os constituintes, acima apresentados, na presença de oxigénio, formando compostos binários e ternários. Assim este material precisa de passar por processos de moagem (processo físico), desidratação, calcinação e clinquerização e arrefecimento (processos químicos). Segundo Erdem (2014) originam-se os componentes que se apresentam na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Componentes principais.

Componente	Designação	% (em média)
$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico	60%
$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Silicato dicálcico	20%
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico	10%
$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferro aluminato tetracálcico	10%

Para tal, este material deve sofrer uma rápida elevação de temperatura, seguida de uma diminuição brusca da temperatura, para obter as características ideais de presa e resistência. Já depois de ter sofrido processos de pré-aquecimento, é então cozido em forno a altas temperaturas. Este processo dura aproximadamente 4 horas dando origem ao chamado clínquer. A chama dentro do forno ronda os 2000°C e o material chega a atingir 1500°C. O combustível normalmente utilizado pelas cimenteiras para alimentar o forno é o carvão e o coque de petróleo. Este processo por cada 1600 kg de material gasto apenas produz 1000 kg de clínquer, o restante transforma-se em CO₂ (Secil, 2009).

Todo o processo de produção do cimento Portland é feito à custa de poluição do meio ambiente. Para além do já referido CO₂, produz também outros compostos, entre os quais, o dióxido de enxofre e o dióxido de azoto, os aldeídos e os hidrocarbonetos. Estes “produtos” são os principais responsáveis pela poluição atmosférica. Além destes produtos, as cimenteiras são também responsáveis por libertarem para a atmosfera grandes quantidades de poeiras, nomeadamente silicatos.

2.2 Ligantes de Base Alcalina

2.2.1 Desenvolvimento no tempo

As primeiras tentativas de usar um ativador alcalino no cimento surgiram por volta de 1930 quando se começou a incorporar escória misturada com soluções de cloreto de potássio seco. Consequentemente, desenvolveram-se investigações nesse sentido com o objetivo de analisar o potencial da escória como um componente do cimento. Dez anos depois Purdon apresentou um estudo de cimentos feitos com escória e cal viva sem recorrer ao uso de cimento Portland (Palomo et al., 2014).

Mais tarde, em 1957, Glukhovsky foi o primeiro a investigar a possibilidade de preparar misturas usando calcários, sem a inclusão de materiais cimentícios, propondo um novo sistema de ligantes a que chamou “solo-cimentos”. A sua formação é semelhante, ou praticamente análoga, à de muitos dos minerais e rochas que constituem a crosta terrestre, onde intervêm óxidos de metais alcalinos e alcalino-terrosos, como é o caso dos zeólitos, das micas e dos feldspatos (Palomo et al., 2014; Pinto, 2004). Segundo Pinto (2004) estes cimentos continham uma grande quantidade de ativador alcalino sob a forma de Na_2O e K_2O que determinavam as suas propriedades ligantes. Estes cimentos eram reputados pelos rápidos ganhos de resistência mecânica. Seguiram-se vários estudos onde se utilizaram uma vasta gama de materiais, incluindo a escória de alto-forno, argila, pedras de aluminossilicatos e cinzas.

Dos estudos referidos anteriormente, destacou-se em 1979 o investigador Joseph Davidovits, que patenteou cimentos de base alcalina, os quais deram origem aos “geopolímeros”. De acordo com Pinto (2004), estes ligantes desenvolvem-se nas seguintes etapas:

- a) *Mistura em proporções adequadas de calcário (CaCO_3), dolomite (CaCO_3 e MgCO_3) e caulino;*
- b) *A mistura é triturada, moída e calcinada em fornos a temperaturas da ordem dos 900°C (abaixo das temperaturas de clinquerização);*
- c) *Debaixo destas condições forma-se o metacaulino (que Davidovits designava por kandoxi), um material com propriedades pozolânicas, enquanto que por perda do CO_2 os*

carbonatos de cálcio e magnésio transformam-se em óxidos de cálcio e de magnésio;

- d) Ao adicionar o carbonato de sódio (Na_2CO_3) ou carbonato de potássio (K_2CO_3) juntamente com água, forma-se hidróxido de sódio ($NaOH$) ou potassa cáustica (KOH) que vão desencadear uma reação fortemente exotérmica, com precipitação de um produto de características cimentícias e que se assemelha à analcite e à hidrosodalite.*

De seguida apresenta-se a Tabela 2.3, onde se indica mais detalhadamente, com uma breve descrição, a evolução por ordem cronológica dos estudos mais significativos sobre cimentos obtidos por ativação alcalina que se foram desenvolvendo segundo Torgal et al. (2007).

Tabela 2.3 – Evolução dos cimentos obtidos por ativação alcalina. (Torgal et al., 2007).

Autor	Ano	Descrição
Feret	1939	Cimentos com escórias
Purdon	1940	Combinações alcalis-escórias
Glukhovsky	1965	Primeiros cimentos alcalinos
Davidovits	1979	Termo “Geopolímero”
Davidovits e Sawyer	1985	Patente do cimento “Pyrament”
Malolepsy e Petri	1986	Ativação de escórias sintéticas
Malek. Et al.	1986	Cimentos de escórias com resíduos radioativos
Malek. Et al.	1986	Cimentos de escórias com resíduos radioativos
Wu et al.	1990	Ativação de cimento de escórias
Roy e Malek	1993	Cimento de escórias
Krivenko	1994	Cimentos alcalinos

Segundo Pinto (2004), já existem dispersas pelo Mundo, desde os estados Unidos, França, Alemanha e Nova Zelândia, fábricas que produzem estes ligantes, tendo estes potencialidades mecânicas algo superiores às do cimento Portland.

2.2.2 Metacaulino

É a partir do caulino que se obtém o metacaulino. O metacaulino é obtido pela desidroxilação quase total dos caulinos, processo em que ocorre uma perda substancial de água de constituição, com a correspondente alteração da coordenação do alumínio com o oxigênio. Segundo Pinto (2006), citado por Pereira (2010), o caulino é uma argila composta essencialmente por caulinite, estruturada por justaposição de duas lâminas – tetraédrica de silício e octaédrica de alumínio e/ou magnésio que só podem ser eliminadas com temperaturas acima de 500°C.

Para esse tratamento térmico, segundo Pinto (2004) ainda não há bibliografia que indique valores precisos quanto à temperatura e ao tempo de exposição. Várias hipóteses são colocadas por alguns autores que Pinto (2004) cita na sua obra e que aqui se transcreve:

“A bibliografia disponível não indica valores muito precisos dos parâmetros principais de tratamento térmico, pois, segundo Davidovits, o tempo de exposição é da ordem de 6 horas, enquanto Grazino aponta, como de resto outros autores (Palomo, Murat, por exemplo), para tempos de 24 horas. Todavia, todos utilizam a mesma temperatura de 750°C para o tratamento térmico, embora se refira também que ela deve ser compreendida entre os 600 e os 980°C.”

O que vai de encontro com o referido por Velosa et al. (2007), segundo o qual é preciso um tratamento a altas temperaturas que permita a perda de hidroxilos, mas que seja abaixo da temperatura que permite a formação de uma fase cristalina. Este autor aponta para uma temperatura compreendida entre os 600 e os 900°C.

Depois de ocorrer a desidroxilação, o caulino torna-se num material amorfo e com elevado potencial radioativo. Este material pozolânico tem uma desprezável, ou até nenhuma capacidade cimentícia, mas que na presença de humidade, quando moído em partículas muito finas tem propriedades aglomerantes. Reage também com o hidróxido de sódio à temperatura ambiente ganhando propriedades cimentícias (Lopez, 2009).

Para Siddique et al. (2008), utilizar metacaulino tem como vantagens uma melhoria na resistência à compressão e à flexão, uma maior resistência aos ataques químicos e uma durabilidade superior, comparativamente ao cimento Portland.

2.2.3 Ativação alcalina

A ativação alcalina consiste na reação de hidratação de aluminossilicatos com substâncias alcalinas ou alcalino-terrosas, as quais podem ser hidróxidos, sais de ácidos fracos ou fortes ou ainda sais silicatados (Pinto, 2004). O material utilizado como ligante neste processo é composto por partículas muito finas, contendo essencialmente aluminossilicatos. Quando misturado com um ativador alcalino produz uma mistura que endurece em pouco tempo apresentando valores de resistência elevados. É um processo algo complexo e que ainda não está descrito na totalidade (Guerra, 2014). Segundo Fernández-Jiménez (2008), citado por Guerra (2014), o referido composto utilizado como ligante poderá ser entre outros o metacaulino, cinzas volantes ou sílica. O ativador geralmente utilizado é a mistura em proporções adequadas entre o hidróxido de sódio e o silicato de sódio. Este ativador encontra-se no estado líquido, contendo água e, de acordo com Škvára (2007), esta água serve de “transportador” aos agentes alcalinos, a qual, depois de o material ganhar presa, pode continuar na sua estrutura. Guerra (2014) refere que a qualidade dos geopolímeros em termos de resistência depende da fonte de aluminossilicatos, do ativador, dos agregados da quantidade de água e da quantidade de ligante utilizado. Salienta também que a eventual ocorrência da referida água que se verifique após a presa pode indicar que as reações químicas não foram totalmente concluídas o que também se poderá traduzir na redução da resistência. Sendo assim de boa prática envolver os provetes com uma película plástica quando se realiza a sua amassadura de modo a suprimir trocas de água com o meio envolvente (Pinto, 2004).

Durante o estudo de um modelo conceptual para ativação alcalina Provis (2013) constatou que a esmagadora maioria das reações químicas (superior a 90%) do metacaulino com o silicato de sódio acontecem nas primeiras 48 horas de cura.

2.3 Resíduos industriais

Define-se resíduo industrial como sendo todo o material sobrança da produção industrial e que não pode ser simplesmente descartado. Devido a ser originado por processos industriais podem ser perigosos e trazer efeitos negativos quer para o meio ambiente quer para a saúde da população. É preciso assim haver um controle e um processo específico para dar o destino correto a um determinado resíduo. Constituem exemplos de resíduos cinzas, borracha, óleos, madeira, papel, escórias, cerâmicas, fibras, etc. De acordo com Borges (2007), a gestão de um resíduo deve seguir uma ordem hierárquica sendo que em primeiro lugar deve-se prevenir a

sua produção; se for produzido então importa arranjar uma forma de o valorizar e caso não seja possível proceder à sua eliminação.

2.3.1 Sustentabilidade ambiental

A atividade industrial tem vindo a apresentar um rápido crescimento a nível mundial. Esse crescimento tem como consequência o aumento da poluição, causando grande impacto no meio ambiente, diminuindo a qualidade de vida da população. Entre inúmeras formas de poluição encontra-se a poluição causada pelos resíduos industriais. Segundo Torgal et al. (2005), de acordo com o Relatório realizado pelo Instituto dos Resíduos, em Portugal produzem-se 30 milhões de toneladas de resíduos industriais por ano dos quais 57% provêm de minas e pedreiras como mostra a Figura 2.1.

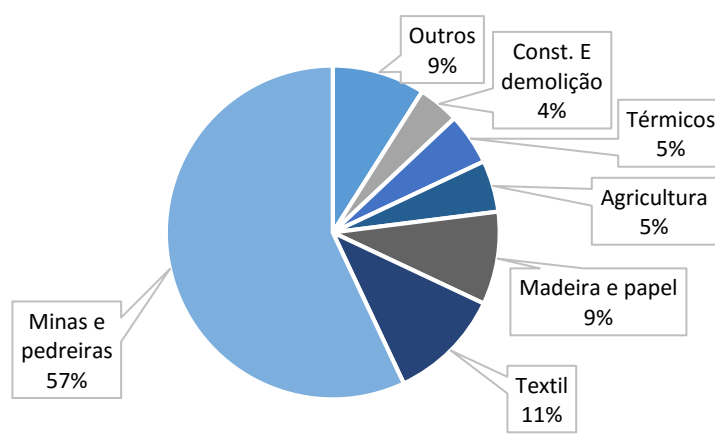


Figura 2.1 – Resíduos industriais produzidos em Portugal (Torgal et al., 2005).

Depois de serem produzidos, em geral, verificam-se várias dificuldades tais como o acondicionamento, o manuseio a recolha, o transporte, o tratamento e um eventual depósito final. No entanto a sua reciclagem é uma necessidade não só pela contaminação ambiental que possa provocar como também pela possibilidade de diminuir o consumo de recursos naturais, dando viabilidade a um desenvolvimento sustentável.

Os resíduos da extração e do tratamento das rochas estão a ser cada vez mais estudados devido ao impacto ambiental que provocam quando descartados indevidamente na natureza e devido ao enorme potencial que possuem como matéria-prima. Na sua maioria estes resíduos são

despejados em lagos, rios, estradas ou acabam por ficar depositados nas próprias pedreiras causando severas agressões à fauna e à flora, assim como à saúde da população, principalmente quando se encontra no estado seco. Esta preocupação, em dar destino a estes resíduos, baseia-se também no crescimento deste setor, em especial no que diz respeito às rochas para fins ornamentais pois estas indústrias chegam a apresentar 70% de desperdícios no total produzido (Silva, 2008a). A Tabela 2.4 apresenta o volume de exploração anual mundial dos tipos de rochas mais utilizados com fins ornamentais segundo dados da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG, 2011).

Tabela 2.4 – Volume de exploração de rochas com fins ornamentais (DGEG, 2011).

Rochas ornamentais	Toneladas ($\times 10^3$)
Mármore e calcários	988
Granitos e similares	1047
Pedra para calcetamento	695
Pedra rústica	113
Ardósia e xistos	13,6
Total	2856

Lucas et al. (2008), na sua pesquisa sobre resíduos sólidos, indica que a utilização maioritária desses resíduos têm-se verificado na produção de blocos de cimento, tijolos, telhas, lajetas para pisos e forros. Afirma ainda existirem estudos com especial foco nos resíduos com maior interesse, tais como as lamas de estações de tratamento de água e efluentes, cinzas de centrais hidroelétricas, areias de fundição, escórias de fornos, resíduos de serragem de granitos.

Segundo Uchikawa citado por Silva (2008b), para que seja viável a utilização, em grande escala, dos resíduos industriais, estes devem ser mais económicos do que as matérias-primas convencionais de modo a serem atrativos às indústrias do setor. Considerando os custos de adaptação a um novo material ou tecnologia de processamento, estes resíduos não devem afetar de forma negativa a qualidade do material produzido, bem como o seu uso não pode causar poluição do ambiente. Não menos importante para viabilizar o resíduo industrial, este deve ter um fornecimento sem quebras e em quantidades suficientes.

2.3.2 Incorporação de resíduos no cimento Portland

A incorporação de resíduos no betão é uma realidade conhecida e que está em fase de crescimento. Alguns destes, quando utilizados em substituição parcial do ligante podem apresentar vantagens quanto à sua durabilidade e, conseqüentemente proporcionar uma poupança significativa na utilização de cimento com efeitos na poupança de recursos naturais e diminuição da quantidade de emissões de gases com efeito de estufa causados pelo fabrico do cimento (Marques, 2014).

Na literatura podem ser encontrados inúmeros estudos sobre a incorporação de resíduos no cimento Portland; desde a incorporação como ligantes ou simplesmente como inertes, ou podendo tratar-se de resíduos finos ou grossos. Estes últimos referem-se maioritariamente a resíduos provenientes de demolições de construções. Faz-se então aqui referência de alguns trabalhos, os que mais se adequam com o presente estudo e que de alguma forma podem contribuir para que se obtenham melhores resultados.

