



**Bruno Correia de
Almeida Teixeira de
Sousa**

**Estudo do comportamento dos Betões
Autocompactáveis**



**Bruno Correia de
Almeida Teixeira de
Sousa**

**Estudo do comportamento dos Betões
Autocompactáveis**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Dr. Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação da Dra. Helena Maria da Costa Paiva, Investigadora da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho a minha Mãe, a minha Avó e a meu Avô por todo o amor e inspiração que sempre me deram.

o júri

Presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Maria Paula da Silva Seabra
Investigadora Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Doutor Victor Ferreira, orientador desta dissertação, o meu obrigado pela proposição do tema, constantes ensinamentos e bons conselhos ao longo do ano.

À Doutora Helena Paiva, co-orientadora desta dissertação, um agradecimento muito especial pela sua constante disponibilidade, ensinamentos e total acompanhamento do trabalho efectuado.

Ao Departamento de Engenharia Civil, à Engenheira Maria Carlos e ao Sr. Vítor Rodrigues por todo o apoio, conselhos e ensinamentos prestados no laboratório sempre com total entrega apesar de todo o trabalho à sua volta.

À Sika, em particular ao Engenheiro Pedro Sousa e à Engenheira Cláudia Gomes, bem como à Weber pelos conselhos e pelos materiais necessários para a realização do trabalho.

A minha Mãe, meu Avô, minha Avó e minhas Tias Né e Nininha, pelo apoio incondicional e por me permitirem chegar até aqui. Obrigado pela confiança, amor e carinho que sempre depositaram em mim. A toda à minha família que de uma maneira ou de outra esteve sempre presente.

Aos meus grandes amigos bracarenses e de faculdade por toda a companhia, força, troca de ideias e paciência que sempre tiveram para comigo.

À minha namorada, Ana Maria, por todo o alento, amor e coragem que sempre me transmitiu para continuar.

Obrigado a todos.

palavras-chave

Betão autocompactável, reologia, viscosidade, tensão de cedência, espalhamento, propriedades mecânicas, exsudação

resumo

O presente trabalho teve como objectivo estudar o papel dos diferentes constituintes no estado fresco e no estado endurecido em betões autocompactáveis. Avaliaram-se características como os parâmetros reológicos, a trabalhabilidade, a resistência à segregação, resistência mecânica e à penetração de cloretos. Para tal, foi feita uma pesquisa sobre os conceitos referentes ao betão autocompactável no estado fresco como a reologia e a importância dos constituintes na formulação das misturas que tiveram influência no estado endurecido.

Primeiramente, foi criada uma formulação padrão com a ajuda de um reómetro adequado para betões de forma a poder servir de comparação às formulações criadas posteriormente. Pretendeu-se que esta formulação tivesse uma tensão de cedência e viscosidades baixas e um diâmetro de espalhamento elevado quando comparados com os de um betão normal. Foi avaliado o efeito do superplastificante e verificou-se que este leva a pasta a entrar em exsudação a partir de um certo valor, fenómeno que provoca uma diminuição das propriedades mecânicas no estado endurecido.

Observou-se o efeito da razão água/cimento e verificou-se que há um limite inferior onde a formulação deixa de poder ser considerada betão autocompactável devido à baixa trabalhabilidade e espalhamento, apesar de valores superiores na resistência mecânica.

A introdução de um metacaulino como substituição parcial do cimento trouxe vantagens tanto nos parâmetros reológicos e espalhamento como nas propriedades no estado endurecido até uma determinada percentagem, que ao ser ultrapassada prejudicou qualquer uma das propriedades.

A adição de um filler calcário revelou-se pouco vantajosa quando comparada com a adição do metacaulino com o efeito de filler. Para os mesmos teores de adição, o metacaulino revelou menores valores de viscosidade que o filler para uma pequena perda de espalhamento. Ao mesmo tempo, para os mesmos teores de superplastificante a presença de exsudação nas formulações com filler é constante levando isto a uma diminuição das propriedades mecânicas quando comparadas com as do metacaulino.

keywords

Keywords: Self-compacting concrete, rheology, viscosity, yield stress, spreading, mechanical properties, bleeding

abstract

The present study had the goal of studying the role of the different constituents in the fresh and hardened state of self-compacting concretes. Some features as rheological parameters, workability, resistance to segregation, mechanical properties, and resistance to chloride penetration were evaluated. Thus, a research has been made to concepts related to self-consolidating concrete in fresh state as rheology and the importance of the paste constituents which had influence in the hardened state.

Firstly, a standard formulation was created supported by a concrete rheometer which was done in order to act as a basis for comparison for different formulations. It was intended that this formulation had a low viscosity and yield stress as well as a high spreading diameter when compared to a normal concrete. The superplastifier effect was evaluated and it was observed that bleeding occurs after a certain value, which brings a decrease to the mechanical properties in the hardened state.

Water/cement ratio was observed and it can be concluded that after an inferior limit the formulation can no longer be called a self-compacting concrete due to its low spreading value even though it has achieved bigger values of compressive strength and elastic modulus.

The addition of metakaolin as a partial substitution of binder has brought advantages both to fresh properties and hardened ones until a certain limit after which any of those suffers a decrease.

Limestone filler addition has revealed disadvantageous when compared to metakaolin addition with filler effect. For the same contents, metakaolin has revealed lower viscosity values even if it had a slight decrease in the spreading diameter. At the same time, for the same superplastifier contents bleeding occurs for the formulations with limestone filler for any content which leads to a decrease in the mechanical properties when compared to metakaolin formulations.

Índice

Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	vi
CAPÍTULO 1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	2
CAPÍTULO 2. Betão Autocompactável	3
2.1 Definição de Betão Autocompactável	3
2.2 Constituição	9
2.2.1 Ligantes	10
2.2.2 Agregados.....	11
2.2.3 Água de amassadura	11
2.2.4 Adições	12
2.2.5 Adjuvantes	15
2.3 Propriedades do Betão Autocompactável	16
2.3.1 Propriedades no estado fresco	16
2.3.2 Propriedades no estado endurecido	20
2.4 Vantagens do Betão Autocompactável	22
CAPÍTULO 3. Metodologia experimental.....	25
3.1 Introdução	25
3.2 Betão Autocompactável.....	25
3.2.1 Materiais utilizados	25
3.2.2 Formulações	31
3.3 Caracterização do comportamento do betão em fresco	33
3.3.1 Preparação do betão.....	33
3.3.2 Ensaio reológico	35
3.3.3 Ensaio de espalhamento.....	36

3.4	Caracterização do comportamento do betão no estado endurecido	37
3.4.1	Determinação do módulo de elasticidade dinâmico	37
3.4.2	Determinação da resistência mecânica à compressão	38
3.4.3	Ensaio de penetração de cloretos (Durabilidade)	39
CAPÍTULO 4. Apresentação e discussão de resultados		41
4.1	Comportamento no estado fresco.....	41
4.1.1	Efeito da introdução de superplastificante na composição base.....	41
4.1.2	Efeito do teor em água.....	42
4.1.3	Efeito do teor em cimento	45
4.1.4	Substituição parcial do cimento por metacaulino.....	47
4.1.5	Adição de filler calcário	50
4.1.6	Adição de metacaulino como filler.....	53
4.2	Comportamento no estado endurecido.....	55
4.2.1	Efeito da introdução de superplastificante na composição base.....	55
4.2.2	Efeito do teor em água.....	57
4.2.3	Efeito do teor em cimento	59
4.2.4	Substituição parcial do cimento por metacaulino.....	61
4.2.5	Adição de filler calcário	64
4.2.6	Adição de metacaulino como filler.....	66
4.2.7	Durabilidade	67
CAPÍTULO 5. Conclusões e desenvolvimentos futuros		79
5.1	Conclusões	79
Referências		83

Índice de Figuras

Figura 2.1- Local onde a utilização de betão autocompactável seria apropriada (retirado de www.engenhariacivil.com).....	4
Figura 2.2- Necessidade do betão autocompactável (Nunes, 2001).....	7
Figura 2.3- Ponte Akashi-Kaikyo.....	8
Figura 2.4- Fluido Newtoniano (Barrela, 2010, adaptado).....	17
Figura 2.5- Fluido Newtoniano e Fluido não-Newtoniano (Barrela, 2010).....	18
Figura 2.6- Domínio da reologia de um betão autocompactável (Barrela, 2010).....	18
Figura 2.7- Zona densamente armada (retirado de www.abesc.org.br).....	22
Figura 3.1- Curva de distribuição granulométrica dos agregados.....	26
Figura 3.2- Distribuição granulométrica do filler.....	28
Figura 3.3- Difrração de Raios-X do metacaulino.....	29
Figura 3.4- Distribuição granulométrica do metacaulino.....	30
Figura 3.5- Triângulo de Feret- Mistura mais compacta.....	31
Figura 3.6- Distribuição granulométrica da mistura mais compacta.....	32
Figura 3.7- Misturadora específica para betão.....	34
Figura 3.8- Fases do processo de mistura.....	35
Figura 3.9- Reómetro BT2 Schleibinger.....	36
Figura 3.10- Medição do espalhamento.....	37
Figura 3.11- Pundit utilizado.....	38
Figura 3.12- Exemplo de provetes com a rotura correcta.....	39
Figura 3.13- Exemplo de ensaio de penetração de cloretos.....	40
Figura 4.1- Efeito do superplastificante nas propriedades do estado fresco.....	42
Figura 4.2- Efeito da razão A/C nas propriedades do estado fresco (SP= 1,0%).....	43
Figura 4.3- Efeito da razão A/C e do teor em SP nas propriedades do estado fresco....	44
Figura 4.4- Espalhamento para A/C= 0.3.....	45
Figura 4.5- Efeito do teor em cimento nas propriedades do estado fresco.....	46
Figura 4.6- Efeito do teor em cimento e do teor em SP nas propriedades do estado fresco.....	47
Figura 4.7- Efeito do teor em MC nas propriedades do estado fresco.....	48
Figura 4.8- Efeito do teor em SP (MC= 10%).....	49
Figura 4.9- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (MC= 20%).....	50
Figura 4.10- Efeito do teor em filler nas propriedades do estado fresco (SP= 1,0%)....	51

Figura 4.11- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (F= 1,5%).....	52
Figura 4.12-Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (F= 2,0%).....	53
Figura 4.13- Efeito do metacaulino e do filler (SP= 1,2%) nas propriedades do estado fresco	54
Figura 4.14- Efeito do teor em superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (7 dias).....	56
Figura 4.15- Efeito do teor em superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias).....	57
Figura 4.16- Efeito da razão A/C nas propriedades mecânicas do betão (7 dias)	58
Figura 4.17- Efeito da razão A/C nas propriedades mecânicas do betão (28 dias).....	58
Figura 4.18- Efeito da razão A/C e do teor em SP nas propriedades mecânicas do betão	59
Figura 4.19- Efeito do teor em cimento nas propriedades mecânicas do betão (7 dias)	60
Figura 4.20- Efeito do teor em cimento nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)	60
Figura 4.21- Efeito do teor em cimento e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)	61
Figura 4.22- Efeito do teor em metacaulino nas propriedades mecânicas do betão (7 dias)	62
Figura 4.23- Efeito do teor em metacaulino nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)	62
Figura 4.24- Efeito do teor em metacaulino e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias).....	63
Figura 4.25- Efeito do filler nas propriedades mecânicas do betão (7 dias)	64
Figura 4.26- Efeito do filler (28 dias).....	65
Figura 4.27- Efeito do teor em filler e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)	66
Figura 4.28- Efeito do metacaulino e do filler nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)	67
Figura 4.29- Efeito do teor em SP	68
Figura 4.30- Efeito teor em superplastificante na durabilidade	69
Figura 4.31- Efeito da razão A/C na durabilidade.....	70
Figura 4.32- Efeito da razão A/C na durabilidade.....	70
Figura 4.33- Efeito do teor em cimento na durabilidade.....	71