As escórias de alto-forno, escória de aço, as escórias de chumbo, entre outras, quando são bruscamente arrefecidas em água adquirem propriedades cimentícias ou pozolânicas; granulometrias específicas e níveis de dureza elevados. As escórias de alto-forno são já frequentemente adicionadas em substituição parcial do cimento Portland, substituições essas que podem chegar aos 90%, embora as propriedades deste comecem a alterar-se para substituições acima dos 40% (Resende, 2009).

As cinzas volantes também são frequentemente adicionadas ao cimento Portland pelas cimenteiras, nomeadamente cinza volante siliciosa e cinza volante calcária. Segundo Loureiro (2013), as cinzas volantes são obtidas através da precipitação estática ou mecânica das poeiras arrastadas pelos gases de combustão da queima de caldeiras alimentadas a carvão pulverizado. Estas podem ser processadas de diversas formas, seleção, peneiração, secagem, mistura, moagem ou redução de carbono. Assim processadas, podem ser cinzas volantes de origens diferentes.

Cunha (2013) estudou a substituição parcial do cimento por cinzas de resíduos sólidos urbanos provenientes da inceneração, isto é, resíduos constituídos maioritariamente por materiais combustíveis, papel, cartão, plásticos e em menor peso, têxteis e madeira e ainda com uma pequena percentagem de material inorgânico como vidro, metal e outros. No seu estudo chegou à conclusão que ocorreu perda de resistência, com aumento da substituição parcial, mas houve uma melhoria da resistência à reação álcali-sílica, isto é, melhorou o material quanto à sua

durabilidade. O mesmo autor fez também o estudo com cinzas de pellets, estes produzidos com resíduos florestais, como restos de árvores, madeira já utilizada, entre outros. Neste caso concluiu que o material perdeu resistência à compressão com a introdução deste resíduo, uma perda de durabilidade e um maior grau de carbonatação. E assim verificou que este material não contribuiu para a valorização das propriedades resistentes.

Um estudo levado a cabo por Matos (2010), que consistiu na substituição parcial do cimento por resíduos de vidros moídos, observou-se que o material teve uma perda de resistência mecânica à medida que aumentou a idade dos provetes. Quanto à carbonatação também piorou o seu desempenho mas melhorou o desempenho ao ataque por cloretos. Um outro estudo em que se utilizou também o vidro moído foi protagonizado por Silva (2013). Na sua obra refere que este resíduo é proveniente de vidrarias e que apenas o moeu com o objetivo de evitar um possível gasto de energia com tratamentos. Substituiu parcialmente o cimento por 5, 10, 15 e 20% por este resíduo. Concluiu que em percentagens de substituição parcial de 5 e 10% revelaram uma alternativa viável para betões com fins estruturais.

Cordeiro et al. (2009) estudou a influência da substituição parcial do cimento Portland por cinza ultrafina da casca do arroz com elevado teor de carbono. Encontrou na sua constituição sílica cristalina, que prevê existir nesta cinza depois de atingir temperaturas acima dos 800°C. Utilizou uma moagem ultrafina para conferir à cinza uma maior homogeneidade. Em massa substituiu 10, 15 e 20% do cimento Portland. Os resultados que obteve no seu estudo indicaram que esta cinza ultrafina produziu algumas melhorias significativas nas propriedades resistentes, nomeadamente aumento da resistência à compressão.

Um outro estudo, conduzido por Machado (2012), pretendeu analisar a influência da substituição parcial de 10, 20, 30 e 50% de resíduos da indústria de pedreiras graníticas. Para tal incorporou este resíduo no estado “cru” húmido conforme o recebeu e no estado seco. Também o processou levando-o ao forno a 800°C durante 2 horas. De uma forma geral concluiu que a mistura que apresentou melhor comportamento foi na que incorporou o resíduo cozido. Tanto no ensaio à compressão como à flexão, esses valores, para as misturas em que se incorporou 20 e 30% de resíduo cozido, situaram-se sempre próximos ou mesmo acima dos valores apresentados pela sua mistura de referência.

Já Sardinha (2014) tratou de estudar a influência da substituição do cimento por resíduos de mármore. Este autor fez substituições de 5, 10 e 20% em volume de cimento. No entanto estudou esta introdução do resíduo com a adição conjunta de adjuvantes, plastificante corrente ou superplastificante de alto desempenho. Concluiu que em geral a substituição do cimento por resíduo de mármore diminui o desempenho, embora que para as taxas de 5 e 10% essa perda de

capacidades não seja significativa. Mas por outro lado, concluiu que a introdução de plastificante corrente revelou melhorias nas propriedades nos betões produzidos sem que em geral, a presença do resíduo de corte de mármore reduzissem a sua eficiência. Já o superplastificante de alto desempenho demonstrou ser o mais capaz para corrigir esta perda de capacidade, sendo que na presença deste, a substituição de 20% de cimento (em volume) não apresenta variações significativas nas propriedades do betão em relação ao betão de referência sem adjuvantes que o autor realizou.

Como referido, os resíduos podem assumir uma de três funções principais; ou contribuem como ligantes na mistura, ou funcionam como inertes, ou produzem alterações nas propriedades finais do produto. Portanto, não menos importante, também é necessário avaliar quando os resíduos constituem uma boa alternativa como agregado. A vantagem corresponde ao prejuízo evitado. Segundo Fernandes (2011), para que o emprego de agregados no fabrico de betão seja acreditado é necessário comprovar a qualidade dos novos agregados e do betão com incorporação parcial ou total dos agregados reciclados. Existem já vários estudos realizados onde se comparam as características físicas do betão convencional com as do betão com agregados reciclados. Alguns desses estudos têm apresentado resultados satisfatórios em relação à sua utilização em estruturas. Varias questões se colocam acerca do uso desses agregados; por exemplo, acerca do seu comportamento perante processos de deterioração que podem ocorrer nos betões convencionais como a corrosão das armaduras, a ação gelo-degelo, o ataque por sulfatos e as reações álcalis-agregado.

Uma adição, do tipo quase inerte, que já se tem vindo a aplicar, consiste na adição do filer calcário, material que é originário das rochas calcárias ou jazidas aluvionares e que tem como principal constituinte o carbonato de cálcio (CaCO_3). Este material muito fino, de acordo com Ho et al. (2002), pode ser utilizado para aumentar a viscosidade da pasta, em especial, quando se pretende aumentar o volume de finos. Permite uma maior uniformidade da granulometria da mistura, e desta forma, controla-se melhor a quantidade de água usada, tendo-se assim uma melhoria da trabalhabilidade e diminuindo a exsudação (Pinto, 2011). É então um material cada vez mais utilizado em estruturas com grandes massas de betão, onde frequentemente ocorre fendilhação devido aos gradientes térmicos. Permite ainda reduzir o calor de hidratação diminuindo o aumento de temperatura do betão (Nunes, 2001).

2.3.3 Incorporação de resíduos em ligantes de base alcalina

Não foram encontrados trabalhos em que se incorporou o resíduo calcário em ligantes de base alcalina. Um estudo semelhante foi realizado por Guerra (2014) intitulada “Avaliação Experimental do Comportamento Mecânico de Materiais Ativados Alcalinamente” em que nas misturas, tendo por base o metacaulino, foram adicionadas cinzas provenientes do fabrico de tijolo cerâmico, cerâmica cozida e cerâmica não cozida, divididas em 3 tipos distintos de granulometria. O recurso a estes materiais justificava-se no facto de terem sido submetidos previamente a elevadas temperaturas e por apresentarem semelhantes granulometrias quando comparadas com a do cimento Portland. No seu trabalho, não obteve uma mistura que apresentasse melhores valores para todos os parâmetros que estudou, mas obteve, no entanto, várias misturas que apresentaram significativas melhorias em alguns parâmetros resistentes.

2.4 Caracterização do calcário

O termo calcário deriva do latim “calcarium” que significa “o que contém cal”. Na superfície terrestre, os afloramentos de calcários de origem orgânica são os mais frequentes. O calcário é uma rocha constituída fundamentalmente por carbonato de cálcio, sendo que este poderá ser encontrado na forma de calcite ou de aragonite. Normalmente contém impurezas tais como, sílica, argila, fosfato, magnésio, matéria orgânica, entre outras. É uma rocha muito utilizada na produção de cimento, pedra de construção, cal, corretivo de solos, entre outras aplicações.

O calcário sendo submetido a temperaturas elevadas em fornos industriais, processo designado como calcinação (decomposição térmica), dá origem ao óxido de cálcio (CaO) correntemente conhecido como cal. Para se dar tal reação, o forno deve estar no mínimo a 850°C; No entanto o processo de calcinação só tem total eficiência entre 900 a 1000°C. A calcinação perfeita das rochas calcárias depende particularmente das condições de operação do forno e da qualidade da matéria-prima. Mas a falta de conhecimento da relação desses fatores na qualidade e produtividade da cal virgem, faz com que a operação dos fornos dependa muito mais da experiência de quem os opera (Soares, 2007). Esta cal também é designada de cal viva ou virgem e é um composto sólido branco.

Assim, tendo em consideração o ponto de vista energético, pois interessa reduzir esses gastos, com base em conhecimento de pessoas experientes que trabalham na área, decidiu-se neste trabalho levar ao forno, o resíduo calcário, submetendo-o a duas temperaturas distintas; a 600

e a 800° C. O intervalo de tempo utilizado para manter a temperatura no forno foi de meia hora, uma vez que considerando a quantidade e a disposição que foi dada ao material dentro do forno, esse intervalo seria suficiente para que todo o material atingisse as referidas temperaturas. A elevação da temperatura faz com que o calcário fique com uma estrutura amorfa de modo a proporcionar melhores propriedades resistentes quando utilizado como ligante.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente capítulo pretende-se descrever toda a fase experimental, desde a caracterização e preparação dos materiais que foram utilizados até à cura dos vários tipos de misturas com eles realizados. Serão também apresentadas as metodologias e o procedimento dos ensaios que se efetuaram de forma a avaliar os parâmetros mecânicos pretendidos para o estudo; a tensão de rotura à tração por flexão e a tensão de rotura à compressão.

A produção das misturas e os ensaios foram realizados no Laboratório LEMEC do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. O seu desenvolvimento contou com a colaboração do Sr. José Lopes, funcionário do Laboratório de Geotecnia da mesma universidade, na preparação do calcário em estudo. É também de referir o apoio dos colegas João Fernandes e Diana Guerra, que paralelamente desenvolveram um estudo semelhante envolvendo outros parâmetros. As 2 misturas de referência, posteriormente apresentadas e designadas como misturas base, foram realizadas em conjunto.

3.1 Materiais utilizados nas misturas

3.1.1 Metacaulino

Para a realização das várias misturas utilizou-se como ligante 2 tipos de metacaulino; um com nome comercial “*MetaMax® HRM*” e o outro “*ARGECO*”. O primeiro apresenta cor branca e foi facultado em saco pela empresa americana “*Engelhard*”. O segundo foi adquirido a granel à empresa francesa “*Argeco Développement*” e tem uma cor acastanhada, como se pode observar na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Metacaulinos utilizados nas misturas.

Para além de se diferenciarem na cor, existe outra característica distinta que consiste na massa volúmica, sendo menor a do metacaulino de cor branca. Estes metacaulinos são materiais constituídos por partículas muito finas com elevado teor em aluminossilicatos e têm alta reatividade. Quando misturados com outros materiais reativos irão desenvolver diversas reações químicas que proporcionam um aumento das propriedades resistentes.

O metacaulino branco já foi objeto de estudo no LEMEC. Este material apresenta uma massa volúmica de 2500 kg/m^3 e superfície específica de $13 \text{ m}^2/\text{g}$ tendo as suas partículas uma dimensão média de $1,2 \text{ }\mu\text{m}$. Os seus constituintes elementares são apresentados em percentagem na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição elementar do metacaulino branco (Oliveira, 2014).

Elemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	FeO
Percentagem	57	37	0,15	2,73	0,40	1,26	0,42	0,54	0,36

Como já foi referido, o metacaulino castanho tem maior massa volúmica, sendo esta de 2510 kg/m^3 , sendo constituído por partículas com dimensão média de $5,7 \text{ }\mu\text{m}$ com superfície específica de $20,1 \text{ m}^2/\text{g}$. A sua composição elementar é rica em sílica e alumina. Essa composição foi facultada pela empresa fornecedora e apresenta-se na Tabela 3.2. Como se pode

verificar nas Tabelas 3.1 e 3.2, ambos os metacaulinos são ricos em sílica (SiO_2) e em alumina (Al_2O_3); o metacaulino branco com mais alumina e o metacaulino castanho com mais sílica.

Tabela 3.2 – Composição do metacaulino castanho.

Elemento	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	TiO_2	Fe_2O_3	MgO	CaO	MnO	Na_2O
Percentagem	70,2	21,8	0,38	1,15	2,20	0,09	0,02	0,27	0,09

3.1.2 Ativador

O ativador utilizado consistiu numa combinação, à proporção em peso de 1 parte de hidróxido de sódio (NaOH) com 2 partes de silicato de sódio (NaSiO_4). Neste contexto pode referir-se que se trata de um ativador composto. A componente hidróxido de sódio é responsável pela separação das principais componentes do metacaulino; a sílica e a alumina. Já o silicato de sódio tem como função proporcionar as ligações que condicionam a rigidez das misturas, nomeadamente os aluminossilicatos.

Para a obtenção do hidróxido de sódio juntou-se soda cáustica com água. A mistura realizou-se à proporção de 1 kg de soda cáustica para 2,5 litros de água. A soda cáustica que se usou foi adquirida na empresa “*Sociedade Portuense de Drogas, S.A*” a qual a forneceu em forma de grão, em sacos de 1 kg. Este produto é frequentemente utilizado para tratamento de resíduos e para desobstrução de canos pois é um produto muito reativo e corrosivo pelo que esta preparação teve de ser efetuada com o máximo cuidado para não causar lesões. Outro cuidado que teve de se ter, e não menos importante, é que durante a mistura desenvolvem-se reações exotérmicas com libertação de hidrogénio, fazendo com que este composto atinja temperaturas na ordem dos 70°C . Entre outras preocupações, recorreu-se a um recipiente metálico apropriado. Quando a mistura arrefece apresenta-se no estado líquido e incolor.

O silicato de sódio foi fornecido pela mesma empresa, a qual o comercializa com o nome “*Silicato de Sódio D40*” em recipientes de 20 litros. Este produto apresenta-se num estado líquido e com alguma viscosidade sendo incolor e inodoro.

3.1.3 Areia

A areia que se utilizou como inerte neste estudo foi extraída junto ao nó da autoestrada A1, na zona de Taveiro. Esta já foi estudada pelo que a sua composição elementar já é conhecida e apresenta-se na Tabela 3.3. Tem uma densidade de 2,64kN/m³ e a sua curva granulométrica pode ser observada na Figura 3.2 (Guerra, 2014).

Tabela 3.3 – Composição elementar da areia.

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

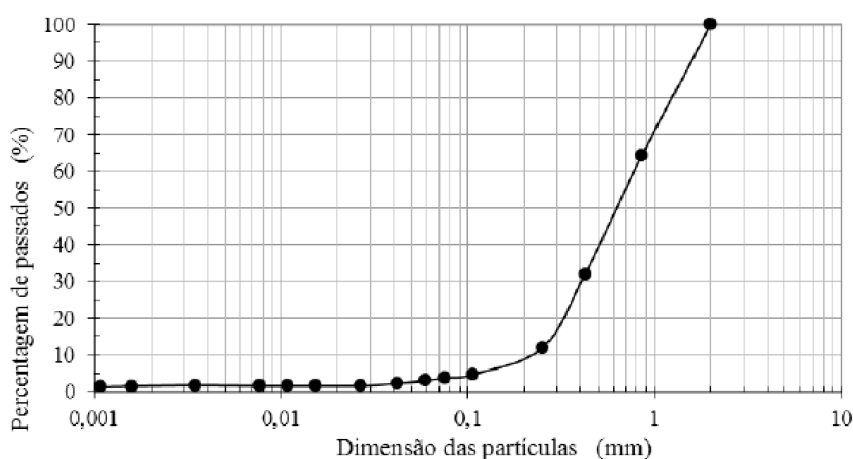


Figura 3.2 – Curva granulométrica da areia utilizada (Pereira, 2013).