Figura 4.34- Efeito do teor em cimento na durabilidade.....	71
Figura 4.35- Efeito do MC na durabilidade.....	72
Figura 4.36- Efeito do MC na durabilidade.....	73
Figura 4.37- Efeito do filler na durabilidade.....	74
Figura 4.38- Efeito do filler na durabilidade.....	74
Figura 4.39- Efeito do metacaulino e do filler na durabilidade.....	75
Figura 4.40- Efeito do metacaulino na durabilidade.....	76
Figura 4.41- Efeito do filler na durabilidade.....	76

Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Escala para o betão autocompactável	20
Tabela 2.2- Classificações propostas por Daczko	20
Tabela 3.1- Densidades dos agregados	26
Tabela 3.2- Variação da densidade aparente conforme a percentagem de filler	27
Tabela 3.3- Área superficial do filler.....	28
Tabela 3.4- Análise por fluorescência de Raios-X ao metacaulino.....	29
Tabela 3.5- Propriedades do metacaulino.....	30
Tabela 3.6- Percentagem mássica dos constituintes	32
Tabela 3.7- Formulações testadas.....	33
Tabela 3.8- Composição da solução salina.....	40
Tabela 4.1- Efeito do superplastificante nas propriedades do estado fresco	41
Tabela 4.2- Efeito da razão A/C nas propriedades do estado fresco (SP= 1,0%)	43
Tabela 4.3- Efeito da razão A/C e do teor em SP nas propriedades do estado fresco....	44
Tabela 4.4- Efeito do teor em cimento nas propriedades do estado fresco	45
Tabela 4.5- Efeito do teor em cimento e do teor em SP nas propriedades do estado fresco	46
Tabela 4.6- Efeito do teor em MC nas propriedades do estado fresco.....	48
Tabela 4.7- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (MC= 10%)	49
Tabela 4.8- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (MC= 20%)	49
Tabela 4.9- Efeito do teor em filler nas propriedades do estado fresco (SP= 1,0%).....	51
Tabela 4.10- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (F= 1,5 %)	52
Tabela 4.11- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (F= 2,0 %)	53
Tabela 4.12- Efeito do metacaulino e do filler nas propriedades do estado fresco (SP= 1,2 %)	54
Tabela 4.13- Efeito do teor em superplastificante nas propriedades mecânicas do betão	56
Tabela 4.14- Efeito da razão A/C nas propriedades mecânicas do betão (SP=1,0%)	58
Tabela 4.15- Efeito da razão A/C e do teor em SP nas propriedades mecânicas do betão	59
Tabela 4.16- Efeito do teor em cimento nas propriedades mecânicas do betão(SP= 1,0%)	60

Tabela 4.17-Efeito do teor em cimento e em superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias).....	61
Tabela 4.18- Efeito do teor em metacaulino nas propriedades mecânicas do betão	62
Tabela 4.19-Efeito do teor em metacaulino e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias).....	63
Tabela 4.20- Efeito do filler nas propriedades mecânicas do betão (SP= 1,0%)	64
Tabela 4.21- Efeito do teor em filler e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)	65
Tabela 4.22- Efeito do metacaulino e do filler nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)	66
Tabela 4.23- Efeito do teor em superplastificante	68
Tabela 4.24- Efeito da razão A/C na durabilidade	69
Tabela 4.25- Efeito do teor em cimento na durabilidade	71
Tabela 4.26- Efeito do MC na durabilidade	72
Tabela 4.27- Efeito do filler na durabilidade.....	73
Tabela 4.28- Efeito do metacaulino e do filler na durabilidade	75

CAPÍTULO 1. Introdução

1.1 Enquadramento

Desde o aparecimento das estruturas de betão armado por volta dos anos 40, tem sido uma preocupação constante, a melhoria das suas propriedades. Como qualquer produto, a evolução é uma constante e no caso do betão surgiram imensas variedades que vão ao encontro de diferentes propósitos. Desde classes de resistência, questões de durabilidade, preocupações com os locais onde as estruturas são executadas, preocupações sísmicas, entre outros, são alguns dos fatores que levam a que haja uma pesquisa constante. Mais propriamente, surge há cerca de trinta anos, no Japão, o conceito de betão autocompactável, desenvolvido pelo Professor Hajime Okamura, da Universidade de Tóquio, onde a falta de mão-de-obra qualificada para a vibração do betão era um facto.

O betão autocompactável foi evoluindo tendo vindo a ser também estudado na Europa, já longe do seu propósito inicial, a falta de trabalhadores qualificados para a vibração do betão. A possibilidade da não vibração torna-se uma grande vantagem, pois permite a boa compactação da mistura em locais de difícil acesso, como zonas densamente armadas e envolvidas por cofragens de geometria pouco comuns, além de vantagens económicas.

Para que este material possa vir a ser mais utilizado é de extrema importância, um conhecimento profundo do seu comportamento, da clara perceção das suas propriedades mecânicas e do seu comportamento em estado fresco e endurecido. Estes fatores em Portugal e no resto do mundo são ainda pouco claros.

Cada vez mais a inovação é necessária. É necessário tirar rentabilidade do trabalho através de uma boa relação entre poupança de tempo/económica e alcançar bons resultados. A nível da construção, mais particularmente falando de betões é, neste contexto, que surge o betão autocompactável. Foi no final dos anos oitenta que este material foi pensado, no entanto, face à globalidade das construções, é muito pouca a percentagem onde o mesmo é utilizado.

As vantagens na utilização do betão autocompactável são várias. A ausência da necessidade de vibração do betão traz ganhos a nível monetário através de um ganho de tempo, mas também por ser excluída a necessidade de mão-de-obra. A nível mais

específico, é em zonas densamente armadas e de cofragens com formas pouco convencionais em que o betão autocompactável se torna vantajoso. A ausência de ruído é também uma mais-valia pois torna o ambiente envolvente da obra mais silencioso, o que também contribui para a saúde e bem-estar dos trabalhadores.

A sua composição é o fator mais importante para a obtenção das propriedades desejadas, como são exemplo uma baixa viscosidade e uma boa resistência à segregação, aquando no estado fresco. No estado endurecido, a maior preocupação reside na sua durabilidade, característica esta que não é tão dominada como é nos betões convencionais.

1.2 Objetivos

O comportamento do betão autocompactável varia conforme o tipo de composição adotado, assim como com a composição dos próprios materiais constituintes. Sendo um betão fluido e possuindo uma elevada deformabilidade de forma a não necessitar de vibração, as suas propriedades a fresco e por conseguinte as do estado endurecido são diferentes das de um betão convencional.

Pretende-se assim estudar o papel dos diferentes constituintes em termos do seu efeito no estado fresco, onde se pretende avaliar características como a fluidez, a trabalhabilidade, a deformabilidade e a resistência à segregação. Já no estado endurecido, espera-se avaliar o efeito em propriedades como a resistência mecânica, o módulo de elasticidade e a durabilidade. Procura-se o desenvolvimento de conhecimento sobre o comportamento de betões autocompactáveis, o estudo dos constituintes e do seu papel na formulação e ao mesmo tempo a otimização das propriedades finais de modo comparativo com os betões convencionais.

CAPÍTULO 2. Betão Autocompactável

2.1 Definição de Betão Autocompactável

O betão autocompactável é um material relativamente recente. Surgiu no Japão por Hajime Okamura, professor da Universidade de Tóquio, por volta da década de oitenta [Okamura e Ouchi, 2003], devido à falta de trabalhadores qualificados necessários à correta compactação do betão em obra no Japão, mas também para aplicações onde o betão convencional não tinha as propriedades desejadas como por exemplo a fluidez. Tanto esta propriedade como a estabilidade são propriedades fundamentais para que um betão seja autocompactável, que são respetivamente a capacidade de o material escoar facilmente, preenchendo todos os espaços vazios e a capacidade de se manter coeso e homogéneo após ter preenchido as cofragens e as armaduras.

Este betão distingue-se do betão convencional por ser capaz de se mover sob a ação do seu peso próprio e de se espalhar por toda a cofragem, penetrar em locais de difícil acesso, devido a formas de cofragem pouco convencionais ou a locais muito preenchidos por armadura, portanto, locais onde não é possível a vibração. É por esta razão que este betão também é apelidado de “betão silencioso” ou “revolução silenciosa”, já que em certas áreas urbanas é proibido realizar betonagens a partir de uma certa hora devido ao ruído provocado pela vibração. Em França, é exigido que a montagem da cofragem seja terminada até às 16h30min, para que haja tempo para a colocação e vibração do betão até às 18h00min [Nunes, 2001]. Assim, é possível garantir a durabilidade das estruturas, independentemente da mão-de-obra, já que exclui a necessidade de pessoal especializado para o efeito. Além do problema das zonas densamente armadas, há ainda a questão das cofragens com geometria complexa devido a razões arquitetónicas. O betão autocompactável, além de permitir a utilização destas cofragens, garante, também, a qualidade do acabamento. Veja-se a Figura 2.1 onde o betão autocompactável seria uma boa alternativa.



Figura 2.1- Local onde a utilização de betão autocompactável seria apropriada (retirado de www.engenhariacivil.com)

É um tipo de betão que conforme a necessidade pode ser mais ou menos fluido, sendo necessário que seja muito fluido quando o interesse é espalhá-lo numa zona plana de grande área, ou numa zona fortemente armada. Estas propriedades são conseguidas devido à sua baixa tensão de cedência, deformabilidade e viscosidade moderada de forma a que a pasta não segregue, ou seja, que os agregados se mantenham em suspensão em vez de se depositarem no fundo. Assim, é garantido um bom comportamento quando a pasta atinge a presa.

No entanto, apesar de ser um material que vem a ser estudado há cerca de trinta anos, continua a ser relativamente pouco utilizado para as vantagens que oferece, pois há a ideia de que é um material mais caro do que o betão convencional devido à presença de alguns constituintes (finos). O que não é tido em conta nesta equação é que esse acréscimo poderá anulado pelo facto de não ser preciso ser vibrado, se poupa tempo em mão-de-obra, assim como a contratação de pessoal qualificado para o efeito, energia elétrica e equipamentos.

São várias as vantagens de um betão autocompactável no estado fresco, comparativamente a um betão convencional. Já no estado endurecido, as suas propriedades não se podem afirmar tão bem estudadas, excluindo as propriedades mecânicas, como é o caso da resistência. Quando comparado com um betão convencional, um betão autocompactável poderá ter maior resistência à compressão, quando utilizado o mesmo cimento.

Relativamente à durabilidade, o seu comportamento não é tão conhecido. A proporção e a forma como os diversos constituintes desta mistura se combinam são diferentes, resultando em diferentes permeabilidades, porosidades e resistência ao ataque de cloretos e de sais.

Ainda assim, há pesquisas levadas a cabo onde se verifica uma maior durabilidade de um betão autocompactável face a um betão convencional, o que foi atribuído a uma microestrutura diferente e uma menor porosidade [Anagnostopoulos e Sideris, 2012]. Um betão autocompactável utiliza na sua constituição um maior volume de material fino: cimento e adições. São estes que tornam a mistura mais cara de produzir face a um betão convencional.

De acordo com [Martin, 2002] e [Ambrose e Pera, 2002], esta diferença de preços situa-se na ordem dos 10 a 17% e 15%, respetivamente. Sendo que nos primórdios da aplicação do betão autocompactável esta diferença atingia os 50%. Esta desvantagem, é desvanecida quando em obra, o material não necessita de ser vibrado, traduzindo-se assim numa redução de tempo de execução e de mão-de-obra. No entanto, para ser totalmente aceite, os custos com as matérias-primas têm de ser diminuídos, até para tornar ainda mais evidente a diferença. Para isso, a quantidade de cimento terá de ser reduzida (sendo este o elemento mais caro na formulação da mistura), aumentando a percentagem de adições, sendo esta a única maneira de manter as propriedades mecânicas da mistura. De acordo com [Bouzoubaâ e Lachemi, 2001], é possível alcançar uma resistência mecânica de 35 a 40 MPa aos 28 dias, quando utilizada uma percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes na ordem dos 60%, o que diminuiria bastante o preço final.