3.1.2 Resíduo Calcário

Tal como referido nos objetivos do trabalho, pretende-se incorporar o resíduo calcário nas misturas, analisando o seu potencial como ligante em substituição parcial do metacaulino. O calcário é uma rocha sedimentar formada maioritariamente por carbonato de cálcio CaCO₃. Não interessa aqui abordar os diversos tipos de calcário. Importa saber que entre as “impurezas” podem encontrar-se a sílica e a alumina. Por exemplo, numa das análises realizadas num

cimento foram detetadas quantidades elementares de 21% de sílica e de 6% de alumina (Guerra 2014). É neste contexto que se pensa poder valorizar este resíduo.

O resíduo calcário, doravante designado de calcário, que se utilizou neste trabalho, foi dispensado pela empresa “*MVC Mármore de Alcobça, Lda*”. Este material é tratado como um resíduo, pois provem do corte da pedra calcária que esta empresa comercializa. A serragem das pedras é feita em bloco por máquinas com lâminas diamantadas que são refrigeradas por água. Isto é um processo abrasivo do qual resulta um resíduo com grande quantidade de água e pó da rocha, o referido calcário em estudo. Este é canalizado até aos tanques de decantação onde se separa da maioria da água que o transportou. Findo o processo, o calcário é prensado para expelir mais água e depositado em contentores. Trata-se portanto de um material inútil enquanto que a água é reaproveitada para um novo ciclo. Este material também já tem vindo a ser aproveitado por fábricas de produção de cimento, mas devido aos custos de transporte, a empresa coloca-o normalmente em aterro.

O dito calcário em estudo foi recolhido num dos contentores que se encontravam em serviço no processo do corte de modo a garantir a máxima pureza do resíduo. Verificou-se que no aterro dessa empresa existiam outros resíduos na sua composição como por exemplo restos de pedras e lixos resultantes de limpezas.

Como já foi referido, na altura em que foi recolhido, o calcário encontrava-se em blocos, devido a ter sido prensado, não estando completamente seco. No laboratório foi seco em estufa durante 2 dias à temperatura de 20°C, com uma humidade de 50%. A Figura 3.3 mostra o calcário depois desse processo de secagem.



Figura 3.3 – Calcário depois do processo de secagem.

Depois de seco, o calcário solidificou, ficando com alguma coesão. Foi necessário recorrer à moagem num almofariz, com a ajuda de um pilão, resultando então o pó de calcário ilustrado na Figura 3.4. Foi este um dos tipos de calcário usado nas misturas, que se designará por calcário não cozido *CNC*.

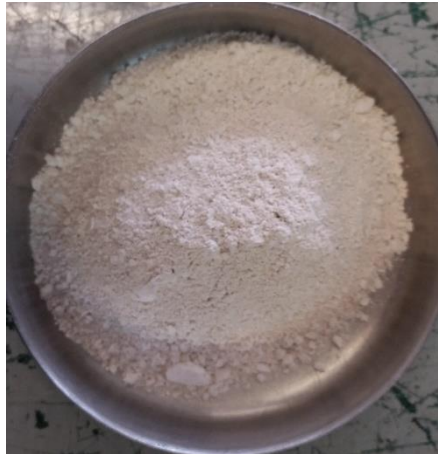


Figura 3.4 – Calcário não cozido utilizado nas misturas.

Alternativamente, outro tipo de calcário utilizado consistiu no calcário cozido. Assim, com recurso a um cadinho, recipiente que suporta elevadas temperaturas, cozeu-se este calcário *CNC* no forno durante meia hora, a duas temperaturas distintas; 600 e 800°C. Doravante, esses calcários cozidos serão designados por *CC6* e *CC8*, respetivamente. De referir que foi realizada a pesagem do material antes e depois da cozedura apresentando variação nula. Não houve portanto evaporação e/ou sublimação de qualquer quantidade de material.

3.2 Misturas

As misturas geopoliméricas realizadas têm por base a ativação alcalina que consiste em misturar compostos que reagem entre si e dão origem a geopolímeros. Nas misturas realizadas foram utilizados 2 metacaulinos distintos, o de cor branca e o de cor castanha, como ligante, e como ativador, o composto formado por hidróxido de sódio e silicato de sódio, nas devidas proporções, tal como referido anteriormente. Tendo em consideração a dimensão dos moldes dos provetes, apenas se utilizou areia como inerte. É de referir que o ativador só se adicionou à mistura nas quantidades necessárias para garantir a sua trabalhabilidade.

Com o objetivo de estudar a influência da substituição parcial do metacaulino branco por calcário, realizaram-se diversas misturas. Como ponto de partida, realizou-se a mistura base *MB100*, sendo esta a de referência, já estudada pelo LEMEC, e cuja “receita” está bem definida (Guerra, Oliveira, etc.). Com base nessa mistura de referência, realizaram-se as misturas *CNC20* e *CNC33*, onde se substituiu 20% e 33% de metacaulino, respectivamente, por calcário não cozido, o já referido *CNC*. Como termo de comparação realizaram-se 2 outras misturas em que se reduziram as mesmas quantidades (20% e 33%) de metacaulino, mas onde não foi adicionado qualquer quantidade de calcário; as misturas *MB80* e *MB67*, respectivamente. De referir que a quantidade de calcário adicionado corresponde à percentagem em peso do metacaulino utilizado na mistura *MB100*. Na programação do trabalho, pensou-se que este conjunto de misturas constituía a base para a análise pretendida; substituição parcial do metacaulino por *CNC*. Para além disso, permitem ainda analisar a influência da quantidade de ligante na mistura.

Foi também objeto de estudo a influência da cozedura do calcário no tipo de calcário utilizado. Assim, realizaram-se duas misturas em que se adicionou calcário cozido a 600°C *CC6* e outras duas em que se utilizou calcário cozido a 800°C *CC8*. Para cada temperatura fizeram-se duas misturas em que, como anteriormente, se substituiu 20% e 33% de metacaulino. No caso em que se utilizou o calcário tipo *CC6*, designam-se por *CC620* e *CC633* as misturas realizadas, e por *CC820* e *CC833* no caso do calcário tipo *CC8*.

Adicionalmente, e para se tentar perceber se se pode tirar as mesmas conclusões para o metacaulino castanho realizaram-se 4 misturas extra. Uma mistura base *MC100*, de referência, 2 misturas em que se reduziu a percentagem de metacaulino em 20% e 33%, designadas por *MC80* e *MC67*, respectivamente, e por fim uma outra em que substituiu 33% de metacaulino por calcário tipo *CC8*, designando-se esta mistura por *CC833**.

Na Tabela 3.4 apresentam-se as quantidades dos materiais que compõem as misturas realizadas, quantidades essas que foram necessárias para construir 6 provetes com dimensões 40x40x160mm. Na fase de execução dos provetes, utilizando *MB*, obteve-se aproximadamente meio provete de material excedente. Nas misturas de *MC* não houve sobras de material, tendo-se até registado um défice de 2,7mm na altura do provete 6 da mistura *CC833**. Importa referir que as misturas base apresentam uma razão em peso de ligante/agregado de 1:2,5; as misturas em que houve redução de 20% de metacaulino, esta relação foi de 1:3,13, e foi de 1:3,75 onde se fez uma redução de 33% de ligante.

Tabela 3.4 – Composição das misturas realizadas.

Designação	Metacaulino	Areia	Hidróxido de sódio	Silicato de sódio	Calcário CNC	Calcário CC6	Calcário CC8
MB100	750g	1875g	300g	600g	-	-	-
MB80	600g	1875g	243	486g	-	-	-
MB67	500g	1875g	226g	452g	-	-	-
CNC20	600g	1875g	300g	600g	150g	-	-
CNC33	500g	1875g	300g	600g	250g	-	-
CC620	600g	1875g	300g	600g	-	150g	-
CC633	500g	1875g	300g	600g	-	250g	-
CC820	600g	1875g	300g	600g	-	-	150g
CC833	500g	1875g	300g	600g	-	-	250g
MC100	750g	1875g	215g	430g	-	-	-
MC80	660g	2063g	215g	430g	-	-	-
MC67	575g	2156g	215g	430g	-	-	-
CC833*	500g	1875g	203g	406g	-	-	250g

3.3 Procedimento experimental

Previamente à realização da amassadura das misturas foi preciso preparar os moldes. Moldes estes que estão de acordo com a norma NP EN 196, na qual cada molde deve conter 3 compartimentos, cada um com secção transversal de 40x40mm e comprimento 160mm. Estas misturas têm grande tendência para aderir às superfícies do aço de que são feitos os moldes, sendo depois difícil desmoldá-los (Guerra, 2014). Nesse contexto, foi então preciso colocar na sua base uma película plástica, mais propriamente designada de filme de polietileno, e recorrer ao uso de uma laca V-66, a qual é normalmente utilizada como isolante em componentes

eletrónicos, de modo a impermeabilizar as faces laterais dos moldes. Deste modo, foi possível desmolda-los com alguma facilidade, sem recorrer a grandes impactos, nem danificar os provetes, que interessava garantir de modo a manter a sua integridade. A Figura 3.5 apresenta os moldes utilizados onde já se encontra colocada a referida película.



Figura 3.5 – Moldes utilizados para a construção dos provetes.

Também foi necessário preparar o hidróxido de sódio a partir da soda cáustica como se explicou na subsecção 3.1.2. A água foi medida com recurso a uma proveta graduada e a soda foi pesada numa balança calibrada. Após a mistura, deixou-se arrefecer. Posteriormente fez-se a pesagem da quantidade necessária e, nas proporções já referidas anteriormente, foi adicionado o silicato de cálcio para se obter o ativador composto, processo este feito com recipientes de vidro.

Quanto aos restantes materiais, o metacaulino, o inerte e o calcário, foram posteriormente pesados numa balança calibrada, utilizando recipientes de plástico. Realizados estes procedimentos passava-se à amassadura.

A amassadura foi feita numa misturadora como mostra a Figura 3.6 e os materiais foram introduzidos na mistura de acordo com Pinto (2002), primeiro colocado o inerte e posteriormente, de forma lenta, o ligante e o ativador composto.



Figura 3.6 – Elaboração da mistura.

Depois de se ter uma pasta homogénea passou-se à colocação da mistura nos moldes. Posterior procedeu-se à vibração para expulsar o ar existente para que a mistura fique mais compacta e melhore as capacidades resistentes do material. Para este efeito, vibraram-se os provetes cerca de 1 minuto numa mesa vibratória.

Os provetes foram cobertos com película de plástico de forma a evitar a evaporação da fase líquida permitindo assim que se completassem as reações químicas. De seguida os provetes foram guardados num local climatizado à temperatura de 20°C e com uma humidade relativa próxima de 70%.

Para terminar este processo, todos os provetes foram descofrados 7 dias após a sua execução. Nesse mesmo dia foram numerados, medidas as suas dimensões e pesados. Os valores correspondentes à largura b e à altura h , de cada provete, encontram-se tabelados no Anexo A. A Tabela 3.5 indica a data em que os provetes foram construídos e o número de dias de cura que os provetes tinham à data do ensaio.

Tabela 3.5 – Data de construção e dia do ensaio das misturas.

Mistura	Data de construção (2015)	Dia do ensaio
MB100	23 Março	17
MB80	21 Setembro	20
MB67	21 Setembro	20
CNC20	25 Março	15
CNC33	21 Setembro	20
CC620	22 Abril	18
CC633	22 Abril	18
CC820	29 Maio	19
CC833	29 Maio	19
MC100	23 Março	17
MC80	1 Outubro	16
MC67	1 Outubro	16
CC833*	1 Outubro	16

Como se pode constatar da tabela anterior os ensaios dos provetes realizaram-se entre o 15º e 20º dia da sua cura. Com este tempo de cura pressupõe-se que os provetes tenham atingido praticamente todas as suas capacidades resistentes.

3.4 Procedimento de ensaio

Como é sabido, no contexto das estruturas de betão armado, o betão é essencialmente utilizado para resistir à compressão. Obviamente que desempenha outras tarefas; proteção das armaduras, resistência à tração, etc. O mesmo se espera deste tipo de misturas geopoliméricas em estudo. Assim, com o intuito de conhecer as suas características mecânicas, realizaram-se 2 tipos

ensaios; o ensaio de rotura à tração por flexão e o ensaio de rotura à compressão, permitindo assim obter-se os valores da tensão de rotura à tração por flexão σ_t e os valores da tensão de rotura por compressão σ_c , respetivamente. O ensaio de rotura à tração por flexão foi o primeiro a ser efetuado. Neste ensaio, o provete é dividido em 2 partes, esperando-se que sejam aproximadamente iguais em comprimento. Sobre cada uma das duas “metades” é possível realizar a seguir o ensaio de rotura à compressão.

3.4.1 Ensaio de rotura à tração por flexão

Submeteram-se os provetes ao ensaio de rotura à tração por flexão com o objetivo de se obter os seus respetivos valores de σ_t . Para tal, adotou-se o modelo de carga que a norma NP EN 12390-5 (2009) prevê. A Figura 3.7 apresenta esse modelo.

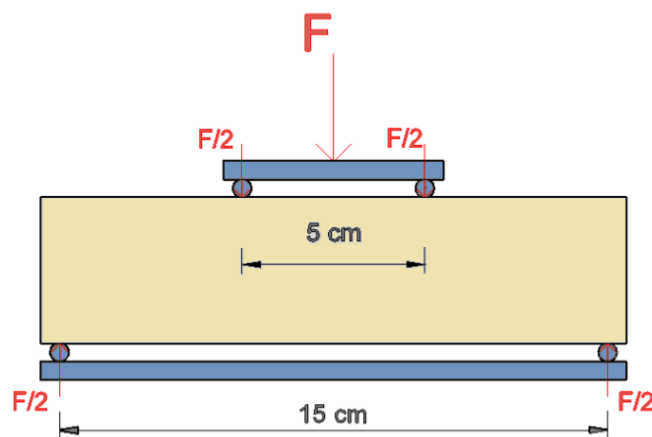


Figura 3.7 – Modelo de carga do ensaio conforme a norma NP EN 12390-5.

Neste modelo, os provetes são submetidos a um momento fletor constante no tramo central, ou seja, na zona entre as cargas $F/2$. Como o momento fletor é nulo junto aos apoios, a máxima tensão de tração ocorrerá na superfície inferior do tramo central. Sabendo então a força máxima F , que normalmente provoca a rotura, considerando uma análise estática e admitindo que as tensões variam linearmente em altura, é possível determinar o valor σ_t através da expressão:

$$\sigma_t = \frac{6M}{bh^2} = F \frac{L}{2} \frac{6}{bh^2} = 3 \frac{FL}{bh^2} \quad (3.1)$$

Em que b é a largura e h a altura do provete, M o valor do momento máximo correspondente à força F e L a distância entre os apoios. O valor médio da mistura é a média dos valores de σ_t apurados para os provetes correspondentes.

O esquema de ensaio, tal como é indicado na Figura 3.10, foi montado recorrendo as duas placas de neoprene colocadas entre os pratos da prensa e as chapas metálicas do esquema, indicadas a azul. Este pormenor é visível na Figura 3.11. Estas chapas de neoprene tinham por objetivo absorver possíveis impactos.