Quando se aumentam as percentagens de material fino, cimento e adições, o seu efeito reflete-se na durabilidade. A absorção de água, a resistência à carbonatação, a resistência à corrosão induzida pelos cloretos e a capilaridade são alguns dos fatores que afetam a durabilidade. A permeabilidade em meios onde a agressividade dos elementos é elevada, é fortemente influenciada pela estrutura porosa do material. Há também o risco de reações químicas entre os elementos do meio, como a água, o oxigénio e o dióxido de carbono com os aditivos do material. O aumento de adições e as menores relações água/cimento, aumentam o risco de o betão lascar (*spalling*) [Person, 2003].

A nível de problemas de carbonatação, acontece que quanto maior a quantidade de adições, maior será a carbonatação, já que as adições têm um pH mais baixo que o cimento, tornando assim a mistura menos alcalina. Por outro lado, o aumento das adições provoca uma diminuição da porosidade da mistura, o que dificulta a penetração do CO₂ [Barros, 2008].

Esta porosidade, é importante pois permite uma menor dificuldade de ataques ao betão por substâncias químicas (sulfatos), através da água de constituição (água de amassadura) ou água da chuva, água subterrânea, águas negras, etc. A partir do momento em que estas águas penetram no betão, podem gerar reações químicas expansivas, provocando um aumento de tensões interiores que por sua vez originam a fissuração do betão. Importa referir que estes sulfatos apenas são prejudiciais ao betão quando dissolvidos em água. Para a diminuição deste problema, além da redução da porosidade, uma outra solução passa pela redução do aluminato tricálcico presente no cimento (C_3A), através da substituição por um cimento especial com escórias de alto-forno ou clínquer isento ou pobre nesse constituinte [Brito e Silva, 2009]. Por outro lado, a permeabilidade é também importante pois no interior do betão, para além do próprio betão, existe também o aço que é afetado pela presença de cloretos, podendo vir a ficar corroído.

Todos estes problemas também afetam o betão convencional, mas num betão autocompactável a sua influência não é tão conhecida pelo que o estudo das proporções de adições colocadas na mistura é importante, de forma a beneficiar a mistura através da ausência de um problema, mas por outro lado com o cuidado de não provocar o aparecimento de outro.

Resumidamente, a permeabilidade de um betão autocompactável dita a sua maior ou menor propensão ao aparecimento de patologias e, por conseguinte, a sua durabilidade. Com recurso à análise da estrutura dos poros de um betão, através da avaliação da sua absorção capilar, é possível prever a sua durabilidade.

O betão autocompactável surgiu primeiramente no Japão no final da década de oitenta e mais tarde na Europa pela sua introdução na Suécia por volta do início da segunda metade da década de noventa.

Durante a década de oitenta, o Japão atravessava uma crise de falta de mão-de-obra especializada, onde não havia pessoal capaz de, no caso em concreto, vibrar o betão corretamente. Aliado a este facto, esperava-se que este material trouxesse vantagens económicas, sociais e ambientais quando comparado com o betão tradicional. Na Figura 2.2, a necessidade do uso deste material.

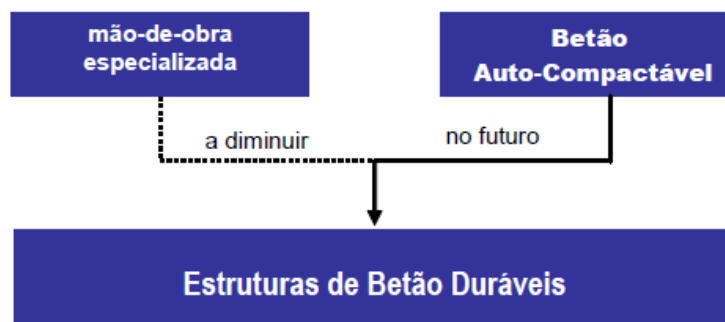


Figura 2.2- Necessidade do betão autocompactável (Nunes, 2001)

Mais concretamente, a sua origem advém da tecnologia já utilizada para obter betões de elevada trabalhabilidade e para estruturas submersas, onde era necessária uma elevada coesão, já que a dificuldade de vibração nestes casos era acrescida. Antes do surgimento deste tipo de betões, foram executadas estruturas deste tipo, mas sem a presença de armaduras e recorrendo a procedimentos de colocação muito exigentes e por isso onerosos. O aparecimento dos superplastificantes veio trazer trabalhabilidade e fluidez ao que viriam a ser os betões autocompactáveis, mas à custa de uma diminuição da resistência à segregação e à exsudação [Nunes, 2001].

Originalmente, no Japão, no fim da década de oitenta, surgiram pesquisas levadas a cabo por Okamura [Barrela, 2010] que se baseavam na formulação de betões de elevado desempenho e trabalhabilidade, no seu estado fresco tendo em conta a sua capacidade de se dispersar, fluidez e resistência à segregação. Mais tarde, outros investigadores levaram a cabo novas pesquisas e formularam misturas nas quais, ainda não era utilizado o termo “betão autocompactável”, mas sim “super trabalháveis”, “altamente trabalháveis”, “altamente fluidos”, entre outros [Brito e Silva, 2009]. Todos estes tinham propriedades semelhantes com o que é hoje o betão autocompactável. Só em 1995 surge o termo “Betão autocompactável”. Em 1998 surge um workshop na Universidade de Tecnologia de Kochi, dedicado ao material e ao longo dos anos seguintes foram realizados simpósios e

conferências a respeito da durabilidade, custos ao longo da sua vida útil, novas aplicações, entre outros. A primeira estrutura realizada totalmente em betão autocompactável foi a ponte “Akashi-Kaikyo”, aberta ao público em Abril de 1998, com um vão central de 1991m (Figura 2.3). Na análise final, o uso deste material traduziu-se numa redução no tempo de execução em cerca de 20%, passando dos 2,5 anos para os 2 anos [Ouchi, 2000].



Figura 2.3- Ponte Akashi-Kaikyo

Por influência do trabalho já feito no Japão, surge na Europa o interesse no betão autocompactável por volta de 1995. O primeiro trabalho a ser publicado surge no “International Rilem” (International Union of Testing and Research Laboratories of Materials and Structures) em Londres em 1996. Foram apresentados artigos relacionados com o cálculo de betão autocompactável pela University College London.

O CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute) organizou um seminário na Suécia para empreiteiros e produtores com a finalidade de produzirem casas à escala em betão autocompactável. Foram betonadas in-situ diversas casas à escala $\frac{1}{2}$ com diferentes fillers. A primeira parte deste projeto consistiu na execução das mesmas com ou sem o recurso a fibras de aço e a segunda parte à execução das mesmas mas à escala real. A par, o CBI continuou a trabalhar com o SNRA (Swedish National Roads Authority), mas na vertente da betonagem em pontes, realizando para isso ensaios à escala. A primeira ponte betonada totalmente em betão autocompactável fora do Japão foi terminada em 1998. Foi verificado nesta estrutura que as propriedades mecânicas do betão endurecido eram superiores às atingidas num betão convencional, incluindo a resistência à compressão, resistência ao gelo-degelo e permeabilidade, devido à maior quantidade de cimento utilizado [Nunes, 2001].

Outros estudos realizados, revelaram que os custos de uma construção neste material podem ser reduzidos de 5 a 15%, assim como reduções de 20 a 30% no que toca à energia gasta e a efeitos de estufa face a um betão convencional. No entanto, estes estudos não têm em conta os gastos a mais em cimento pelo que a poupança não será tão significativa, pois a maior utilização de material fino no betão autocompactável eleva o seu valor quando comparado com o betão comum.

O primeiro grande evento realizado na Europa acerca do betão autocompactável, “First International Rilem Symposium on SCC” teve lugar em Estocolmo em 1999 com cerca de 340 participantes de 35 países.

[Domone, 2005] realizou um estudo acerca das construções realizadas em betão autocompactável, ao longo de 11 anos onde apenas foram consideradas casos em que a escala de produção era no mínimo de alguns metros cúbicos e não abrangendo as misturas produzidas em laboratório. Desta pesquisa realizada com cerca de 50 casos, verificou-se que a maior parte deles foi produzida no Japão nos primeiros anos, com um subsequente aumento na Europa e mais recentemente na América. As razões apontadas para o seu uso foram: as vantagens técnicas quando comparadas com o betão convencional (a vibração era difícil ou impossível devido à densa armadura ou difícil acesso); razões económicas devido a uma redução no tempo de construção e mão-de-obra; novas formas de construção, como por exemplo secções estreitas pré-fabricadas e compósitos em aço e betão.

2.2 Constituição

Os constituintes deste tipo de betão são, à partida, os mesmos de um betão corrente: ligante, água, agregados e adições e adjuvantes. No entanto, como não há betões iguais, a quantidade de cada um destes constituintes, a classe de exposição (classificação das acções ambientais sobre o betão armado ou pré esforçado na forma de ataque ao betão ou às armaduras, dependendo se são estruturas sujeitas à acção gelo-degelo, à acção da água do mar, se estão ou não enterradas, entre outras), a envergadura da obra, o local onde é executada, a execução do próprio betão, a geometria das cofragens, entre outros, são todos fatores que influenciam o produto final. Quanto à qualidade dos constituintes, para um betão autocompactável, também estes podem ser da mesma qualidade da utilizada para um betão convencional.

O betão autocompactável, além de poder variar de propriedades como um betão corrente, distingue-se deste devido ao complemento na sua formulação de adições em diferentes percentagens e da utilização de uma maior quantidade de finos.

2.2.1 Ligantes

O ligante é o material com propriedades hidráulicas que permite a aglomeração de todos os constituintes inertes de uma pasta de betão, conferindo à mesma uma grande homogeneidade e coesão. Existem vários, desde o cimento, cal aérea, cal hidráulica, gesso e resinas orgânicas para algumas aplicações específicas [Paiva, 2005]. Para o estudo em causa, apenas se dará atenção ao cimento. Este é o ligante mais utilizado na formulação de betões, designado de cimento Portland. Os ligantes hidráulicos são constituídos por pós muito finos que amassados com água formam uma pasta cujo endurecimento se dá apenas pela reação química entre o pó e a água [Varela e Vieira, 2005]. É um material de origem cerâmica que em contacto com a água produz uma reação exotérmica (reação química que liberta calor, onde a energia é transferida do meio interior para o meio exterior, aquecendo assim o ambiente envolvente) devido à cristalização de produtos hidratados, ganhando assim resistência mecânica.

O cimento de Portland é constituído por quatro componentes: Silicato tricálcico (C_3S), entre 20% a 80% da massa do cimento, silicato bicálcico (C_2S), entre 10% a 55%, aluminato tricálcico (C_3A), entre 0 a 15%, aluminoferrato tetracálcico (C_4AF), entre 5% a 15%, que após moagem resultam no produto final. São as propriedades químicas que ditam a forma como o adjuvante é absorvido pelas partículas de cimento. Inicialmente, é pelo aluminato tricálcico (C_3A) e pelo aluminoferrato tetracálcico (C_4AF) que o adjuvante é adsorvido, já que são estes os componentes que hidratam mais rapidamente. O restante adjuvante é absorvido nos principais componentes, que são o silicato tricálcico (C_3S) e o silicato bicálcico (C_2S). A quantidade de adjuvante adsorvida pelos silicatos depende da quantidade do mesmo adsorvido pelos aluminatos. Ou seja, o ideal é recorrer a um cimento com uma percentagem de aluminatos moderada, para que a adsorção seja mais eficaz e haja uma correta dispersão de adjuvante por todo o ligante. Além do mais, os sulfatos existentes no ligante colocados sob a forma de gesso para retardar a presa, formam a etringite que se combina com as partículas de cimento, cobrindo-as, o que se traduz numa redução da deformabilidade, dificultando assim a acção do superplastificante (adjuvante). Interessa também que o calor de hidratação não seja elevado, o que se consegue através da

utilização de um cimento com menor quantidade de C_3A e de C_4AF ou com maior quantidade de C_2S . Assim, a acção de dispersão do adjuvante é mais eficaz [Nawa *et al*, 1998].

A nível físico, a granulometria e a superfície específica das partículas são factores importantes na velocidade de hidratação já que esta ocorre na interface entre a partícula e a água. Quanto maior a compacidade ou empacotamento das partículas, maior a fluidez da pasta, já que há uma diminuição do atrito entre as partículas e portanto menor será o valor da tensão de cedência, que é o pretendido para um betão autocompactável. Por outro lado, quanto maior a superfície específica do cimento, maior será a viscosidade plástica. Num cimento com maior superfície específica, ou seja, com um maior número de finos, aumenta a área em contacto com a água, o que por sua vez faz com que a distância entre as partículas diminua e a frequência de colisão e os pontos de contacto entre as partículas aumente [Nawa *et al*, 1998].

2.2.2 Agregados

No que toca aos agregados finos, podem ser utilizados tanto areias naturais como areias britadas, mas é dada preferência às naturais, já que a sua forma mais esférica permite um menor atrito entre as partículas, resultando num menor consumo de água e de adjuvante. O desejável é ter os agregados finos a ocuparem os espaços vazios dos agregados grossos, o que se traduz numa curva granulométrica bem distribuída. A presença dos agregados finos é fundamental, pois são estes que manterão afastados os agregados grossos, evitando assim a floculação (fenómeno de atracção das partículas) e a segregação.

Relativamente aos agregados grossos, é comum utilizarem-se britas com $D_{m\acute{a}x.} = 25$ mm, realçando que quanto maior o diâmetro, maior será a dificuldade à passagem do betão autocompactável em locais densamente armados e a viscosidade terá de ser superior de forma a evitar a segregação [ERMCO, 2005]. O diâmetro ideal é de $D_{m\acute{a}x.} \leq 12$ mm, o que confere uma melhor trabalhabilidade à pasta [Brito, Silva, 2009].

2.2.3 Água de amassadura

A água de amassadura desempenha papéis distintos na fase fresca e na fase de endurecimento do betão. Na fase fresca é responsável pela interação entre as partículas, conferindo à massa a trabalhabilidade adequada para permitir uma boa compactação e manuseamento. Na fase de endurecimento, a água de amassadura permite a molhagem dos

agregados e a hidratação do cimento, o que permite a ligação entre as partículas, conferindo assim à pasta a resistência esperada.

No entanto, quantidades de água de amassadura em excesso são desnecessárias e até prejudiciais. A água em excesso evapora-se criando poros capilares que prejudicam a durabilidade e a resistência, já que os agentes agressores penetram mais facilmente no interior do betão. Desta forma, a água deverá ser apenas a necessária para atingir a trabalhabilidade pretendida. Atualmente, com a ajuda dos adjuvantes plastificantes com elevado desempenho é possível utilizar quantidades de água de amassadura mínimas sem prejudicar a trabalhabilidade e evitar ao máximo a formação de porosidade.

A qualidade da água de amassadura é importante para as características finais do betão, pois a água participa nas reacções de hidratação do cimento que conferem a resistência necessária ao betão. Todas as águas com Ph superior a 4, sem cheiro e sem sabor podem ser utilizadas. [Appleton e Costa, 2002].

2.2.4 Adições

É todo o material inorgânico que se adiciona ao betão com finura inferior ou igual à do cimento. Tem como finalidade melhorar certas propriedades da pasta. Existem dois tipos de adições:

- Tipo I: Adições quase inertes. Exemplo: Fillers calcários
- Tipo II: Pozolânicas ou parcialmente hidráulicas: Metacaulinos; sílica de fumo; cinzas volantes; escórias de alto-forno

A quantidade de adições a colocar num betão autocompactável depende do seu tipo e da granulometria dos agregados. Um betão autocompactável requer um mínimo de finos ($d < 0,1$ mm), que deve ser corrigido com recurso a adições. O objetivo destas é corrigir a quantidade de finos até conseguir uma relação água/finos (A/F) em volume entre 0,85 e 1,1. A par, o efeito das adições, aumenta a compacidade dos materiais cimentícios, assim como a fluidez do betão fresco [Brito e Silva, 2009].

A adição de filler calcário (Tipo I) poderá ser utilizada como elemento de enchimento quando não é necessária uma resistência muito elevada. Já a sílica de fumo, tem como efeito o aumento da coesão do betão autocompactável, podendo também ser utilizado como elemento de enchimento sendo, no entanto, mais caro que o filler calcário. A adição

de pozolanas (Tipo II), melhora a deformabilidade da pasta. Além de terem o mesmo efeito que os agentes de viscosidade, ou seja, mantêm uma viscosidade adequada e permitem um aumento da trabalhabilidade da pasta sem comprometer a resistência à segregação, mantendo também a fluidez.

2.2.4.1 Filler calcário

O filler calcário é um material muito fino que consiste em calcário pulverizado cuja principal componente é o carbonato de cálcio na forma de calcite (CaCO_3). A sua superfície específica de *Blaine* (tipo de ensaio) vai desde os 0,25 aos 0,8 m^2/g . Não deve conter matéria orgânica e argila para poder ser utilizado na composição do betão autocompactável. A nível químico é quase inerte e por isso é considerado uma adição do tipo I. No entanto, a sua composição é variada, dependendo das condições ambientais a que esteve submetida a camada de substrato rochoso da qual foi extraído. Pode ser considerado como calcário calcítico ou dolomítico, sendo que o primeiro é constituído por carbonato de cálcio (mais utilizado no betão), como referido acima, enquanto que no segundo, parte do cálcio é substituído por magnésio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) [Nunes, 2001].

Este material é bastante utilizado no fabrico de betões e a sua introdução é benéfica para a mistura. Garante a coesão e viscosidade necessárias para evitar a segregação e o atrito entre partículas, melhorando a retenção da água, o que resulta num melhor comportamento contra os fenómenos de retracção e fissuração. É responsável por melhorar as propriedades reológicas, trabalhabilidade, deformabilidade e fluidez, além de melhorar a hidratação da pasta. Sendo do tipo I, a sua acção manifesta-se a nível físico. O seu efeito deve-se à sua finura já que permite ocupar os espaços vazios deixados pelos restantes constituintes, melhorando assim a distribuição granulométrica, o que se traduz numa maior retenção de água, eliminando a exsudação e aumentando a viscosidade [Barrela, 2010]. Já [Esping, 2003], constatou que aumentando a superfície específica do filler, aumenta também a quantidade de água necessária para o betão manter os requisitos de um betão autocompactável. Como tal, para evitar o aumento da quantidade de água de amassadura, o que traria maior porosidade à mistura quando endurecida, ao aumentar-se a finura do filler, aumenta-se também a percentagem de superplastificante.

2.2.4.2 Adições pozolânicas

As adições pozolânicas como as cinzas volantes, a microsílca ou o metacaulino são utilizadas nas formulações de argamassas ou betão como substituintes de uma determinada percentagem entre 5% e 30% de cimento. Estes materiais finos têm como vantagem uma diminuição das emissões de CO₂, um aumento da durabilidade do betão relativamente à carbonatação e ataque por sulfatos, corrosão, aumento da resistência à compressão, entre outros.

Aquando da hidratação do betão, uma percentagem do cimento Portland é transformada em portlandite (Ca(OH)₂), o que contribui para uma diminuição da durabilidade já que é um material parcialmente solúvel em água e quimicamente reactivo em ambientes ácidos. [Bai *et al*, 2003]. As adições pozolânicas contêm sílica vítrea ou amorfa que ao reagirem com a portlandite formam produtos com características cimentíceas. Uma importante característica das adições pozolânicas é também a sua reactividade pozolânica, que é conseguida à custa de um outro constituinte destas adições, a alumina. Esta, que dá origem a aluminosilicatos, ao hidratar-se torna-se muito reactiva, tal como nos cimentos [Hewlett, 2001].

Devido à sua finura, estas adições também mostram um efeito de “filler”. Ou seja, ocupam o volume de vazios deixado pelos agregados e pelo ligante, diminuindo assim a porosidade do sistema, o que traz benefícios a nível de resistência mecânica. [Paiva, 2013].

Mais importância para este trabalho tem o metacaulino como se verá mais adiante. Este, é obtido através da calcinação da argila rica em caulinite, a temperaturas que podem variar entre os 600-800°C dependendo das características da matéria-prima usada. De acordo com [Ambroise *et al*, 1986], a temperatura óptima de calcinação é aos 700°C, de forma a que se atinja a maior reactividade e se atinja a máxima resistência aos 3, 7 e 28 dias. [Lagier *et al*, 2007] chegou a algumas conclusões: O metacaulino além da sua maior reactividade pozolânica, ou seja, a sua capacidade de reagir a grande velocidade com o hidróxido de cálcio, também tem a capacidade de acelerar a hidratação do cimento e portanto atingir a sua resistência mecânica máxima mais cedo; A elevada área superficial do metacaulino é apontada como o motivo da aceleração da reacção pozolânica e do aumento da temperatura durante a fase inicial da hidratação; A reacção entre o metacaulino e o cimento é exotérmica, particularmente durante as primeiras 24 horas, o que estará relacionado com as reacções das fases de aluminosilicatos. [Bredy and Pera, 1989], substituíram o metacaulino

por cimento até uma percentagem de 50% e variaram a quantidade de água de amassadura para manter a consistência constante. Perceberam que para percentagens até 20% a porosidade diminuía, começando a aumentar quando se aproximavam dos 30% e portanto entende-se que uma maior substituição por metacaulino não é sinónimo de melhor comportamento.

Verifica-se assim que a utilização do metacaulino como substituinte de uma percentagem de cimento traz algumas vantagens. A elevada reatividade pozolânica promove uma reacção rápida e extensa com o hidróxido de cálcio, resultante da hidratação do cimento, acelerando também esta hidratação, o que permite maiores resistências mecânicas mais cedo. Desta reacção surgem materiais cimentícios adicionais.

2.2.5 Adjuvantes

É comum a confusão entre adições e adjuvantes. No entanto, estes últimos, são substâncias utilizadas em percentagens inferiores a 5% da massa de cimento que são adicionados durante a amassadura do betão que têm como objetivo alterar as propriedades deste tanto no estado fresco como no estado endurecido. Os adjuvantes são adicionados ao betão autocompactável com o propósito de alterar a fluidez da mistura, que por sua vez influencia a trabalhabilidade da pasta. No entanto, trazem também efeitos secundários como por exemplo a exsudação quando utilizados em excesso. Os plastificantes, redutores de água de amassadura, podem também ser retardadores de presa e os agentes introdutores de ar que têm como função a maior resistência ao gelo-degelo, também podem aumentar a trabalhabilidade, assim como diminuir a capilaridade [Paiva, 2005].

Superplastificantes

Os superplastificantes são os componentes mais essenciais num betão autocompactável. Contribuem para a elevada trabalhabilidade da mistura, atuando sobre as partículas de cimento, conseguindo uma redução de água na ordem dos 25% em média. Há, no entanto, os chamados superplastificantes da nova geração, à base de policarboxilatos, que já atingem 40% de redução de água, impedindo a prematura humificação dos grãos de cimento [Nepomuceno, 2005]. Os superplastificantes mais utilizados hoje em dia são os de polímeros de naftaleno sulfonado, os de melamina sulfonada, os copolímeros vinílicos e ainda carboxilatos modificados, estes, os de última geração. Podem definir-se como sendo de 2 tipos os mecanismos de dispersão das partículas devido à utilização de um

superplastificante: os baseados na repulsão electrostática (presentes nos polímeros de naftaleno sulfonado e na melanina sulfonada) e os baseados na repulsão estérica (presente nos carboxilatos modificados) [Ferreira e Jalali, 2002]. O superplastificante utilizado para este trabalho será um superplastificante de alto desempenho em que a sua base química é uma solução aquosa de policarboxilatos modificados. Portanto, o mecanismo de dispersão das partículas é baseado na repulsão estérica. Estes superplastificantes são polímeros de ligação com cadeias de óxido etileno com elevada resistência a sais e moléculas com cadeia lateral. As cadeias de óxido etileno têm uma grande facilidade em reter água, formando uma camada de absorção volumosa e espessa na superfície das partículas de cimento. Esta camada provoca a elevada repulsão estérica [Ferreira e Jalali, 2002].