O ensaio foi realizado com controlo de deformação, recorrendo para o efeito ao atuador eletromecânico “*Servosis série ME-402*” existente no laboratório. Este ensaio contemplava duas fases. A primeira servia para fazer o “encosto” da prensa ao provete, onde a aplicação da ação era realizada a uma velocidade constante de 0,06 mm/s até se atingir aproximadamente um décimo da carga esperada na rotura. Na segunda fase levava-se o provete à rotura. Para que se reduzissem os efeitos dinâmicos associados ao ensaio e se pudesse considerar um ensaio estático, esta fase teria que demorar pelo menos 3 minutos. De forma a cumprir esse requisito, o equipamento foi programado para aplicar a ação à velocidade constante de 0,006 mm/s até se atingir a rotura do provete. A Figura 3.8 mostra o esquema de ensaio, antes e depois da rotura.

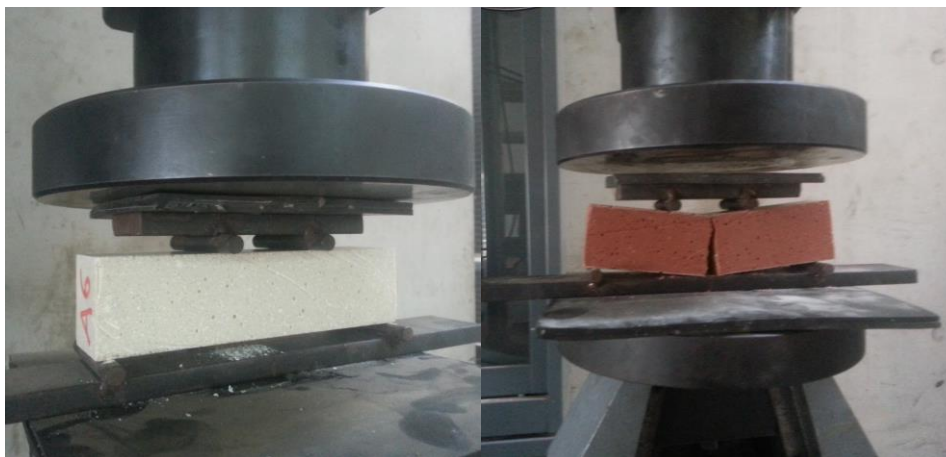


Figura 3.8 – Provetes antes e depois da rotura submetidos ao ensaio de rotura à tração por flexão.

3.4.1 Ensaio de rotura à compressão

Como referido, este ensaio é realizado sobre as duas “metades” que resultaram do ensaio anterior. A norma NP EN 196-1 (2006) estabelece que este ensaio deve ser executado imediatamente a seguir ao ensaio à tração por flexão. Para o efeito, utilizou-se o mesmo atuador eletromecânico munido de um dispositivo específico, o qual é ilustrado na Figura 3.9. Este dispositivo está regulamentado na norma EN ISO 7500-1 (2004).



Figura 3.9 - Esquema do ensaio de compressão.

Tal como no caso anterior, o esquema encontrava-se separado dos pratos da prensa por chapas de neoprene com o mesmo objetivo referido. A metodologia para este ensaio é idêntica ao ensaio anterior, ou seja, também é realizado em 2 fases e com controlo de deformação. Na primeira faz-se o “encosto” até se atingir aproximadamente um décimo da carga máxima esperada. Para esta fase programou-se o atuador com uma velocidade constante de 0,1 mm/s. Na segunda fase, reduziu-se a velocidade para 0,007 mm/s até se ter atingido a rotura da peça por compressão. A redução da velocidade, pelas mesmas razões que no ensaio anterior, tem como objetivo assegurar que esta última fase demore no mínimo 3 minutos, para que os efeitos dinâmicos sejam reduzidos e o ensaio possa ser considerado como estático. Deste ensaio consegue-se obter o valor da força máxima F de compressão do material e assim determinar o correspondente valor da tensão σ_c , através da seguinte expressão:

$$\sigma_t = \frac{F}{b h} \quad (3.2)$$

Em que b e h são as dimensões das peças metálicas do dispositivo que encostam no material, 40x40mm. O valor médio da mistura será a média dos valores σ_c obtidos nos provetes correspondentes. A Figura 3.10 ilustra uma das partes do provete na fase de rotura.



Figura 3.10 – Rotura do provete após ensaio à compressão.

A norma NP EN 12390-3 (2011) permite classificar o modo de rotura do provete. Assim, se a rotura corresponder a um dos modos que se apresentam na Figura 3.11, o ensaio é satisfatório. Todos os provetes ensaiados apresentaram um modo de rotura satisfatório.



Figura 3.11 – Modos de rotura satisfatórios conforme a norma NP EN 12390-3.

4 RESULTADOS

No presente capítulo são expostos e analisados os resultados provenientes da execução dos ensaios de rotura à tração por flexão e de rotura à compressão dos provetes das misturas anteriormente referidas. É possível relacionar estas misturas de formas distintas, confrontando os valores médios da tensão de rotura à tração por flexão e de rotura à compressão obtidos para cada uma, podendo-se assim fazer diversos tipos de análise.

Os valores individuais, correspondentes aos ensaios de cada um dos provetes, de cada mistura, encontram-se ao longo das tabelas do *Anexo A*. Nesse anexo apresenta-se também o coeficiente de variação que é coeficiente que permite avaliar a qualidade dos ensaios. Permite assim dizer que os ensaios realizados às misturas são bastante aceitáveis. No *Anexo B* são apresentados os pesos e pesos específicos de cada provete de cada mistura bem como os correspondentes valores da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação.

Para uma melhor perceção dos subcapítulos que se seguem, apresenta-se a Tabela 4.1 com a designação atribuída às misturas realizadas e a sua diferença em relação à mistura base, designada por *MB100*, constituída por 750g de metacaulino com nome comercial de “*MetaMax® HRM*”, 1875g de areia e 900g de ativador composto. Tal como referido anteriormente, este ligante tem cor branca, daí a designação de metacaulino branco *MB*. Para comparação, também foi utilizado um outro ligante de cor castanha, designado por metacaulino castanho *MC*. Como se pode verificar, foram realizadas dois tipos de ação distintos; ou redução, ou substituição da quantidade de ligante da mistura por calcário. No que diz respeito à substituição, recorreu-se ainda a diversos tipos de calcário, onde se fez variar a temperatura de cozedura, tal como referido anteriormente. Importa recordar ainda que, a redução da quantidade de ligante também foi acompanhada de uma redução do ativador composto de modo a manter a trabalhabilidade da mistura.

Tabela 4.1 – Designação das misturas e diferenças em relação à mistura base *MB100*.

Designação	Diferença em relação à mistura MB100
MB80	Redução de 20% de metacaulino
MB67	Redução de 33% de metacaulino
CNC20	Substituição de 20% de metacaulino por calcário não cozido
CNC33	Substituição de 33% de metacaulino por calcário não cozido
CC620	Substituição de 20% de metacaulino por calcário cozido a 600°C
CC633	Substituição de 33% de metacaulino por calcário cozido a 600°C
CC820	Substituição de 20% de metacaulino por calcário cozido a 800°C
CC833	Substituição de 33% de metacaulino por calcário cozido a 800°C
MC100	Utilização de metacaulino castanho (igual a MB100)
MC80	Redução de 20% de metacaulino castanho
MC67	Redução de 33% de metacaulino castanho
CC833*	Substituição de 33% de metacaulino castanho por calcário cozido a 800°C

Com base nos resultados obtidos, pretende-se por um lado, analisar a influência da redução da quantidade de ligante, e por outro lado, analisar a influência da substituição do ligante por calcário. Ou seja, pretende-se perceber o que acontece à mistura base *MB100* em termos de resistências à tração por flexão e à compressão. Outro aspeto importante consiste na temperatura de cozedura do calcário, ou seja, interessa perceber se aumentando a temperatura de cozedura isso trará alguma influência na resistência. Por fim, interessa comparar os resultados obtidos com o metacaulino branco com os do metacaulino castanho e perceber se se poderá tirar as mesmas conclusões.

4.1 Influência da substituição de metacaulino branco por calcário

Com vista a avaliar a influência da adição de calcário nas misturas de metacaulino branco compararam-se misturas onde se substituiu o metacaulino pelo mesmo tipo de calcário, calcário não cozido *CNC*, cozido a 600 e 800°C *CC6* e *CC8* respetivamente. Isto é, com cada tipo de calcário, compararam-se as misturas onde se substituiu 20% e 33% do metacaulino por calcário permitindo serem confrontadas com a mistura base *MB100*. Adicionalmente, para se perceber o contributo das dosagens de cada calcário compararam-se as misturas referidas com as misturas onde foi igualmente reduzida a percentagem de metacaulino mas não foi adicionado calcário, misturas *MB80* e *MB67*.

4.1.1 Substituição de metacaulino por calcário não cozido

Pretende-se neste ponto avaliar a influência da substituição parcial de metacaulino por calcário não cozido *CNC*. Assim, tendo por base os valores médios da mistura base de metacaulino branco *MB100*, confrontam-se os resultados obtidos para as misturas obtidas substituindo parte do metacaulino por *CNC*, neste caso, substituindo 20% do metacaulino *CNC20* e 33% do metacaulino *CNC33*. Para além disso, são ainda comparados os resultados obtidos para as misturas com igual quantidade de metacaulino, mas sem qualquer quantidade de *CNC*, ou seja, as misturas *MB80* e *MB67*.

De referir que os resultados individuais relativos a cada provete são indicados no *Anexo A*. Na Figura 4.1 apresentam-se os valores médios da resistência à rotura à tração por flexão σ_t de cada uma das misturas indicadas.

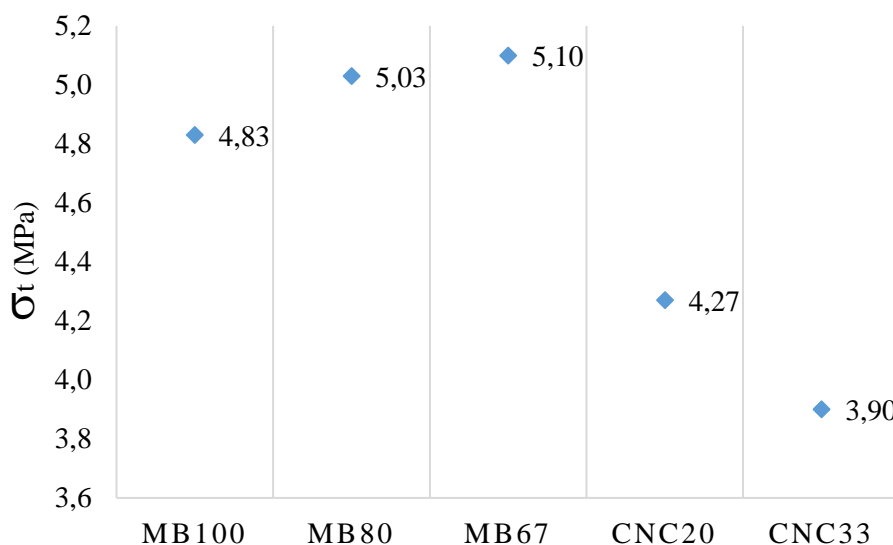


Figura 4.1 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário não cozido na resistência à tração por flexão.

Relativamente à mistura base, os resultados obtidos para as misturas sem *CNC*, revelam um ligeiro aumento de σ_t ; 4% no caso *MB80*, e cerca de 6% no caso *MB67*. A introdução de *CNC* na mistura conduziu a uma redução da resistência. No caso *CNC20*, a redução foi de 12% e de 15% relativamente às misturas *MB100* e *MB80*, respetivamente. Para a mistura *CNC33*, a redução foi de 19% e de 24% relativamente às misturas *MB100* e *MB67*, respetivamente.

Com base nos resultados obtidos, pode dizer-se que aumentando a quantidade de calcário não cozido na mistura, em substituição de metacaulino branco, verifica-se uma perda de resistência à tração por flexão. Tendo apenas em conta os resultados apurados para as misturas *MB100*, *CNC20* e *CNC33*, é possível aproximar a seguinte linha de tendência que apresenta um coeficiente de determinação R^2 igual à unidade.

$$\sigma_t = 2,04 + 2,79\xi \quad (4.1)$$

Onde ξ representa a percentagem de metacaulino branco não substituído. Aceitando esta variação, significa a perda de cerca de 6% da resistência σ_t por cada 10% de metacaulino substituído.

Em relação à resistência à rotura por compressão σ_c , apresentam-se na Figura 4.2 os valores médios obtidos para as misturas indicadas anteriormente.

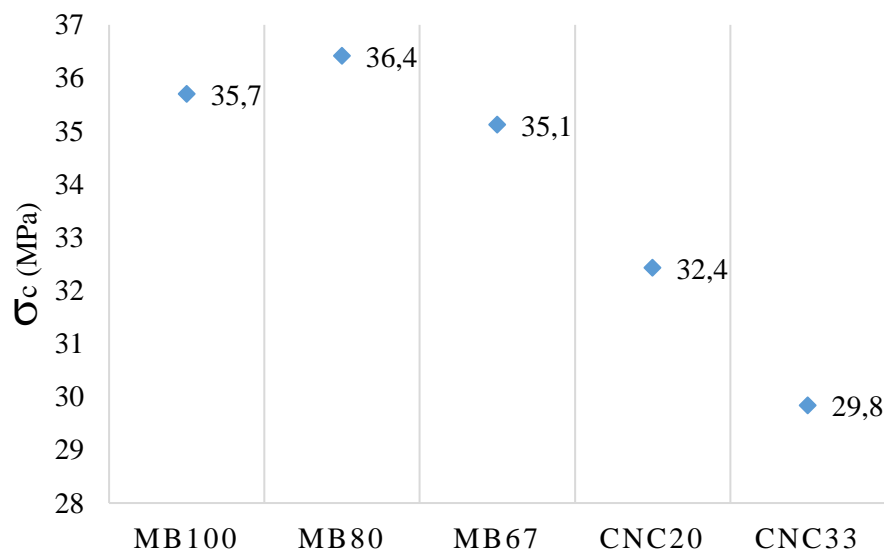


Figura 4.2 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário não cozido na resistência à compressão.

A principal conclusão é equivalente à retirada na avaliação do parâmetro anterior; uma redução na resistência à rotura por compressão quando se aumenta a percentagem de substituição de metacaulino por calcário não cozido na mistura. De facto, o valor médio de σ_c da mistura *MB80* é cerca de 2% superior ao valor correspondente da mistura *MB100*, enquanto que o da mistura

MB67 é cerca de 2% inferior; semelhantes portanto. No entanto, o valor médio de σ_c da mistura *CNC20* é cerca de 9% inferior ao valor correspondente da mistura *MB100*, e é 11% inferior ao da mistura *MB80*. Relativamente à mistura *CNC33*, o valor médio de σ_c é cerca de 17% e 15% inferior aos valores das misturas *MB100* e *MB67*, respetivamente.

Considerando igualmente os resultados apurados para as misturas *MB100*, *CNC20* e *CNC33*, é possível aproximar a seguinte linha de tendência com coeficiente R^2 de 0,997.

$$\sigma_c = 18,1 + 17,6\xi \quad (4.2)$$

Aceitando uma vez mais este tipo de variação, significa a perda de cerca de 5% da resistência σ_c por cada 10% de metacaulino substituído.

Assim, com base nestes 2 parâmetros de resistência, é possível concluir que a introdução na mistura de calcário não cozido só contribui de forma negativa, pelo que não é recomendada a sua utilização com objetivos estruturais.

4.1.2 Substituição de metacaulino por calcário cozido a 600°C

Neste ponto pretende-se avaliar a influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido durante 30 minutos à temperatura de 600°C, designando as misturas por *CC6*. Neste caso, substituiu-se 20% do metacaulino na mistura *CC620* e 33% do metacaulino na mistura *CC633*. Os resultados obtidos são comparados com os das misturas com igual quantidade de metacaulino, mas sem qualquer quantidade de calcário, ou seja, as misturas *MB80* e *MB67*.

Importa recordar que os resultados individuais são indicados no *Anexo A*. Na Figura 4.3 apresentam-se os valores médios de σ_c de cada uma das misturas indicadas.

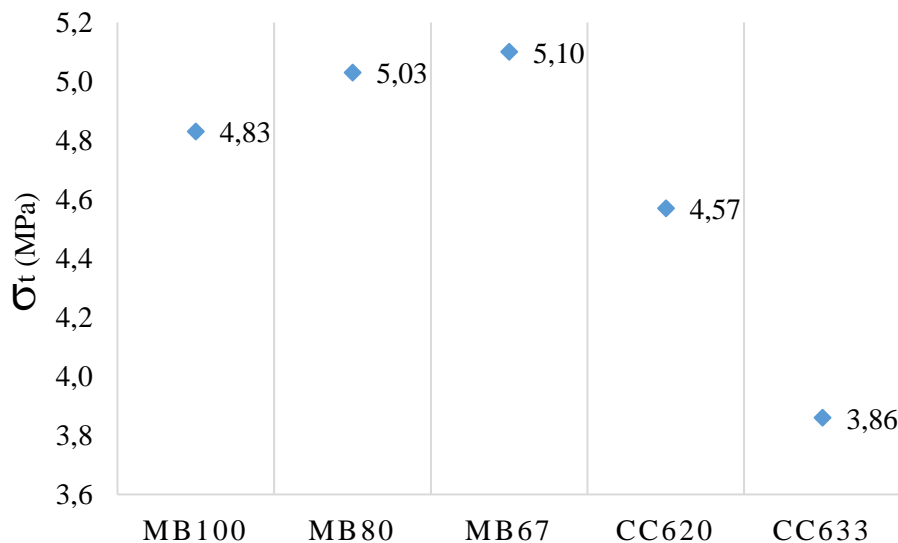


Figura 4.3 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido a 600° na resistência à tração por flexão.

Os resultados permitem concluir que a introdução de *CC6* na mistura traduziu-se numa redução da resistência σ_t . No caso *CC620*, a redução foi aproximadamente de 5% e de 9% relativamente às misturas *MB100* e *MB80*, respetivamente. Neste caso a redução pode classificar-se como sendo ligeira. Já para a mistura *CC633*, a redução foi de 20% e de 24% relativamente às misturas *MB100* e *MB67*, respetivamente, o que não é de desconsiderar.

Tendo apenas em conta os resultados apurados para as misturas *MB100*, *CC620* e *CC633*, é possível aproximar a seguinte linha de tendência ($R^2 = 0.865$).

$$\sigma_t = 2,13 + 2,78\xi \quad (4.3)$$

É importante referir que esta aproximação pode conduzir a estimativas pouco ajustadas devido a R^2 se afastar um pouco da unidade. Mas, aceitando esta variação, significa a perda de cerca de 6% da resistência σ_t por cada 10% de metacaulino substituído.

Em relação a σ_c , apresentam-se na Figura 4.4 os valores médios obtidos.

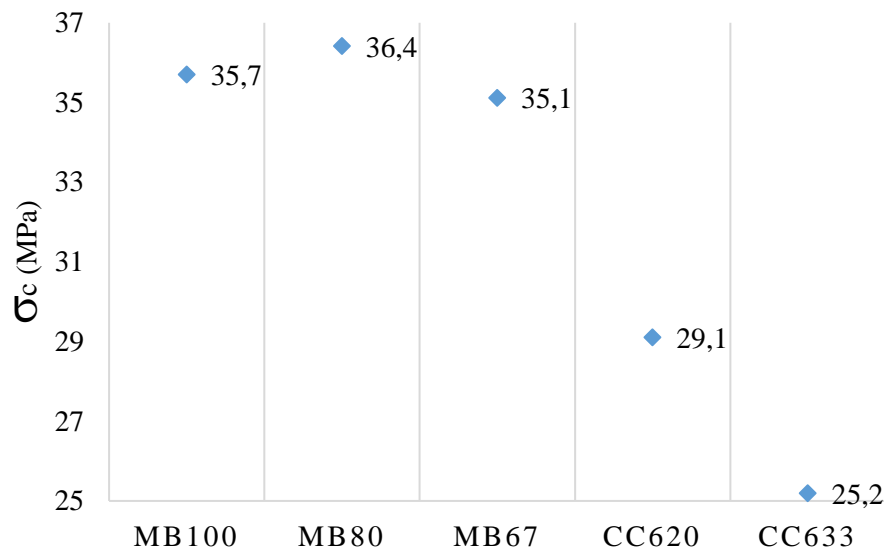


Figura 4.4 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido a 600°C na resistência à compressão.

De igual forma, conclui-se que ocorre uma redução de σ_c quando se aumenta a percentagem de substituição de metacaulino por calcário cozido a 600° na mistura. O valor médio de σ_c da mistura *CC620* é 18% inferior ao valor da mistura *MB100*, e é 20% inferior ao da mistura *MB80*. Relativamente à mistura *CC633*, o valor médio de σ_c é 29% e 28% inferior aos valores das misturas *MB100* e *MB67*, respetivamente. Relativamente a este parâmetro, as reduções podem ser consideradas como significativas.

Tal como anteriormente, os resultados das misturas *MB100*, *CC620* e *CC633* permitem aproximar a seguinte linha de tendência ($R^2 = 0,999$).

$$\sigma_c = 3,7 + 31,9\xi \quad (4.4)$$

Aceitando esta variação, significa a perda de cerca de 9% da resistência σ_c por cada 10% de metacaulino substituído.

Tal como no ponto anterior, com base nos mesmos 2 parâmetros, a introdução na mistura de calcário cozido a 600° prejudica a resistência do material, neste caso, de um modo mais significativo a resistência à compressão.

4.1.3 Substituição de metacaulino por calcário cozido a 800°C

Pretende-se agora avaliar a influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido durante 30 minutos à temperatura de 800°C, designando por *CC820* a mistura onde foi substituído 20% do metacaulino e por *CC833* a mistura onde foi substituído 33% do metacaulino. Faz-se também a comparação com as misturas desprovidas de calcário, i.e. as misturas *MB80* e *MB67*. Na Figura 4.5 apresentam-se os valores médios de σ_t de cada uma das misturas indicadas.

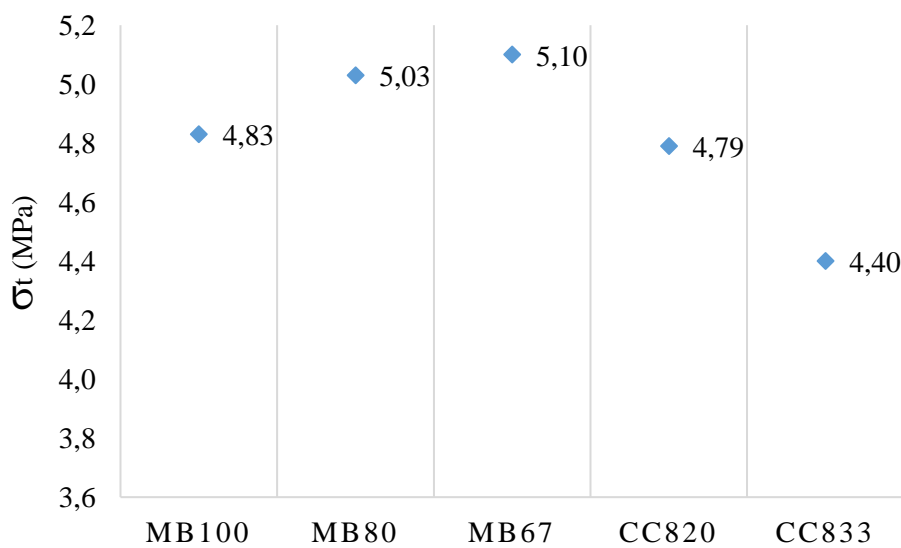


Figura 4.5 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido a 800° na resistência à tração por flexão.

Como tem vindo a acontecer, a introdução de calcário cozido à temperatura de 800°C *CC8* diminuiu a resistência σ_t . No caso *CC820*, a redução foi quase insignificante; de apenas 1% e cerca de 5% relativamente às misturas *MB100* e *MB80*, respetivamente. Já na mistura *CC633*, a redução foi de 9% e cerca de 14% relativamente às misturas *MB100* e *MB67*, respetivamente.

De igual modo ao anterior, para as misturas *MB100*, *CC820* e *CC833*, é possível aproximar a seguinte linha de tendência ($R^2 = 0.723$).

$$\sigma_t = 3,68 + 1,20\xi \quad (4.5)$$

Estando R^2 um pouco afastado da unidade pode conduzir a erros na aproximação feita. Mas, com base nesta tendência, conclui-se que há uma perda de cerca de 2% da resistência por cada 10% de metacaulino substituído.

Em relação a σ_c , apresentam-se na Figura 4.6 os valores médios obtidos.

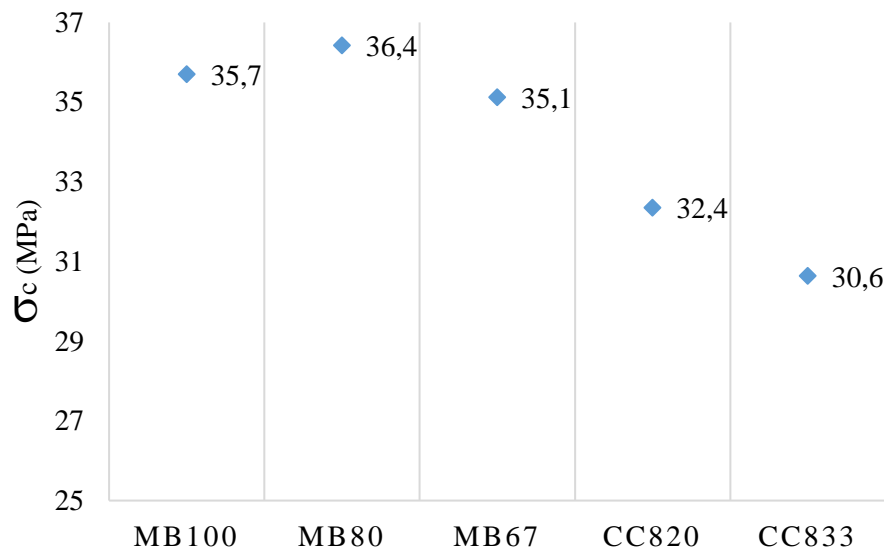


Figura 4.6 – Influência da substituição parcial de metacaulino por calcário cozido a 800°C na resistência à compressão.

Igualmente, aumentando a quantidade de $CC8$ na mistura, o valor de σ_c reduz. O valor médio de σ_c da mistura $CC820$ é 9% inferior ao valor da mistura $MB100$, e é 11% inferior ao da mistura $MB80$. Relativamente à mistura $CC833$, o valor médio de σ_c é 14% e 13% inferior aos valores das misturas $MB100$ e $MB67$, respetivamente. Estes valores não podem ser desprezados, embora não sejam condicionantes em termos de consideração do material.

A linha de tendência realizada com base nos valores das misturas $MB100$, $CC820$ e $CC833$, indicada de seguida apresentou um R^2 de 0,997. Existe assim uma redução de cerca de 4% da resistência σ_c por cada 10% de metacaulino substituído.

$$\sigma_c = 20,2 + 15,4\xi \quad (4.6)$$

Concluindo, mais uma vez, a introdução de calcário, neste caso cozido a 800°C, não beneficiou a resistência na mistura inicial.

4.2 Influência do tipo de calcário na substituição de metacaulino branco

Neste ponto pretende-se avaliar a influência do tipo de calcário na substituição parcial de metacaulino na mistura. Por tipo de calcário, entenda-se calcário não cozido, ou cozido durante 30min a diferentes temperaturas. Comparam-se então os resultados das misturas que contêm *CNC*, *CC6* e *CC8* com os da mistura de base *MB100*.

4.2.1 Substituição de 20% de metacaulino

Para avaliar a influência da substituição de 20% de metacaulino, confrontam-se de seguida os resultados obtidos para as misturas que contêm essa percentagem de calcário na mistura, ou seja, as misturas *CNC20*, *CC620* e *CC820*. Como já foi referido, indicam-se ainda os resultados da mistura base *MB100*. Na Figura 4.7 podem observar-se os resultados relativos a σ_t .

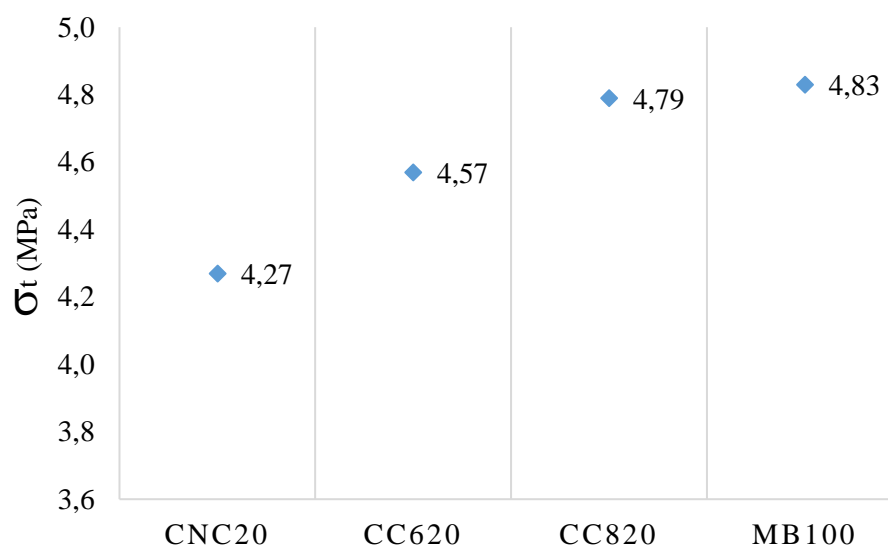


Figura 4.7 – Influência da substituição de 20% metacaulino por diferentes tipos de calcários na resistência à tração por flexão.

No que diz respeito a σ_t , a mistura *CNC20* perdeu cerca de 12% em relação a *MB100*. Já a mistura *CC620* perdeu menos resistência que a anterior, cerca de 5%, e *CC820* foi a que apresentou menor redução; apenas 1% relativamente a *MB100*. Tendo em conta os valores das misturas *CNC20*, *CC620* e *CC820*, pode aproximar-se a linha de tendência indicada de seguida ($R^2 = 0,97$). Para o cálculo supôs-se que o calcário não cozido *CNC* esteve sujeito a uma temperatura de 20°C.

$$\sigma_t = 4,25 + 0,6\theta \quad (4.7)$$

onde θ representa a temperatura em °C/1000. Aceitando esta aproximação, significa que por cada 100°C que se eleve a temperatura de cozedura, se tenha um acréscimo de resistência de 14% em relação à mistura *CNC*. Substituindo na equação o valor de σ_t correspondente a *MB100*, estima-se que se o calcário fosse elevado a 950°C se obteria uma variação nula da resistência.

Relativamente a σ_c , e para as mesmas misturas, obtiveram-se os valores médios que a Figura 4.8 apresenta.