De acordo com Nunes et al [Nunes *et al*, 2004] a utilização de um superplastificante tem como efeito um aumento da água livre, promovendo um aumento da fluidez na pasta e uma pequena diminuição da coesão. Uma dosagem exagerada pode provocar segregação e bloqueio de fluxo. A combinação de um superplastificante com uma baixa relação água/cimento permite reduzir a quantidade de água livre, o que é necessário para uma suspensão uniforme das partículas sólidas e redução das tensões internas devidas à colisão de partículas entre os agregados [Nunes et al, 2004].

2.3 Propriedades do Betão Autocompactável

2.3.1 Propriedades no estado fresco

Duas das características do betão autocompactável são a sua elevada fluidez e a sua capacidade de poder ser colocado sem vibração. É definido como um betão que exhibe uma elevada deformabilidade e uma boa resistência à segregação. Este tipo de mistura é de grande interesse e tem ganho algum uso no caso de situações em que a colocação do betão é difícil. Do ponto de vista reológico, o uso de agentes modeladores de viscosidade e superplastificantes asseguram uma elevada deformabilidade e estabilidade [Cordin et al, 2004]. Para tal, antes, é necessário entender o conceito de reologia. A reologia é o ramo da mecânica dos fluidos que estuda as propriedades físicas que influenciam o transporte da quantidade de movimento num fluido. Existem diversos tipos de fluidos, sendo o betão uma espécie diferente, já que é uma suspensão de partículas em água pelo que o seu comportamento é diferente da generalidade dos fluidos como se verá mais à frente. A reologia é uma propriedade fundamental aquando da conceção do betão autocompactável,

já que tem em conta parâmetros como a trabalhabilidade, atrito entre as partículas, fluidez, viscosidade, tensão de cedência, entre outros.

Para a melhor percepção deste conceito, imagine-se um líquido em repouso que é submetido ao movimento através de uma tensão de corte, τ . Entende-se facilmente que quanto mais coeso e denso for o líquido maior será a resistência ao início do movimento, a chamada tensão de cedência, τ_0 . Este valor pode ser igual a zero, significando que não houve resistência ao início do movimento. Este tipo de fluidos, como por exemplo a água é conhecido como fluido Newtoniano. Ao serem aplicadas as tensões, o fluido sofrerá uma deformação contínua no tempo, desde que o líquido continue a fluir [Barrela, 2010]. Assim, a tensão de corte, τ (Pa) é proporcional à taxa de deformação ou gradiente de velocidade, γ (1/s) e essa constante de proporcionalidade é denominada de constante de viscosidade, η (Pa.s), que, representa o declive da reta e mede a viscosidade do fluido. Veja-se a relação entre estes parâmetros na Figura 2.4.

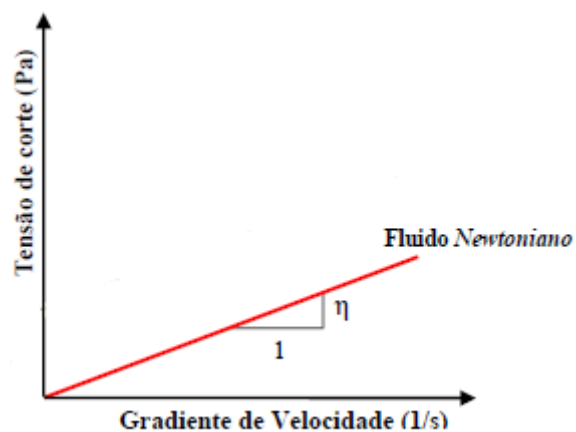


Figura 2.4- Fluido Newtoniano (Barrela, 2010, adaptado)

$$\tau = \eta \cdot \gamma$$

No entanto, o betão não é um fluido que se possa reger por este comportamento já que é uma suspensão de partículas em água, onde se registam atritos entre as partículas e as suas propriedades vão variando ao longo do tempo, pelo que um modelo que conseguisse descrever todas estas características seria extremamente complexo.

Um modelo simples e que consiga espelhar relativamente bem as propriedades do betão é o modelo de Bingham, que é em tudo semelhante ao do fluido Newtoniano exceto num parâmetro, que é a existência de uma tensão de cedência inicial, τ_0 , que se traduz numa resistência inicial que é necessário vencer até que o fluido inicie o movimento, o que pode ser representado pela seguinte expressão e na Figura 2.4.

$$\tau = \tau_0 + \mu' \cdot \gamma$$

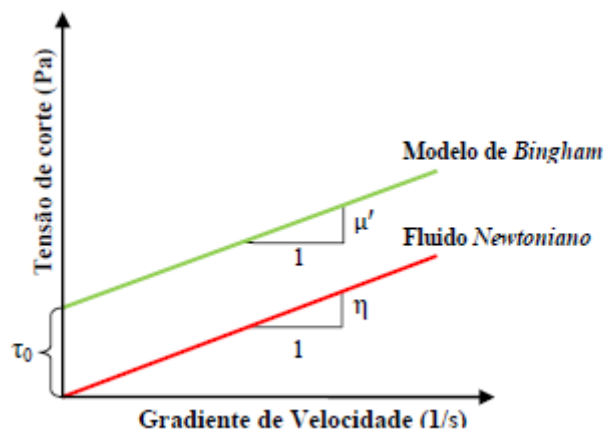


Figura 2.5- Fluido Newtoniano e Fluido não-Newtoniano (Barrela, 2010)

Os betões podem ter um comportamento diferente uns dos outros, incluindo o betão autocompactável. Nenhum deles respeita na totalidade o modelo de Bingham, mas não deixa de ser este o modelo que mais se aproxima dos seus comportamentos. Veja-se a Figura 2.6.

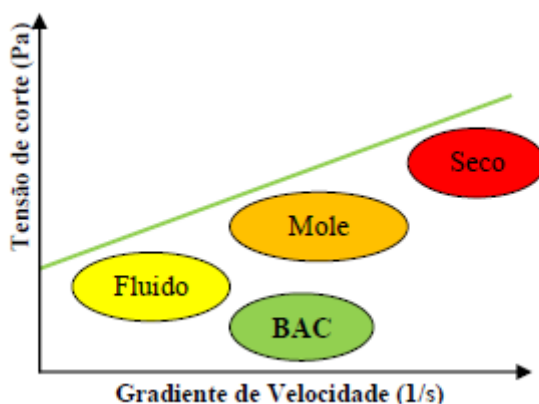


Figura 2.6- Domínio da reologia de um betão autocompactável (Barrela, 2010)

Pela análise da figura, entende-se que o betão autocompactável tem uma tensão de cedência inicial (τ_0) inferior a todos os outros betões, além de uma menor viscosidade (η). A baixa tensão de cedência, mostra que se está perante uma mistura com alta fluidez, o que se traduz num comportamento próximo de um fluido Newtoniano. Já a viscosidade mais baixa, é associada à resistência à segregação da mistura, pois quanto menor capacidade tiver o betão para manter as suas partículas em suspensão, maior a probabilidade da migração da água para fora do sistema.

São as propriedades no estado fresco que ditam a diferença entre um betão autocompactável e um betão convencional. No estado fresco, o betão pode ser encarado como sendo constituído por duas fases distintas: fase sólida, que inclui todas as partículas de agregado cujo diâmetro equivalente seja superior a 150 μm e que constitui o esqueleto sólido, fase fluida (pasta ligante) que é constituída pelas partículas sólidas de diâmetro inferior a 150 μm (cimento e adições), pela água e pelos adjuvantes (superplastificantes, moduladores de viscosidade) [Barros et al, 2004]. Para o betão autocompactável, o desejado é que numa situação de escoamento livre e sem obstáculos, exista uma capacidade de deformação elevada e uma fluidez adequada sem segregação e bloqueio, o que se traduz numa baixa tensão de corte e numa viscosidade adequada. Pretende-se também que seja capaz de passar por zonas de armaduras densas e cofragens complexas, pelo que se exige uma adequada trabalhabilidade que avalia outras propriedades desejadas como a capacidade de enchimento, capacidade de passagem (resistência ao bloqueio) e a resistência à segregação [Brito e Silva, 2009].

De acordo com a publicação “European Guidelines for Self-compacting Concrete: Specification, Production and Use [Ermco, 2005] ou da sua tradução para Portugal [APEB, 2007], verifica-se que são 4 os parâmetros desejados para a colocação do betão autocompactável em fresco:

- Capacidade de escoamento (capacidade de preenchimento)
- Viscosidade
- Capacidade de passagem (fluidez)
- Estabilidade (resistência à segregação)

Portanto, exige-se que a mistura tenha a capacidade de preencher todos os espaços vazios envolvendo as armaduras, evite a formação de fenómenos de segregação de forma a obter uma estrutura o mais homogénea possível, possua uma elevada deformabilidade numa

situação de escoamento livre e sem obstáculos e tenha a capacidade de as partículas mais grossas flutuarem livremente na pasta. Para melhor caracterizar o comportamento do betão em fresco, foi proposta por Daczko (2002), uma escala para o betão autocompactável tendo em conta o tipo de estrutura a betonar e os diâmetros de espalhamento obtidos de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Escala para o betão autocompactável

Tipo	Diâmetro (mm)
Tipo 1	$D < 560$
Tipo 2	$560 < D < 660$
Tipo 3	$D > 660$

Além da escala mencionada acima, Daczko (2002), propôs a adoção de um índice de instabilidade visual (VSI) que varia de 0 a 3. Para as misturas completamente estáveis, é-lhes atribuído o valor 0 e às claramente instáveis o valor 3, sendo 1 e 2 os valores intermédios. A Tabela 2.2 resume as classificações propostas por Daczko.

Tabela 2.2- Classificações propostas por Daczko

VSI	Critério
0= Altamente estável	Sem indícios de segregação ou exsudação
1= Estável	Não há formação de um anel exterior de argamassa ou acumulação de agregado no centro da amostra. Ligeiros indícios de exsudação manifestados na superfície da amostra.
2= Instável	Surgimento de um delgado anel de argamassa exterior (≤ 10 mm) e acumulação de agregados no centro da amostra.
3= Altamente instável	Segregação evidente devido à formação de um largo anel exterior de argamassa (> 10 mm) e/ou acumulação de agregados no centro da amostra.

2.3.2 Propriedades no estado endurecido

Um betão autocompactável tem as mesmas exigências que um betão convencional quando no estado endurecido. No entanto, de forma a se atingirem as desejadas propriedades no estado fresco como a autocompactação, a elevada resistência à segregação e elevada

deformabilidade exige-se que a sua formulação seja diferente da utilizada num betão convencional. A utilização de uma maior quantidade de finos, bem como um menor volume de agregados grossos e um maior número de adições, traduzem-se numa modificação da granulometria do betão. Consequentemente, estas mudanças na formulação irão alterar o comportamento tanto no estado fresco como no estado endurecido, mas com bastante mais importância no primeiro.

É ao nível da resistência mecânica, módulo de elasticidade, durabilidade, retração e fendilhação que surgem as maiores alterações.

Os valores de resistência à flexão e à compressão aos 28 dias quando comparado um betão autocompactável com um betão convencional, não diferem muito. No entanto, a utilização de superplastificantes (com o propósito de se atingir a autocompactabilidade), diminuem de sobremaneira a quantidade de água de amassadura pelo que a porosidade obtida é menor, traduzindo-se numa superior resistência à compressão. A maior presença de material fino torna mais densa a matriz do cimento, pelo que é igualmente uma das razões para o melhor comportamento à flexão [Holschemacher, 2004].