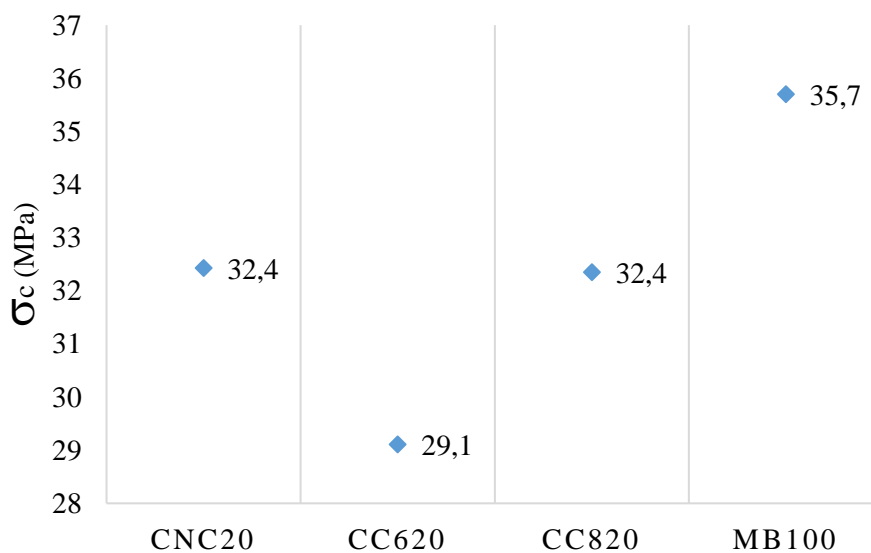


Figura 4.8 – Influência da substituição de 20% metacaulino por diferentes tipos de calcários na resistência à compressão.

Para este parâmetro, as misturas *CNC* e *CC820* apresentaram valores idênticos; a resistência reduziu cerca de 9% em relação a *MB100*. A mistura *CC620* apresentou o maior decréscimo,

cerca de 18%, quando comparada com a mistura base. Como se pode observar na Figura 4.8, não é possível visualizar uma tendência (pelo menos linear) em que se possa incluir a mistura *CNC*. Partindo de um pressuposto, segundo o qual, a partir de uma determinada temperatura de cozedura do calcário, pode aproximar-se uma tendência linear, indicada de seguida. Esta tendência baseou-se apenas nas misturas com calcário cozido; *CC620* e *CC820*.

$$\sigma_c = 19,4 + 16,2\theta \quad (4.8)$$

Importa referir que esta conclusão contém toda a incerteza relativa ao que se assumiu anteriormente. Contudo, pode concluir-se que, se o calcário fosse elevado a aproximadamente 1000°C, seria atingida a mesma resistência da mistura base.

4.2.2 Substituição de 33% de metacaulino por calcários

Pretende-se agora avaliar a influência da substituição de 33% de metacaulino nas misturas. Como no ponto anterior, confrontam-se os resultados obtidos para as misturas *CNC33*, *CC633* e *CC833*, relativamente à mistura de referência *MB100*. A Figura 4.9 e 4.10 apresentam os valores que se obtiveram relativamente a σ_t e a σ_c das misturas, respetivamente.

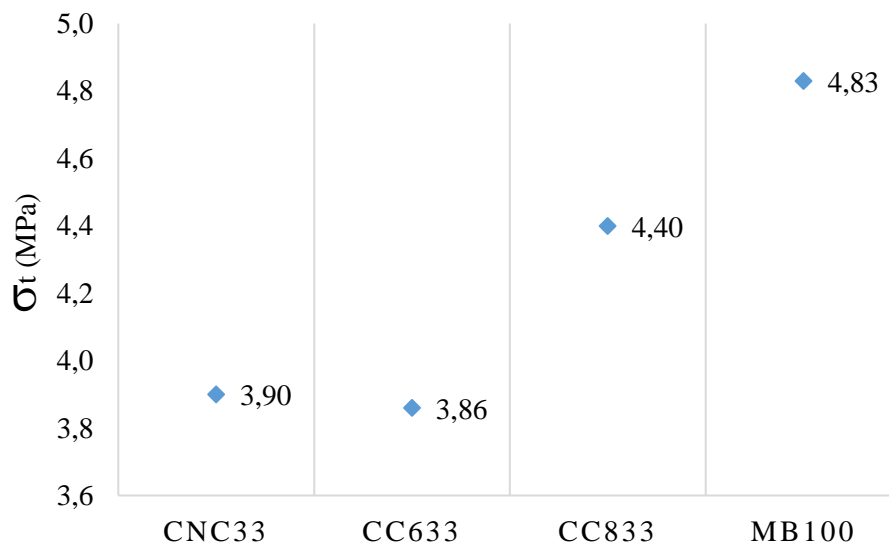


Figura 4.9 – Influência da substituição de 33% metacaulino por diferentes tipos de calcários na resistência à tração por flexão.

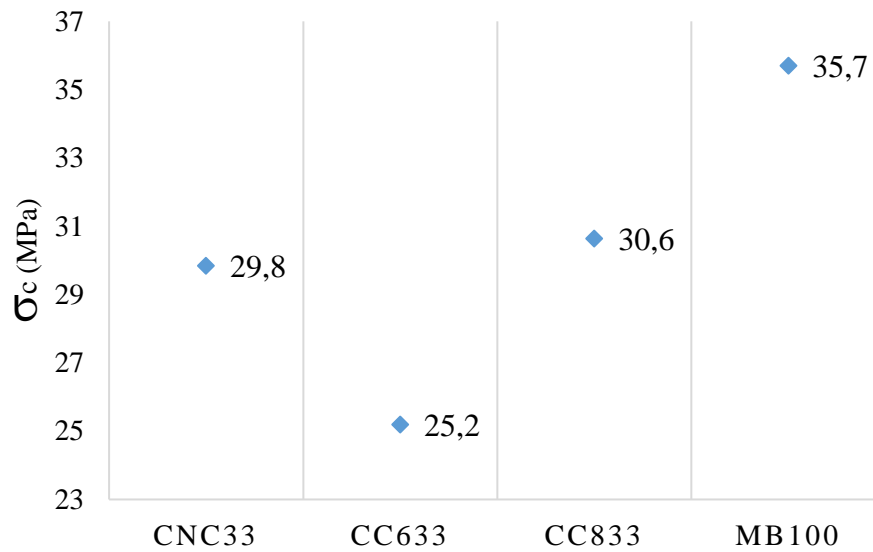


Figura 4.10 – Influência da substituição de 33% metacaulino por diferentes tipos de calcários na resistência à compressão.

Os valores de σ_t das misturas *CNC* e *CC633* apresentam valores idênticos; 19% e 20% inferiores a *MB100*. Como tem vindo a acontecer, em relação a estas misturas, relativamente a *CC833* a redução foi menor; 9% comparando com *MB100*. Quanto a σ_c , verifica-se uma situação semelhante ao do ponto anterior; o calcário não cozido *CNC33* e o calcário cozido a 800°C *CC833*, apresentaram reduções próximas de 17% e 14% respetivamente, quando comparados com *MB100*. A mistura *CC633* voltou a apresentar os piores resultados; o seu valor é cerca de 29% inferior em relação a *MB100*.

Perante estes resultados, e visto que se repetiu a situação do ponto anterior no caso dos valores de σ_c , só é possível imaginar uma tendência para as misturas que contêm calcário cozido; *CC633* e *CC833*. Mais uma vez, é importante referir que, se está a supor que existe uma tendência linear a partir de uma determinada temperatura de cozedura do calcário. Outra alternativa consiste em supor que o calcário não cozido corresponde a um material não relacionável com o calcário cozido. Então, com base nos valores das misturas *CC633* e *CC833*, obtiveram-se as seguintes linhas de tendência para σ_t e σ_c respetivamente.

$$\sigma_t = 2,24 + 2,7\theta \quad (4.9)$$

$$\sigma_c = 8,84 + 27,3\theta \quad (4.10)$$

Para esta percentagem de calcário na mistura, os respetivos valores da mistura *MB100* seriam atingidos para uma cozedura de 960°C do calcário, no caso do valor σ_t , e para 980°C, no caso de σ_c .

4.3 Influência da redução de metacaulino nas misturas

Neste ponto pretende-se avaliar a influência da simples redução da quantidade de ligante nas misturas. Importa recordar que a redução da quantidade de ligante foi acompanhada de uma redução “equivalente” da quantidade de ativador composto, tal como foi indicado no Capítulo 3. Neste caso, de 20% e de 33% de metacaulino nas misturas de metacaulino branco *MB* e nas de metacaulino castanho *MC*. Comparam-se as misturas *MB100*, *MB80* e *MB67* no caso do *MB*, e as misturas *MC100*, *MC80* e *MC67* do *MC*. A Figura 4.11 apresenta os valores médios obtidos de σ_t para as referidas misturas, bem como a linha de tendência para cada conjunto.

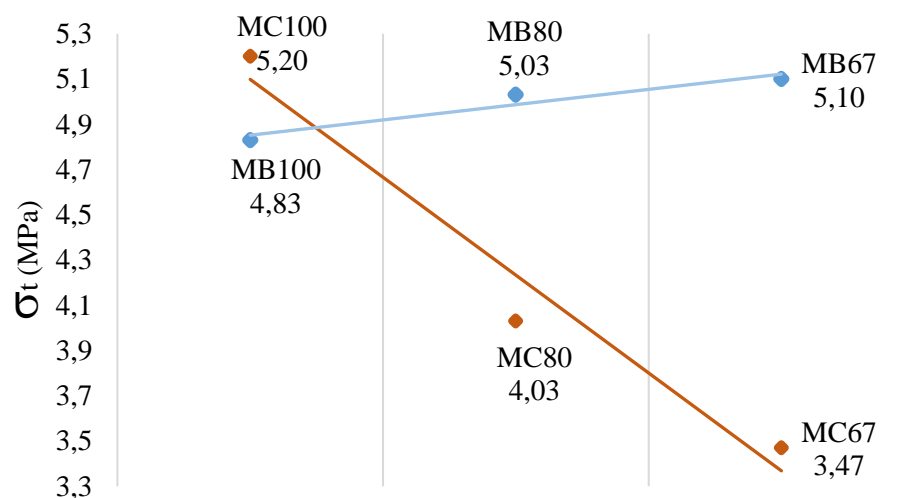


Figura 4.11 – Influência da redução da quantidade de ligante na resistência à tração.

Relativamente à mistura base do metacaulino branco *MB100*, os resultados obtidos para as misturas com redução de metacaulino, revelam um ligeiro aumento de σ_t ; 4% no caso *MB80*, e cerca de 6% no caso *MB67*. No entanto, para o metacaulino castanho, a redução da quantidade de ligante implicou numa acentuada descida do valor da resistência à tração; em relação à mistura base de metacaulino castanho *MC100*, o valor de σ_t da mistura *MC80* decresceu cerca de 23% e no caso da mistura *MC67* decresceu 33%. Confrontando as 2 misturas base, a mistura

MC100 determinou mais 8% de σ_t relativamente à mistura *MB100*. Para este intervalo de redução de metacaulino as linhas de tendência, regidas pela Equação 4.11 ($R^2=0,98$) no caso do uso de *MB* e Equação 4.12 ($R^2=0,99$) no caso de *MC*.

$$\sigma_{tB} = 5,67 - 0,83\xi \quad (4.11)$$

$$\sigma_{tC} = -0,13 + 5,29\xi \quad (4.12)$$

Onde ξ representa a percentagem de metacaulino não substituído. Aceitando estas equações, no caso de *MB* que em cada 10% de redução do metacaulino aumentou-se cerca de 2% a resistência σ_t . Enquanto que por cada redução de 10% em *MC* provoca uma diminuição de aproximadamente 10% de σ_t .

Considerando ainda as misturas indicadas anteriormente, a Figura 4.12 apresenta os valores médios de σ_c .

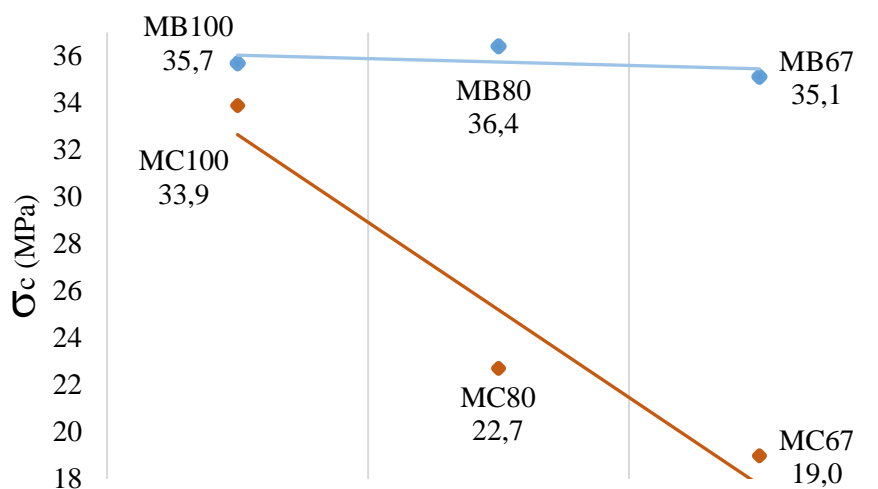


Figura 4.12 – Influência da redução da quantidade de ligante na resistência à compressão.

Quanto a *MB100* a resistência σ_c manteve-se aproximada. Aumentou 2% comparando com *MB80* e reduziu cerca de 2% com *MB67*. No caso de *MC*, *MC80* e *MC67* apresentaram uma redução de 33 e 44% respetivamente em comparação com *MC100*. No que respeita às 2 misturas base, *MC100* apresentou menos 5% de σ_c . Do mesmo que no parâmetro anterior, para o intervalo de redução estudado, as linhas de tendência lineares apresentam as seguintes equações para *MB* ($R^2=0,12$) e *MC* ($R^2=0,97$) respetivamente:

$$\sigma_{CB} = 34,6 + 1,4\xi \quad (4.13)$$

$$\sigma_{CC} = -12,7 + 46,1\xi \quad (4.14)$$

Como para *MB* o valor de R^2 é muito baixo significa que este ajuste não é adequado. Mas aceitando-o, de grosso modo significa que por cada 10% de redução de metacaulino há uma diminuição de 0,4% de σ_c , valor este residual pelo que mais propriamente quererá dizer que tende a ser constante. Já no caso de *MC* por cada 10% de redução apresenta cerca de 14% de σ_c .

4.4 Influência da substituição de metacaulino castanho por calcário

Por fim, neste ponto, pretende-se avaliar a influência da adição de calcário nas misturas de *MC*. Para tal, compara-se a mistura efetuada com metacaulino castanho, onde se substituiu 33% de *CC8*, designada de *CC833**, com a mistura base *MC100* e com a mistura *MC67*. Confronta-se também a referida mistura *CC833** com as correspondentes misturas de *MB*: Uma delas a *CC833* que tem a mesma dosagem de calcário; E para se tentar perceber, se com base nas *MB* se podem tirar as mesmas conclusões e tendências, confronta-se também com a *MB100*. A Figura 4.13 apresenta os valores médios de σ_t .

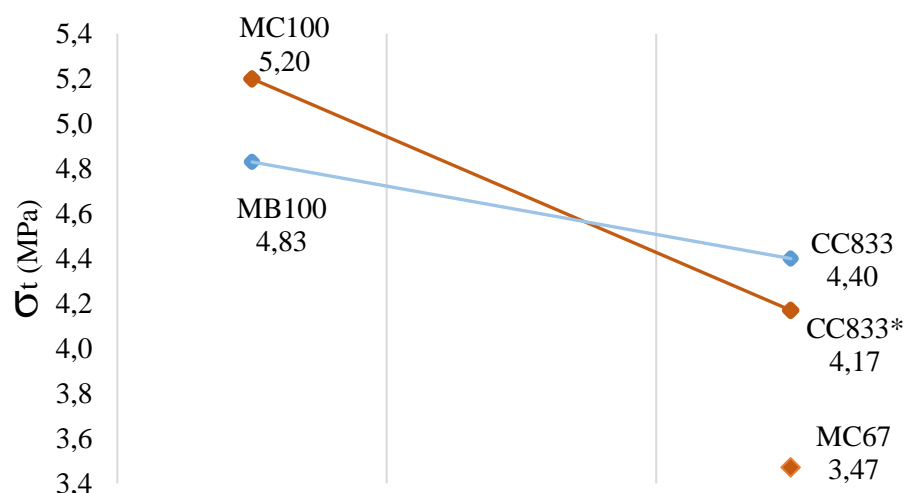


Figura 4.13 – Influência da substituição parcial de metacaulino castanho por calcário cozido a 800° na resistência à tração por flexão.

Comparando a mistura *CC833** com a *MC100* verificou-se uma redução de cerca de 20% do parâmetro σ_t enquanto que comparada com *MC67* revelou um ganho de 20% desse mesmo parâmetro. Considerando o intervalo definido pelas misturas *MC100* e *MC67* igual a 100%, a mistura *CC833** apresenta uma redução de σ_t cerca de 46% desse intervalo relativamente a *MC100*. Os restantes 54% refletem-se no ganho em relação a *MC67*. Ou seja, o calcário cozido a 800°C funciona como ligante, embora sugira que tem uma eficácia de cerca de 50% quando comparado com o metacaulino.

Em relação a σ_c , apresentam-se na Figura 4.14 os valores médios obtidos.

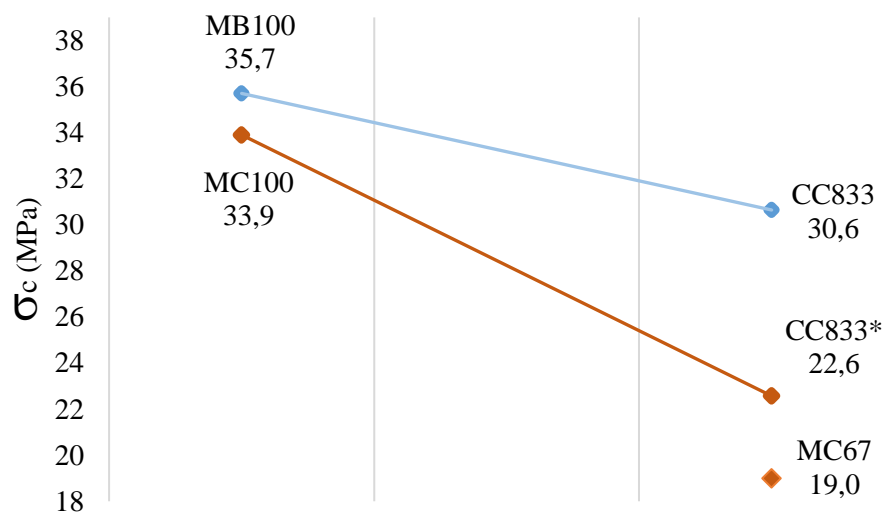


Figura 4.14 – Influência da substituição parcial de metacaulino castanho por calcário cozido a 800° na resistência à compressão.

De igual modo, *CC833** apresentou uma redução de 33% de σ_c em relação a *MC100* e um ganho de 19% comparando com *MC67*. Considerando de igual forma um intervalo de 100% entre a mistura *MC67* e *MB100*, a mistura *CC833** apresentou uma redução de σ_c de aproximadamente 76% relativamente a *MC100* e o restante traduziu-se num ganho de cerca de 24% em relação a *MC67*. Neste caso, pode concluir-se que o calcário cozido a 800°C só vale cerca de 25% do metacaulino no que à resistência à compressão diz respeito.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho experimental teve como objetivo principal avaliar a resistência à tração por flexão e a resistência à compressão de misturas onde se utilizou metacaulino como ligante. Mais concretamente, avaliou-se esses parâmetros quando nas misturas se fez variar a percentagem de substituição parcial do metacaulino por calcário, assim como a variação da temperatura de cozedura do calcário. O estudo foi essencialmente dedicado ao uso de *MB*; no entanto, realizaram-se misturas com *MC* que por comparação permitiram retirar algumas conclusões. Foram produzidas misturas com 20 e 33% de diferentes tipos de calcário substituído no ligante, calcário não cozido e calcário cozido a 600 e 800°C. Concluído o trabalho, é possível delinear um conjunto de conclusões gerais, apresentadas de seguida.

A incorporação, como ligante, dos vários tipos de calcário, em substituição parcial do metacaulino branco condicionou os resultados dos parâmetros resistentes em estudo; a resistência diminuía com o aumento da sua percentagem na mistura. No caso do aumento da percentagem de *CNC*, ocorreu uma perda de cerca de 6% da resistência σ_t e 5% de σ_c , ambas por cada 10% de metacaulino substituído. No caso da substituição parcial do metacaulino por *CC6*, registou-se uma igual perda de 6% na resistência σ_t enquanto que em σ_c a perda acentuou-se, aumentando para 9%, por cada 10% de metacaulino substituído. No que diz respeito à substituição parcial do metacaulino por *CC8*, os resultados revelaram perdas de resistência em ambos os parâmetros, no entanto inferiores, 2% e 4% de σ_t e σ_c , respetivamente.

Tanto na mistura em que substituiu 20% de metacaulino, como na mistura em se substituiu 33% de metacaulino, pelos diferentes tipos de calcário, *CNC*, *CC6* e *CC8*, os resultados revelaram que poderá haver uma certa temperatura mínima de cozedura do calcário, que poderá conduzir a uma não perda de resistência do geopolímero. Essa conclusão é ainda reforçada pelo facto da tendência para as misturas, com substituição parcial de metacaulino, apontarem para temperaturas equivalentes em termos de elevação da temperatura de cozedura do calcário de forma a igualar os parâmetros resistentes da mistura base. De facto, no caso em que se substituiu 20% de metacaulino, estimou-se que se o calcário fosse submetido a 950°C, nas mesmas condições e durante o mesmo tempo de cozedura, atingia-se a mesma resistência σ_t , e se fosse elevado a aproximadamente 1000°C conseguia-se a mesma resistência σ_c da mistura base *MB100*. Já no caso em que se substituiu 33% do metacaulino esses valores ainda se aproximaram mais, igualando as resistências σ_t e σ_c da mistura *MB100* aos 960 e 980°C, respetivamente.

O uso da mesma receita que se utilizou para o *MB100*, mas agora com o uso do metacaulino castanho, permitiu a comparação das misturas base *MB100* e *MC100*. Em termos de σ_t , o emprego do *MC* traduziu-se num aumento de 8% de resistência comparado com *MB100*. O mesmo não se concluiu para σ_c , pois houve um decréscimo 5% de resistência comparado com a referida mistura. Deste modo conclui-se que os metacaulinos têm propriedades resistentes diferentes podendo cada um deles ter tipos de utilizações distintas.

Seria de esperar uma redução dos valores dos parâmetros resistentes em estudo com a redução da quantidade de metacaulino *MB* utilizada na mistura. No entanto, em termos de σ_t , houve um aumento de cerca de aproximadamente 2% por cada 10% de redução do ligante. Quanto aos valores de σ_c , a redução de metacaulino revelou uma redução de 0,4% por cada 10% de redução, no mesmo intervalo já referido, podendo concluir-se que este parâmetro se manteve praticamente constante.

No caso da avaliação da redução do metacaulino castanho *MC* na mistura, houve uma redução da capacidade resistente σ_t de 10% por cada 10% de redução de metacaulino. De um modo mais acentuado, a redução de *MC* na mistura revelou uma perda de 14% de resistência σ_c por cada 10% de metacaulino reduzido.

Por fim a mistura *CC833** apresentou uma redução de 20% de σ_t em relação à mistura base *MC100*. Em relação à *MC67*, a mistura *CC833** obteve uma melhoria 20% de σ_t . Quanto ao parâmetro σ_c , a mistura *CC833** apresentou uma redução de 33% e um ganho de 19% em relação a *MC100* e *MC67*, respetivamente. Assim esta mistura demonstra que apesar de haver um decréscimo de resistência ao reduzir-se o ligante, o calcário *CC6* contribuiu de forma positiva, pois contribuiu para um ganho de resistência em relação a *MC67*.

Este estudo é um trabalho exploratório. Importa concretizar as conclusões referidas aumentando o número de itens de ensaio. Para além disso, interessa também abordar outros parâmetros, como por exemplo o módulo de elasticidade. Para além de se estudarem as possíveis alterações do geopolímero ao longo do tempo, principalmente quando incluem resíduos, é também importante estudar as propriedades químicas do calcário utilizado, principalmente a sua alteração ao longo do tempo. Durante a fase experimental foram surgindo questões relativas o uso dos materiais em estudo. Assim, apresentam-se de seguida sugestões para trabalhos futuros:

- A influência da incorporação do resíduo calcário mantendo a quantidade inicial de metacaulino.

- Aumento da temperatura de cozedura do resíduo calcário para os 1000°C ou mesmo até valores acima deste;
- Aumento do tempo de cozedura do resíduo calcário mantendo as temperaturas do presente estudo;
- Estudo de misturas apenas com incorporação do resíduo calcário, depois de este ter sido sujeito a temperaturas elevadas;
- Estudar a mistura utilizando outros ativadores, sejam eles compostos ou simples, como por exemplo o hidróxido de potássio;
- Estudo de outros parâmetros importantes para utilização destas misturas na prática, como a aderência ao aço, a durabilidade quanto à sua exposição;
- Estudo do impacto ambiental dos materiais utilizados neste estudo e a sua viabilidade em termos económicos, quando produzidos em grandes quantidades.
- Estudo de outros resíduos produzidos por indústrias análogas, como o resíduo da pedra granítica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borges, A. (2007). “Gestão de RCD”. Workshop “Gestão de resíduos: inovação tecnológica e novos negócios.” Observatório de Prospetiva de Engenharia e da Tecnologia, Taguspark. Oeiras: Portugal.

CIMPOR@ (2016). http://www.cimpor-portugal.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=1206&n_ame=Sustentabilidade. CIMPOR – Cimentos de Portugal, SGPS, S.A. (página internet oficial), Portugal.

Cordeiro, G. C.; Filho, R.; Fairbairn, E. (2009). “Influence of the partial replacement of cement by ultrafine rice husk ash whith high-carbon contente on the properties of concrete.” Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Ambiente Construído, Porto Alegre, vol. 9, n.º4, pp 99-107.

Costa, G.; Silva, A.; Marques, S. (2013). “Concreto especial produzido a partir da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de vidro.” IX Congresso de Iniciação Científica do IFRN. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Rio Grande do Norte: Brasil.

Cunha, A. (2013) “Estudo da possibilidade de utilização de resíduos em materiais cimentícios.” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Davidovits, J. (1988). “Geopolymer chemistry and properties.” Proceedings of the Geopolymer 1988, Vol. 1, pp. 25-48.

Davidovits, J. (1999). “Geopolymeric reactions in the economic future of cements and concretes: World-wide mitigation of carbon dioxide emission.” Proceedings of 1999 Geopolymer Conference 111-121.

DGEG (2011). Direção Geral de Energia e Geologia. Informação estatística da indústria extrativa, N.º 13, Dezembro 2011.

Duxon, P; Mallicoat, S.; Grant, L.; Kriven, W.; Deventer, J. (2007) “The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of the properties of metakaolin-based geopolymers.” Colloids and Surfaces 292, pp. 8-20.

-
- Erdem, E. (2014). “Cement chemistry, Portland Cement and types of cement.” Apresentado no Workshop de Palestras organizado pelo Departamento de Engenharia Química da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.
- Fernandes, D. (2011). “Influência de adições na mitigação da reacção álcalis-sílica (RAS) em betão com agregados reciclados.” Tese de Mestrado. Universidade da Beira Interior. Covilhã, Portugal.
- Fernández-Jiménez, A., Monzó, M., Vicent, M., Barba, A., e Palomo, A. (2008). “Alkaline activation of metakaolin-fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements. Microporous and Mesoporous Materials.” 108(1-3), pp. 41–49. doi:10.1016/j.micromeso.2007.03.024.
- Granizo, M. (1998). “Activación alcalina de Metacaolin: Desarrollo de nuevos materiales cementantes.” (Tese de Doutoramento). Universidade Autónoma de Madrid. Madrid: Espanha.
- Granizo, M. (1999). “Materiales obtenidos a partir de reacciones de activación alcalina. Morteros de piedra artificial obtenidos por reacción de activación de metacaolin.” Clar Rehabilitación, Madrid.
- Guerra, F. (2014). “Avaliação experimental do comportamento mecânico de materiais ativados alcalinamente”. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.
- Ho, D.; Sheinn, A.; NG, C.; Tam, C. “The Use of Quarry Dust for SCC Applications.” In *Cement and Concrete Research*, N.º 32, Elsevier Science Ltd, Pergamon, pp. 505-511.
- ISO 7500-1 (2004). *Verification of static uniaxial testing machines – Part 1: Tension/compression testing machines – Verification and calibration of the force-measuring system*. ISO (International Organization for Standardization).
- Kibert, C. (1994). “Establishing principles and model for sustainable construction.” In *Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16*, Tampa, EUA.
- Kibert, C. (2005). “Sustainable construction: green building design and delivery. John Wiley & Sons” Inc.: ISBN 0-471-66113-9, New Jersey, United States of America.
- Lopez R. (2009). “Calcined clayey soils as a potential replacement for cement in developing countries.” Dissertação de Doutoramento, Escola Politécnica de Lausanne.
-

Loureiro, P. (2013). “Otimização da quantidade de cinzas volantes em betões – benefício económico.” Tese de Mestrado, Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

Lucas, D., Benatti, C. (2008) “Utilização de resíduos industriais para a produção de artefactos cimentícios e argilosos empregados na construção civil.” Revista: Agronegócios e Meio Ambiente, Vol.1, N°3, pp. 405-418.

Machado, R. (2012). “Incorporação de Lamas de Pedreira em argamassas.” Tese de Mestrado, Universidade do Minho. Guimarães, Portugal.

Marques, L. (2014). “Avaliação do desempenho de argamassas com incorporação de resíduos.” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu. Viseu, Portugal

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

Matos, A. (2010). “Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos.” Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Metha, P. (2001). “Reducing the environmental impact of concrete.” Concrete Internacional; 61-66.

NP EN 196-1 (2006). “Métodos de ensaio de cimentos. Parte1: Determinação das resistências mecânicas”, IPQ.

NP EN 12390-3 (2011). “Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes”, IPQ.

NP EN 12390-5 (2009), “Ensaio do betão endurecido. Pare 1: Resistência à flexão de provetes”. IPQ

Nunes, S. (2001). “Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades.” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Oliveira, M. (2014). “Caracterização do comportamento mecânico de sistemas Ligantes obtidos por ativação alcalina; evolução temporal e composição de ativador.” Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Palomo, A.; Blanco-Varela, M.; Granizo, M.; Puertas, F.; Vasquez, T.; Grutzeck, M. (1999). "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin." *Cement and Concrete Research* 29, pp. 997-1004.

Palomo, A.; Krivenko, P.; Garcia-Lodeiro, I.; Kavalerova, E.; Maltseva, O.; Fernández-Jiménez, A. (2014). "A review on alkaline activation: new analytical perspectives". *Materiales de Construcción*. Vol. 64, Issue 315, p.6-x. DOI: 10.3989/mc.2014.00314.

Pereira, P. (2010). "Contribuição para o conhecimento das propriedades pozolânicas da fração fina resultante da produção de origem granítica." Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Geotécnica. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Portugal.

Pereira, J. (2013). "Estudo do solo enquanto material de construção sustentável." Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Pinto, A. (2004). "Sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino." Tese de Doutoramento, Universidade do Minho. Guimarães: Portugal.