No que toca ao módulo de elasticidade, este depende do módulo de Young dos seus componentes e das suas percentagens em volume, que no caso do betão autocompactável, os que terão mais influência serão os constituintes mais finos. Portanto, é esperado um menor valor do módulo de elasticidade num betão desta categoria. Um betão autocompactável quando comparado com um betão convencional apresenta um módulo de elasticidade inferior em 20%, mesmo quando obtém a mesma resistência à compressão e feito com os mesmos agregados [Holschemacher, 2004]. Já Persson (2001), afirma que as diferenças não são tão grandes, quando as condições de cura são as adequadas (cura húmida) e para valores equivalentes de resistência à compressão.

Relativamente à retração e fendilhação, há algumas opiniões divergentes, excluindo num aspeto que é o de este fenómeno ser afetado pela razão água/cimento tanto num betão como no outro. Ainda assim, este fenómeno pode ser mais evidente no betão autocompactável devido à sua diferente relação entre os agregados mais grossos e os agregados mais finos [Brito e Silva, 2009]. Por conseguinte, deverá ser dada maior atenção a este fenómeno no betão autocompactável, devido à maior utilização de materiais finos, mas podendo ser atenuado com a utilização de métodos de cura adequados.

2.4 Vantagens do Betão Autocompactável

Sendo o betão autocompactável um betão igual em tudo a um betão convencional, quando em estado endurecido, excluindo apenas algumas mais-valias em termos estéticos, é no estado fresco que as vantagens deste material mais sobressaem. Todos os intervenientes numa obra poderão vir a ganhar com a aplicação deste material, desde engenheiros, técnicos, arquitetos, fornecedores, empreiteiros, etc. As suas vantagens que se traduzem no ambiente da obra, como redução do tempo, redução do ruído, redução do investimento, entre outros, irão trazer vantagens aos intervenientes da mesma.

A necessidade de vibração do betão é um problema que deixa de existir aquando da escolha de um betão autocompactável. O facto de ser uma mistura bastante mais fluida e com mais trabalhabilidade, permite que se espalhe e se acomode entre zonas densamente armadas, assim como preencha todos os locais da cofragem, qualquer que seja a geometria desta. Deixa de ser necessária mão-de-obra especializada para a vibração, o que se traduz por um lado numa poupança a nível económico, como por outro numa poupança de tempo (que também se traduz numa poupança a nível económico). Disto resulta uma maior flexibilidade no planeamento da obra. Veja-se o caso de uma zona densamente armada na Figura 2.6.



Figura 2.7- Zona densamente armada (retirado de www.abesc.org.br)

Também, a nível ambiental surgem vantagens, como é o caso de uma redução bastante acentuada do nível de ruído, principalmente em zonas da estrutura que exijam um elevado nível de compactação, traduzindo-se num aumento de bem-estar na obra e na saúde dos trabalhadores, o que pode levar a uma maior produtividade. Como já foi referido anteriormente, este betão é conhecido como “betão silencioso” ou “revolução silenciosa”.

Quando bem executado um betão autocompactável, é um betão totalmente homogéneo, ao contrário do que acontece com um betão convencional que, apesar de todos os cuidados com a vibração, por vezes surgem zonas onde a resistência não é a esperada, como é possível confirmar com testes a carotes retirados da estrutura [Nunes, 2001].

A nível não estrutural, este material goza do facto de não ser necessário o aplanamento das superfícies horizontais, já que tem um comportamento autonivelante devido à sua fluidez. Veja-se o exemplo de um parque de estacionamento ou de um parque industrial que se exige que tenha uma superfície plana e que se desenvolve por uma grande área, onde desta forma, se consegue poupar tempo e por conseguinte investimento no aplanamento de locais tão extensos. Além do mais, é possível obter superfícies suaves, uniformes e livres de defeitos. O mesmo se passa para a utilização de betão autocompactável em elementos verticais, quando utilizando cofragens de boa qualidade e se controla a técnica de aplicação, tendo em conta a velocidade da bombagem e a distância a que a secção está do tubo da bomba.

CAPÍTULO 3. Metodologia experimental

3.1 Introdução

O trabalho efectuado visou estudar a influência dos diversos constituintes no comportamento do betão autocompactável (BAC), tanto no estado fresco como no estado endurecido. Foram desenvolvidas diversas formulações a partir de uma formulação base, onde foram avaliadas características no estado fresco tais como os parâmetros reológicos, recorrendo a um reómetro específico para betão e o ensaio de espalhamento. Também foi verificada a ocorrência ou não de exsudação. No estado endurecido foi avaliada, aos 7 e aos 28 dias de cura, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à penetração de cloretos. A partir da formulação base foram avaliados efeitos como o teor de superplastificante, de razão água/cimento, de variação do teor em cimento, de adição de uma pozolana (metacaulino) como substituição parcial no cimento, de a adição de um filler e a adição do metacaulino como filler.

3.2 Betão Autocompactável

3.2.1 Materiais utilizados

3.2.1.1 Agregados

Os agregados utilizados foram uma brita (B1) de dimensões entre 8 e 12 mm, uma areia fina denominada de areia de Vale de Ílhavo e uma areia grossa denominada de areia de Salgueiro Crivada. Foram caracterizados em termos de distribuição granulométrica de acordo com a norma NPEN933-1-2000 e em termos de massa volúmica aparente e real de acordo com a norma (NPEN1097-6-2000) como se pode verificar na Figura 3.1 e na Tabela 3.1.

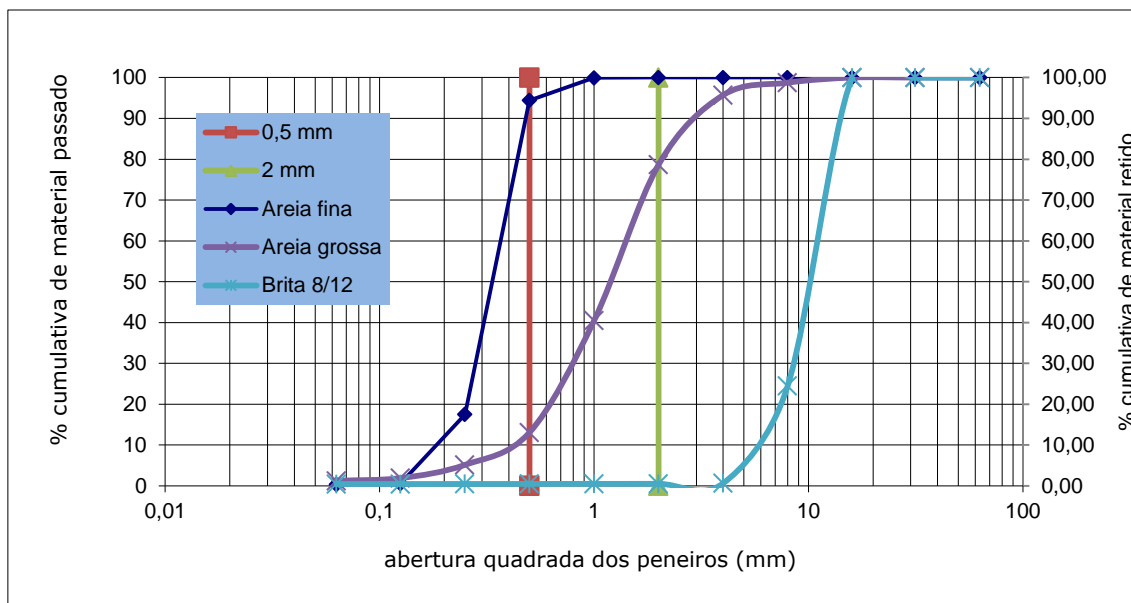


Figura 3.1- Curva de distribuição granulométrica dos agregados

Tabela 3.1- Densidades dos agregados

Material	ρ aparente (kg/m ³)	ρ real (kg/m ³)
Brita	1340	2610
Areia grossa	1930	2620
Areia fina	1640	2690

3.2.1.2 Materiais finos

Uma das diferenças entre o BAC e o betão comum é a maior utilização de material fino no primeiro. Nestes materiais estão incluídos os cimentos (simples ou compostos) e as adições (quase inertes ou pozolânicas). Também podem ser considerados finos partículas que passem em determinado diâmetro da malha do peneiro, partículas essas que podem ser transportadas pelos agregados finos [Skarendahl, 2000]. O limite para o qual uma partícula é considerada um fino varia de país para país. Na Europa uma partícula é considerada fina se tiver até 0,125 mm, já no Japão é até 0,09 mm [Bilberg, 1999].

Cimento

Como ligante foi utilizado um cimento Portland Tipo II 32.5R. Este é o componente que mais influência tem na formulação de betões, seja autocompactável ou não. Além de ser o elemento com propriedades hidráulicas que permite a aglomeração de todos os outros constituintes, é por outro lado o responsável pelos maiores custos na sua fabricação.

Não foi feita a determinação da distribuição do tamanho de grãos para o cimento usando o método de Coulter porque este ensaio é feito em meio aquoso e o cimento reage com a água alterando o tamanho das partículas.

Foi utilizado na composição padrão um teor de 450kg/m^3 e numa outra composição, com 500kg/m^3 , esta última com intenção de perceber o efeito do aumento do teor em ligante no betão autocompactável.

Filler

O filler utilizado foi um filler calcário. A sua introdução foi feita com o intuito de perceber o seu efeito no comportamento em fresco nas formulações, já que ao ocupar os espaços vazios deixados pelas areias e pelas britas, contribui para melhorar a trabalhabilidade do betão, facilitando o movimento das partículas dos agregados [Bédérina et al, 2004]. A distribuição granulométrica da pasta é melhorada, o que leva a uma maior retenção de água, já que há um aumento da área superficial do sistema, reduzindo a fluidez. Este facto é compensado com a adição de superplastificante [Barrak et al, 2007]. Veja-se o aumento da densidade aparente determinado com os materiais secos na formulação base quando se adiciona o filler calcário nas percentagens de 1,5% e 2,0% na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Variação da densidade aparente conforme a percentagem de filler

Composição	ρ aparente (Kg/m^3)
Comp. padrão sem filler	1760
Composição padrão com filler (1,5%)	1830
Composição padrão com filler (2,0%)	1860

A Figura 3.2 mostra a distribuição granulométrica do filler através do aparelho Coulter LS300.

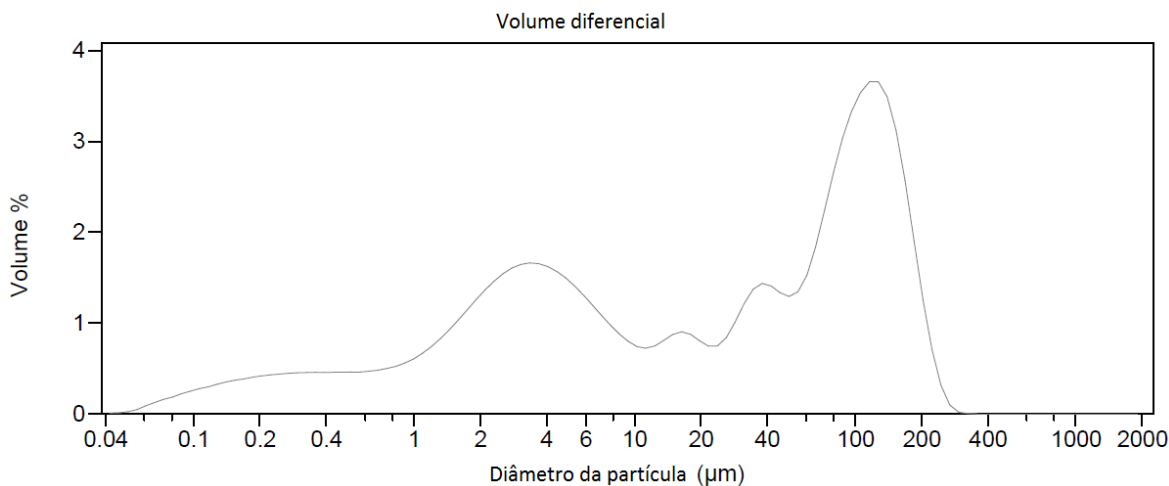


Figura 3.2- Distribuição granulométrica do filler

A área superficial foi determinada através do método de BET (Micromeritics, modelo Gemini 2380), apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Área superficial do filler

Área superficial (m ² /g)	
Filler	1,00

Metacaulino

Este material fino tem como vantagem um aumento da durabilidade do betão relativamente à carbonatação e ataque por sulfatos, corrosão e aumento da resistência à compressão [Paiva, 2013]. A sua introdução nas composições foi feita com o intuito de perceber se poderia ser introduzido nas formulações de forma a não alterar as propriedades no estado fresco que são necessárias para que um betão seja considerado autocompactável. Pretendeu-se também verificar se as suas vantagens no estado endurecido tinham efeitos manifestos.

A Tabela 3.3 apresenta a composição química do metacaulino obtido por espectroscopia de fluorescência de raios-X (Panalytical, modelo Axicos, com ampola de Rh). Como esperado, os óxidos maioritários são a sílica vítrea (SiO₂) e a alumina (Al₂O₃).

Tabela 3.4- Análise por fluorescência de Raios-X ao metacaulino

Óxido	%
SiO ²	52,17
Al ² O ³	44,5
Fe ² O ³	0,45
CaO	0,01
K ² O	0,15
TiO ²	1,42
P ² O ⁵	0,12
P.R.	1,42

Este aditivo foi também caracterizado através de análise por difracção de Raios-X (DRX), (Rigaku, modelo Geigerflex). O seu padrão de difracção está presente na Figura 3.3.

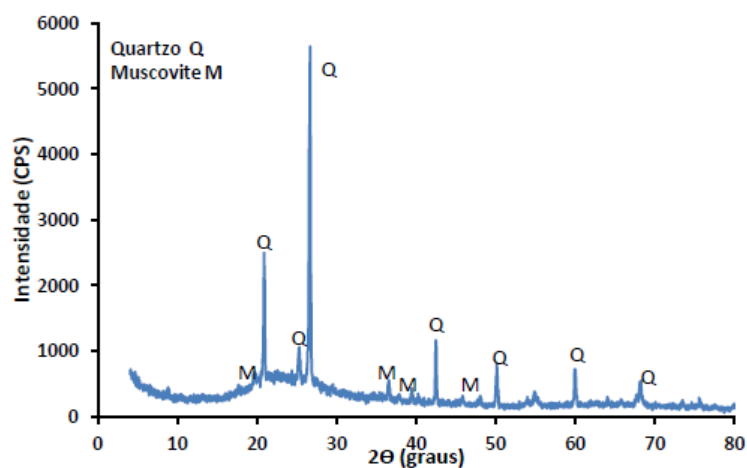


Figura 3.3- Difracção de Raios-X do metacaulino

O padrão de difracção do metacaulino é basicamente amorfo mas com presença de alguma sílica cristalina e um mineral argiloso.

A caracterização física foi efectuada em termos de massa volúmica real e aparente, área superficial e distribuição granulométrica. A determinação da massa volúmica real foi efectuada através do picnómetro de hélio (Micromeritics, modelo Accucyc 1330), enquanto que a área superficial foi determinada através do método de BET (Micromeritics, modelo Gemini 2380). Os resultados dos ensaios referidos estão presentes na Tabela 3.4.

Tabela 3.5- Propriedades do metacaulino

Caracterização física	
Área sup. (m ² /g)	16,19
ρ real (g/cm ³)	2,45
ρ aparente (g/cm ³)	0,62

A Figura 3.4 mostra a distribuição granulométrica do metacaulino obtida com o aparelho Coulter LS300.

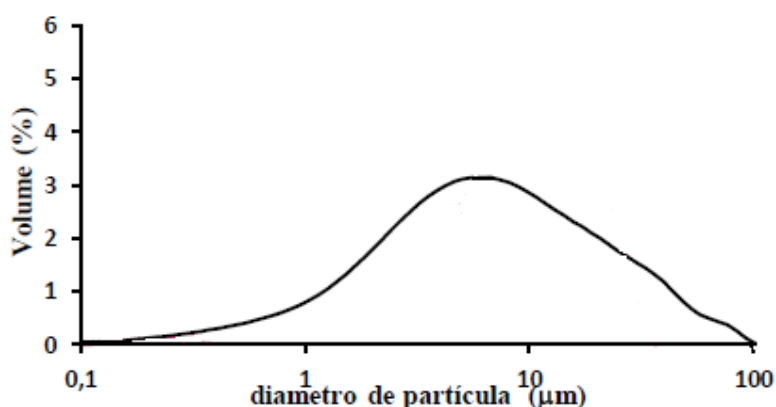


Figura 3.4- Distribuição granulométrica do metacaulino

3.2.1.3 Superplastificante

O adjuvante utilizado foi um superplastificante da marca Sika, SikaPlast 805. É um superplastificante de alto desempenho e forte redutor de água para betão. De acordo com a ficha técnica [Sika Portugal, 2013] actua sobre as partículas do ligante por um mecanismo principal, a adsorção superficial. Ambos são responsáveis por um efeito dispersante muito intenso, permitindo uma elevada redução da água de amassadura ou um aumento marcado da trabalhabilidade, conseguindo-se assim um comportamento mais favorável quanto à retracção e fluência.

É responsável por uma forte plastificação e uma boa manutenção da consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido da resistência mecânica.

A ficha técnica aconselha a sua utilização em classes de betão iguais ou superiores a C30/37, betões muito plásticos, fluidos e betões autocompactáveis e ainda em teores inferiores a 1,7% do peso do cimento.

3.2.2 Formulações

Partindo da formulação que dá origem a um BAC de Tipo II de acordo com Daczko que divide o BAC por tipos, de acordo com o diâmetro de espalhamento [Daczko 2002], foi obtida a mistura mais compacta possível utilizando o triângulo de *Feret* onde se traçou a reta de maior compactidade, como se vê na Figura 3.5.

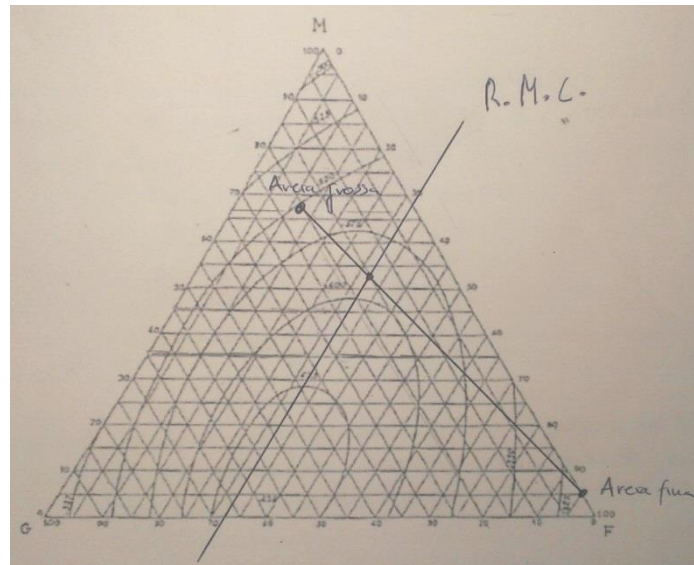


Figura 3.5- Triângulo de Feret- Mistura mais compacta

Depois de feita a “regra da alavanca”, verificou-se que para a mistura mais compacta é necessário 75,7% de areia grossa e 24,3% é de areia fina. Na Figura 3.6 está presente a distribuição granulométrica da mistura mais compacta depois de obtida a recta de maior compactidade no triângulo de *Feret*.

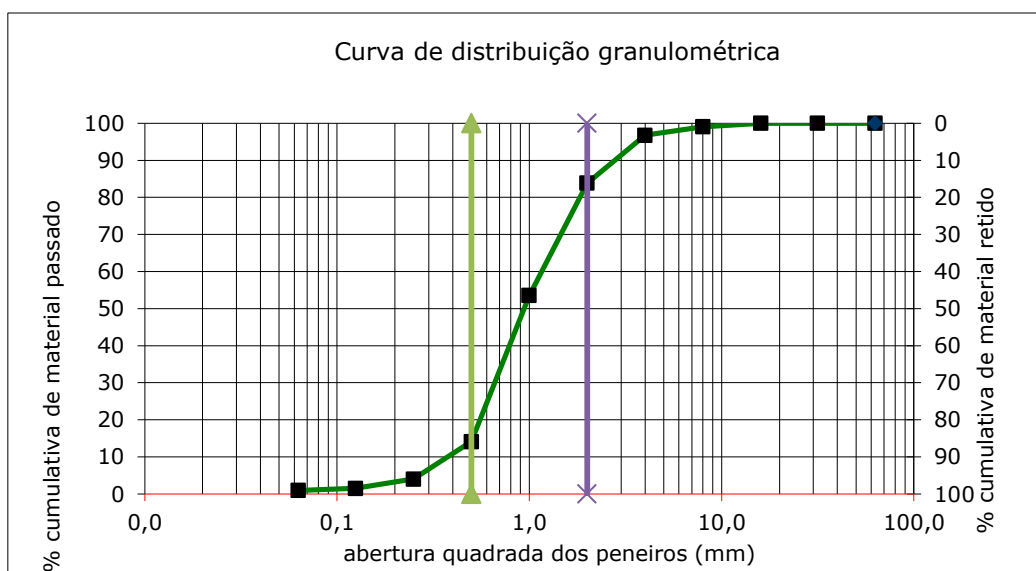


Figura 3.6- Distribuição granulométrica da mistura mais compacta

Pretende-se desenvolver um betão autocompactável partindo-se de uma formulação base, constituído por uma brita, duas areias, cimento, água e superplastificante. Face a um betão convencional, este tem uma maior quantidade de finos e uma menor quantidade de agregado grosso de forma a ter as propriedades desejadas, como a maior fluidez, maior trabalhabilidade e maior resistência à segregação.

A partir dos valores da composição padrão, constituída por 740 Kg de brita, 806 Kg de areia grossa, 244 Kg de areia fina, e 450 Kg de cimento é possível obter a percentagem mássica de cada um deles (Tabela 3.6) e assim fazer a proporção para a quantidade de betão pretendida, a suficiente para realizar os ensaios em fresco e poder preencher os moldes cúbicos e cilíndricos. Foram realizadas várias composições base mas com diferentes teores de superplastificante de forma a poder escolher o melhor compromisso entre a tensão de cedência, viscosidade e espalhamento, tendo sido escolhida a formulação com 1%.

Tabela 3.6- Percentagem mássica dos constituintes

Composição base para 1 m3 (kg/m3)		
Constituinte	Massa (Kg)	Percentagem (%)
Brita (8/12)	740	33
Areia Grossa (Salg. Crivada)	806	36
Areia Fina (Vale Ílhavo)	244	11
Cimento 32,5	450	20
Total	2240	100
Total (areias)	1050	47

A partir da composição padrão, formularam-se diversas composições, variando o teor de superplastificante, razão água/cimento, teor em ligante, substituição parcial do cimento por metacaulino e adição de um filler calcário e de um metacaulino como filler em diversos teores como é visível na Tabela 3.7.