Pinto, A. (2006). "Introdução ao estudo de geopolímeros." Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, Portugal.

Pinto, H. (2011). "Propriedades do betão auto-compactável com incorporação de agregados finos reciclados." Tese de Mestrado, Universidade da Beira Interior. Covilhã, Portugal.

Provis, J. (2013). "Geopolymers and other alkali activated materials: Why, How, and What?" *journal- Materials and Structures*, Vol.47, Nº1-2, pp. 11-25.

Puertas, F.; Martinez-Ramirez, S.; Alonso, S; Vasquez, T. (2000). "Alkali-activated fly ash/slag cement. Strength behaviour and hydration products." *Cement and Concrete Research* 30, pp. 1625-1632.

Resende, C. (2009). "Estudo da viabilidade de incorporação de escória de cobre como agregado fino em produtos de construção." Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Sardinha, M. (2014). "Desempenho em termos de durabilidade de betões com incorporação de agregados muito finos provenientes das lamas de corte da indústria do mármore." Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, Portugal.

Secil@ (2009). <http://www.secil.pt/pdf/Processo%20de%20Fabrico%20de%20Cimento.pdf>. Secil, Empresa produtora de cimento (página internet oficial), Portugal.

Silva, A. (2008a). “Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri cearense na formulação de argamassa.” Trabalho de pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Brasil.

Silva, M. (2008b). “Estudo da durabilidade de betão estrutural com resíduos agroindustriais.” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

Škvára, F. (2007). “Alkali Activated Materials or Geopolymers?.” Department of glass and ceramics, Faculty of Chemical Technology, ICT Prague 51(3); 173–177.

Soares, B. (2007). “Estudo da produção de óxido de calcário por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica.” Trabalho de pós-graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia- M.G., Brasil.

Torgal, F.; Gomes, J.; Jalali, S. (2005). “Tendências no desenvolvimento sustentável.” Investigação sobre o desenvolvimento de ligantes de baixas emissões a partir de resíduos de minas. Universidade da Beira Interior. Covilhã, Portugal.

Torgal, F.; Jalali, S. (2007). “Construção Sustentável. O caso dos materiais de construção.” 3º Congresso Nacional. Coimbra, Portugal.

Velosa, A.; Veiga, R. (2007). “Lime-metakaolin mortars - properties and applications.” In Portugal SB07: Sustainable Construction. Materials and Practices. Challenges of the Industry for the New Millennium. Instituto Superior Técnico de Lisboa. Lisboa, Portugal.

ANEXO A

Nas Tabelas A.1 a A.13 expõem-se os resultados individuais dos ensaios dos provetes de cada mistura. Para cada mistura realizaram-se 6 provetes os quais foram numerados de 1 a 6. São apresentadas as dimensões da secção transversal de cada provete, nomeadamente a largura b e a respetiva altura h ; a força máxima F_{\max} exercida pelo atuador ao longo do ensaio com controlo de deformação, tanto para o ensaio à tração por flexão como para o ensaio à compressão; os correspondentes valores das tensões resistentes σ_t e σ_c obtidos; e, por fim, para cada mistura, e para cada parâmetro, são ainda indicados os valores médios, os valores do desvio padrão e os valores do coeficiente de variação.

Durante o ensaio de tração por flexão do provete 3 da mistura MC100 ocorreu um erro na velocidade de aplicação da ação, pelo que o valor σ_t de 6,10MPa não foi considerado e não se encontra na respetiva tabela para não causar equívocos. Foram ainda detetados valores anormais de resistência em outros 2 provetes; um na mistura MB80 e outro na mistura MC67. Estes valores também foram rejeitados, e não estão tabelados. O do provete nº6 da mistura MB80, de dimensões inferiores ao pretendido, apresentou um valor de 5,98MPa para σ_t . Como este valor é muito superior à média, ou seja, é superior em mais do que duas vezes o desvio padrão, optou-se por não considerar os valores relativos a este provete. Relativamente a σ_c , foi de 37,5MPa a resistência deste provete. Também o provete nº4 da mistura MC67 não foi considerado, uma vez que nos dois ensaios realizados apresentou valores muito inferiores em relação ao valor médio dos restantes provetes da mistura. Obteve-se 3,13Mpa para σ_t e 21,4MPa para σ_c .

Como referido apresenta-se o valor do coeficiente de variação para cada mistura. Este coeficiente é usado para avaliar a fiabilidade dos resultados. A magnitude do seu valor depende do contexto e do objetivo da análise. No âmbito da engenharia civil, valores inferiores a 5% são em geral desprezáveis ou insignificantes; entre 5 e 10% são aceitáveis ou admissíveis. As misturas apresentaram coeficiente de variação médio de 5,7 e de 4,3% relativamente a σ_t e σ_c , respetivamente. Os valores extremos avaliados foram de 8,5 e 8,0%, respetivamente. Pode-se afirmar, com base nestes valores, que os resultados obtidos nos ensaios são, no mínimo, aceitáveis.

Tabela A.1 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura MB100.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,6	40,0	2,04	4,71	61,0	37,5
2	41,0	40,0	2,21	5,05	58,7	35,8
3	40,4	40,0	2,08	4,82	58,0	35,9
4	40,4	40,0	1,93	4,47	54,7	33,8
5	40,1	40,0	2,08	4,86	57,8	36,0
6	40,5	40,1	2,21	5,09	57,5	35,4
Média			2,09	4,83	58,0	35,7
Desvio padrão			0,11	0,23	2,03	1,19
Coefficiente de variação (%)			5,3	4,8	3,5	3,3

Tabela A.2 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura MB80.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	39,7	40,1	2,24	5,28	53,7	33,8
2	40,3	40,1	2,12	4,92	53,1	32,9
3	40,4	40,0	2,18	5,05	59,9	37,1
4	39,7	40,0	2,07	4,89	54,8	34,5
5	40,1	40,1	2,16	5,03	60,1	37,3
6	36	40,0	-	-	-	-
Média			2,15	5,03	56,3	35,1
Desvio padrão			0,06	0,41	3,43	2,00
Coefficiente de variação (%)			2,8	8,2	6,1	5,7

Tabela A.3 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura MB67.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,0	40,1	2,23	5,22	58,5	36,6
2	39,0	40,0	1,96	4,71	54,2	34,7
3	40,0	40,0	2,20	5,14	55,3	34,5
4	40,2	40,0	2,26	5,27	60,7	37,7
5	40,4	40,0	2,21	5,13	61,1	37,8
6	27,29	40,0	1,50	5,15	40,7	37,3
Média			2,06	5,10	55,1	36,4
Desvio padrão			0,29	0,20	7,6	1,49
Coeficiente de variação (%)			14,1	3,9	13,8	4,1

Tabela A.4 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura CNC20.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	41,0	40,0	1,71	3,91	56,5	34,5
2	41,0	40,1	2,02	4,60	54,8	33,4
3	41,1	40,1	1,94	4,42	53,6	32,6
4	41,1	40,1	1,80	4,09	51,2	31,0
5	40,6	40,1	1,93	4,44	51,9	31,9
6	40,7	40,1	1,82	4,18	50,8	31,2
Média			1,87	4,27	53,1	32,4
Desvio padrão			0,11	0,26	2,25	1,33
Coeficiente de variação (%)			5,9	6,1	4,2	4,1

Tabela A.5 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura CNC33.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,4	40,1	1,68	3,88	48,6	30,0
2	41,0	40,0	1,71	3,91	51,3	31,3
3	40,8	40,0	1,71	3,92	46,6	28,5
4	41,0	40,1	1,72	3,92	48,7	29,7
5	40,7	40,0	1,62	3,73	47,7	29,3
6	40,8	40,1	1,78	4,06	49,6	30,3
Média			1,70	3,90	48,8	29,8
Desvio padrão			0,05	0,11	1,61	0,93
Coeficiente de variação (%)			2,9	2,8	3,3	3,1

Tabela A.6 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura CC620.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,6	40,0	2,15	4,96	52,4	32,3
2	40,6	40,0	1,96	4,53	47,7	29,4
3	40,8	40,3	2,07	4,70	46,8	28,5
4	40,4	40,0	1,84	4,27	46,5	28,8
5	40,1	40,1	2,08	4,86	45,4	28,3
6	40,4	40,3	1,81	4,13	44,8	27,5
Média			1,99	4,57	47,3	29,1
Desvio padrão			0,14	0,33	2,72	1,67
Coeficiente de variação (%)			7,0	7,2	5,8	5,7

Tabela A.7 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura CC633.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,7	40,1	1,63	3,74	42,0	25,8
2	40,0	40,0	1,74	4,08	42,4	26,5
3	41,1	40,1	1,78	4,04	40,3	24,5
4	40,5	40,1	1,64	3,78	38,5	23,7
5	40,8	40,0	1,73	3,97	42,3	25,9
6	40,1	40,0	1,51	3,53	39,8	24,8
Média			1,67	3,86	40,9	25,2
Desvio padrão			0,10	0,21	1,60	1,04
Coeficiente de variação (%)			6,0	5,4	3,9	4,1

Tabela A.8 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura CC820.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,7	40,2	2,11	4,82	53,0	32,4
2	39,8	40,1	2,02	4,73	51,0	31,9
3	40,5	40,1	2,04	4,70	50,9	31,3
4	40,6	40,2	1,98	4,53	52,7	32,3
5	40,4	40,0	2,05	4,75	51,3	31,7
6	40,3	40,0	2,23	5,19	55,3	34,4
Média			2,07	4,79	52,4	32,3
Desvio padrão			0,09	0,22	1,70	1,06
Coeficiente de variação (%)			4,3	4,6	3,2	3,3

Tabela A.9 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura CC833.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,7	40,0	1,84	4,23	49,7	30,5
2	40,6	40,0	1,99	4,60	46,8	28,8
3	39,8	40,0	1,80	4,23	51,2	32,1
4	40,4	40,0	1,98	4,59	50,9	31,5
5	40,2	40,0	1,79	4,17	47,0	29,2
6	40,3	40,0	1,96	4,56	51,1	31,7
Média			1,89	4,40	49,4	30,6
Desvio padrão			0,09	0,20	2,06	1,37
Coeficiente de variação (%)			4,8	4,5	4,2	4,5

Tabela A.10 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura MC100.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,5	40,1	2,39	5,51	55,5	34,2
2	40,6	40,1	2,32	5,33	54,6	33,6
3	40,3	40,1	-	-	56,0	34,7
4	41,0	40,0	2,48	5,67	55,3	33,7
5	40,6	40,0	1,99	4,59	53,9	33,1
6	40,8	40,1	2,15	4,92	56,2	34,4
Média			2,27	5,20	55,2	33,9
Desvio padrão			0,20	0,44	0,88	0,57
Coeficiente de variação (%)			8,8	8,5	1,6	1,7

Tabela A.11 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura MC80.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,5	40,0	1,62	3,75	38,6	23,8
2	41,2	40,0	1,66	3,78	38,8	23,6
3	40,7	40,0	1,74	4,01	31,8	19,5
4	40,6	40,0	1,75	4,04	35,9	22,1
5	40,3	40,0	1,81	4,20	39,9	24,7
6	40,4	40,0	1,89	4,38	36,4	22,5
Média			1,75	4,03	36,9	22,7
Desvio padrão			0,10	0,24	2,92	1,81
Coeficiente de variação (%)			5,7	6,0	7,9	8,0

Tabela A.12 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura MC67.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	41,0	40,0	1,65	3,77	33,7	20,5
2	41,0	40,1	1,52	3,47	34,2	20,9
3	40,7	40,0	1,50	3,45	32,9	20,2
4	40,7	40,0	-	-	-	-
5	40,8	40,0	1,50	3,44	32,8	20,1
6	40,7	40,0	1,36	3,13	31,2	19,1
Média			1,51	3,45	33,0	20,2
Desvio padrão			0,09	0,21	1,16	0,65
Coeficiente de variação (%)			6,0	6,1	3,5	3,2

Tabela A.13 – Dimensões e resultados dos ensaios dos provetes da mistura CC833*.

Provete nº	b (mm)	h (mm)	Ensaio Tração		Ensaio Compressão	
			F _{max} (kN)	σ _t (MPa)	F _{max} (kN)	σ _c (MPa)
1	40,3	40,0	1,85	4,30	39,4	24,3
2	40,5	40,0	1,66	3,84	36,6	22,3
3	40,2	40,0	1,79	4,17	37,4	22,9
4	40,6	40,1	1,69	3,89	35,9	22,1
5	40,4	40,0	1,84	4,27	33,6	20,8
6	37,3	40,0	1,81	4,55	37,4	23,1
Média			1,77	4,17	36,7	22,6
Desvio padrão			0,08	0,27	1,90	1,16
Coefficiente de variação (%)			4,5	6,5	5,2	5,1

ANEXO B

Nas Tabelas B.1 a B.3 são apresentados os pesos e pesos específicos de cada provete de cada mistura bem como os correspondentes valores da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação.

Como foi feito no Anexo A, também se faz aqui uma avaliação da qualidade das misturas utilizando o coeficiente de variação. Este coeficiente, relativo ao peso específico das misturas, em média apresentou 0,9% sendo o seu valor mais elevado de 1,6%. Pelo que os resultados apresentam qualidade.

Tabela B.1 – Peso dos provetes das misturas.

Mistura	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
MB100	527g	528g	522g	522g	534g	544g
MB80	517g	524g	524g	520g	522g	471g
MB67	522g	514g	525g	527g	523g	359g
CNC20	529g	528g	529g	529g	526g	522g
CNC33	522g	533g	526g	524g	517g	523g
CC620	529g	522g	527g	513g	508g	509g
CC633	520g	515g	531g	517g	518g	508g
CC820	518g	513g	519g	523g	526g	531g
CC833	517g	519g	517g	530g	520g	527g
MC100	527g	528g	522g	522g	534g	544g
MC80	523g	530g	533g	526g	522g	529g
MC67	536g	540g	530g	527g	533g	524g
CC833*	534g	536g	534g	531g	536g	499g

Tabela B.2 – Peso específico dos provetes das misturas em kg/m³.

Mistura	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Provete 6
MB100	2028	2012	2019	2019	2081	2094
MB80	2030	2027	2027	2047	2029	2044
MB67	2034	2059	2051	2048	2023	2055
CNC20	2016	2007	2006	2006	2019	1999
CNC33	2014	2031	2014	1992	1985	1998
CC620	2036	2009	2003	1984	1974	1954
CC633	1991	2012	2014	1990	1984	1979
CC820	1979	2009	1997	2003	2034	2059
CC833	1985	1997	2030	2050	2021	2043
MC100	2028	2027	2019	1989	2055	2078
MC80	2018	2010	2046	2024	2024	2046
MC67	2043	2053	2035	2023	2041	2012
CC833*	2070	2068	2076	2038	2073	2090

Tabela B.3 – Valores médios do peso e peso específico das misturas.

Mistura	Peso			Peso específico		
	Valor médio	Desvio padrão	Coefficiente variação (%)	Valor médio (kg/m ³)	Desvio padrão (kg/m ³)	Coefficiente variação (%)
MB100	530g	8g	8	2042	32	1,6
MB80	513g	19g	19	2034	8	0,4
MB67	495g	61g	61	2043	13	0,6
CNC20	527g	3g	3	2009	7	0,3
CNC33	524g	5g	5	2006	16	0,8
CC620	518g	8g	8	1993	26	1,3
CC633	518g	7g	7	1995	13	0,7
CC820	522g	6g	6	2013	26	1,3
CC833	522g	5g	5	2021	23	1,2
MC100	530g	8g	8	2033	28	1,4
MC80	527g	4g	4	2028	14	0,7
MC67	532g	5g	5	2034	14	0,7
CC833*	528g	13g	13	2069	16	0,8