Tabela 3.7- Formulações testadas

Tipo de formulação	Formulação	SP (%)	MC (%) (Pozolana)	Filer calcário (%)	A/C	Teor em ligante (Kg/m ³)
Base com variação do teor em superplastificante	BAC_0.8SP	0,8	-	-	0,4	450
	BAC_0.9SP	0,9				
	BAC_1.0SP	1,0				
	BAC_1.2SP	1,2				
	BAC_1.5SP	1,5				
	BAC_1.7SP	1,7				
Variação do teor em água	BAC_0.8SP_0,3W	0,8	-	-	0,3	450
	BAC_1.0SP_0,3W	1,0				
	BAC_2.0SP_0,3W	2,0				
Variação do teor em cimento	BAC_1.0SP_500C	1,0	-	-	0,4	500
	BAC_1.2SP_500C	1,2				
Substituição parcial do cimento por metacaulino	BAC_1.0SP_10MC	1,0	10	-	0,4	450
	BAC_1.2SP_10MC	1,2				
	BAC_1.0SP_20MC	1,0	20			
	BAC_1.2SP_20MC	1,2				
Adição de filer calcário	BAC_0.8SP_1.5F	0,8	-	1,5	0,4	450
	BAC_1.0SP_1.5F	1,0				
	BAC_1.2SP_1.5F	1,2				
	BAC_0.8SP_2.0F	0,8		2		
	BAC_1.0SP_2.0F	1,0				
	BAC_1.2SP_2.0F	1,2				
Adição de metacaulino	BAC_1.2SP_1.5MC	1,2	1,5	-	0,4	450
	BAC_1.2SP_2.0MC		2			

3.3 Caracterização do comportamento do betão em fresco

3.3.1 Preparação do betão

Utilizando uma misturadora específica para betão (Figura 3.7), a mistura é feita de acordo com o seguinte procedimento:



Figura 3.7- Misturadora específica para betão

- Coloca-se a água no interior do contentor onde de seguida é misturada com o superplastificante
- Coloca-se o cimento, misturando-o manualmente com uma colher de pedreiro até a pasta ficar homogénea. Caso haja metacaulino ou filler na formulação, o mesmo é adicionado a seguir ao cimento e a sua mistura processa-se da mesma forma.
- Liga-se a misturadora e deixa-se a trabalhar durante dois minutos, findos os quais se adicionam as areias e britas por ordem crescente de distribuição granulométrica até se perfazer um total de 4 minutos.
- Por fim, deixa-se a misturadora trabalhar durante 1 minuto, até atingir os 5 minutos.

As diversas fases do processo poderão ser vistas na Figura 3.8:



Figura 3.8- Fases do processo de mistura

3.3.2 Ensaio reológico

Logo após a mistura estar concluída é efectuado o ensaio reológico. Para tal, é utilizado um reómetro específico para betão, (BT2 Schleibinger) apresentado na Figura 3.9. Este aparelho é constituído por um recipiente circular com 60 cm de diâmetro, uma profundidade de 10 cm e com capacidade para 20 litros. No seu centro encontra-se um orifício onde é encaixada a cabeça do reómetro para rotação. Esta é constituída por 2 pinos com 90 mm de comprimento afastados do centro a 75 e a 175 mm, permitindo assim a medição de 2 velocidades angulares. É graças a esta diferença que é possível obter os coeficientes “g” e “h” que são respectivamente proporcionais à tensão de cedência e à viscosidade da pasta [Golaszewsky 2007; Greim 1997].



Figura 3.9- Reómetro BT2 Schleibinger

3.3.3 Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento é realizado logo após o ensaio reológico. De forma a despistar quaisquer erros, o mesmo foi realizado 5 minutos após a mistura estar pronta em qualquer uma das formulações realizadas. Este ensaio permite a avaliação da deformabilidade do BAC através do diâmetro de espalhamento de uma amostra deformada por acção do seu peso próprio. Para tal, é necessária uma placa de aço quadrada plana, onde a partir do seu centro foram desenhadas circunferências de diâmetro crescente (Figura 3.10), um cone de *Abrams*, descrito na norma ISO 4109 ou NP 87 e uma fita métrica.

O procedimento adoptado foi o seguinte: Começa-se por humedecer a placa de aço e o interior do cone com uma escova molhada, coloca-se a placa numa superfície limpa e nivelada e posiciona-se o cone por cima do círculo com um diâmetro igual ao seu, enche-se o cone de uma só vez, sem qualquer tipo de compactação, e nivela-se o betão no topo do cone. De forma cuidadosa, levanta-se o cone e espera-se alguns segundos até a mistura parar de espalhar, mede-se o maior diâmetro de espalhamento, em seguida o perpendicular a este e faz-se a média entre os 2, de acordo com a norma do BAC, NP EN 12350-8 (Figura 3.10).

Além do espalhamento, é também importante a inspecção visual do aspecto final da mistura, o que permite prever o comportamento do betão. Nestas circunstâncias, verifica-se a presença de possível exsudação e conseqüente segregação.

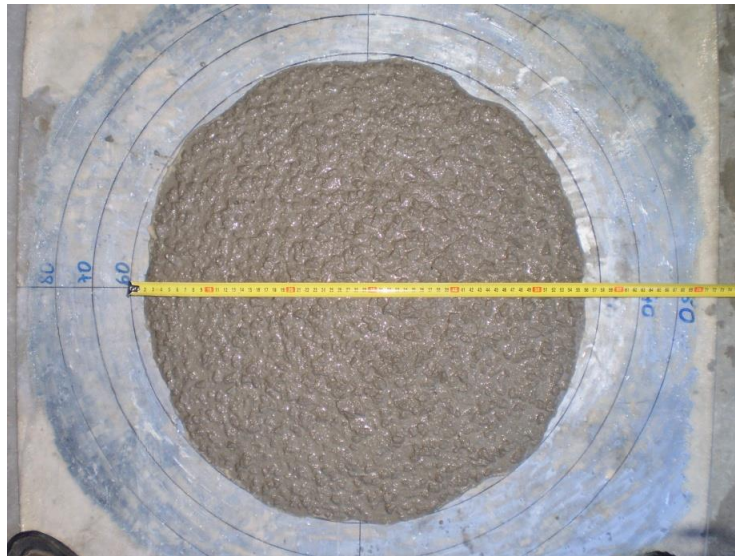


Figura 3.10- Medição do espalhamento

3.4 Caracterização do comportamento do betão no estado endurecido

A caracterização do betão no estado endurecido foi efectuada aos 7 e 28 dias relativamente à sua resistência mecânica, através de ensaios à compressão e determinação do módulo de elasticidade e à sua durabilidade através do ensaio de penetração de cloretos. De acordo com a norma NP EN 12390-2 que visa a “Execução da cura dos provetes para ensaio de resistência mecânica”, o BAC depois de pronto foi colocado em moldes cúbicos e cilíndricos durante 24 horas protegido contra choques e vibrações e a uma temperatura de 20 ± 5 °C. Após esta fase, as amostras foram desmoldadas e colocadas em câmara a curar até aos 7 e aos 28 dias a uma temperatura de 20 ± 5 °C e a uma humidade relativa ≥ 95 %.

3.4.1 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado em cada formulação aos 7 e aos 28 dias de idade de acordo com a Especificação Portuguesa E397-193 através da utilização de um Pundit, (CNS Farnell, modelo Pundit 6). Para cada uma das formulações foram utilizados 3 provetes de 100×100 mm², dos quais se fez a média, tanto aos 7 como aos 28 dias. O valor registado pelo aparelho é um tempo em microssegundos que depois de aplicado na expressão indicada abaixo se obtém o módulo de elasticidade dinâmico em GPa.

$$E = v^2 \cdot \rho \text{ (GPa)}$$

Onde:

- E = Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)
- v = Velocidade (m/s)
- ρ = Densidade (Kg/m^3)

O procedimento adoptado foi o seguinte: pesou-se cada um dos provetes, besuntou-se os transdutores com massa consistente de modo a evitar a criação de espaços vazios entre estes e o provete, encostaram-se os transdutores ao provete e por fim registou-se o valor (Figura 3.11).

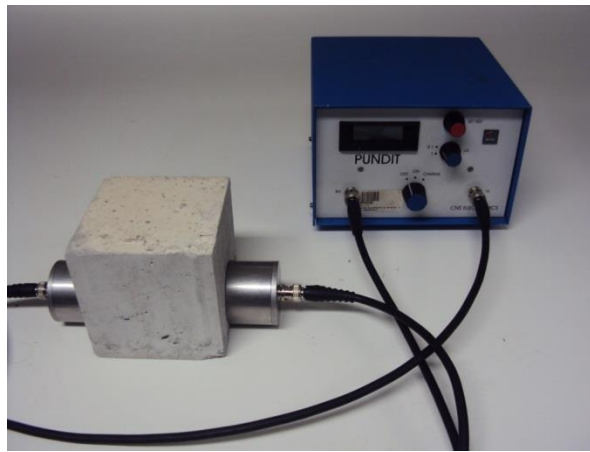


Figura 3.11- Pundit utilizado

3.4.2 Determinação da resistência mecânica à compressão

A determinação da resistência à compressão foi efectuada de acordo com a norma NP EN 206-1, aos 7 e aos 28 dias numa máquina de ensaio à compressão, marca Form Test modelo Beta 2 3000 D em provetes de $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. Da mesma forma, para cada formulação foram utilizados 3 provetes, dos quais se fez a média tanto aos 7 como aos 28 dias. Após os ensaios, visualizou-se se o aspeto dos provetes de forma a verificar se tinham as roturas correctas (Figura 3.12). Caso contrário, o provete era rejeitado.



Figura 3.12- Exemplo de provetes com a rotura correcta

3.4.3 Ensaio de penetração de cloretos (Durabilidade)

Neste ensaio foi ensaiada a durabilidade do BAC através da resistência à penetração dos cloretos. São três os fluidos que podem entrar no betão: água, pura ou contendo iões agressivos, oxigénio e dióxido de carbono. A facilidade com que estes fluidos penetram no betão dita a sua durabilidade, fenómeno este que é muitas vezes denominado de permeabilidade.

O método utilizado para a avaliação desta característica foi a imersão dos provetes (cilíndricos com 300 mm de altura por 150 mm de diâmetro) numa solução salina artificial (Tabela 3.8). Os mesmos foram inicialmente colocados na câmara em cura por 28 dias e em seguida foram mergulhados na solução durante 45 dias. Após este processo os cilindros são sujeitos a um ensaio de resistência à compressão diametral (ensaio brasileiro). O cilindro fica aberto ao meio e nessa altura é pulverizado com nitrato de prata (AgNO_3) que ao reagir com os cloretos origina cloreto de prata (AgCl) que se manifesta através de uma cor cinza prateada, diferenciando-se assim da zona não afectada que ganha uma cor acastanhada. A profundidade de penetração é ditada pelo comprimento da cor cinza prateada desde o rebordo do cilindro em direcção ao seu interior, permitindo assim comparar as diversas composições (Figura 3.13). São medidas as 4 profundidades e é feita a média desses valores. Quanto maior o valor, maior será a penetração dos cloretos para uma determinada formulação.

Tabela 3.8- Composição da solução salina

Componente	Concentração (g/L)
NaCl	30,0
MgCl ₂	6,0
MgSO ₄	5,0
CaSO ₄ 2H ₂ O	1,5
KHCO ₃	0,2

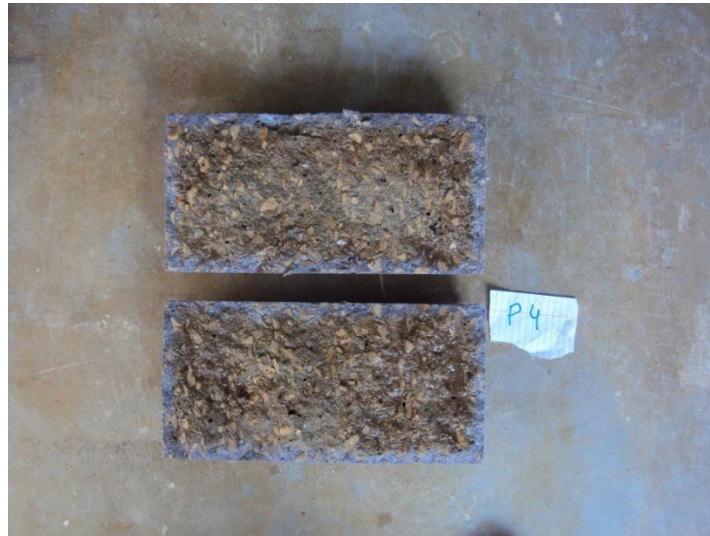


Figura 3.13- Exemplo de ensaio de penetração de cloretos

CAPÍTULO 4. Apresentação e discussão de resultados

4.1 Comportamento no estado fresco

O estudo reológico do BAC iniciou-se com a avaliação do comportamento da formulação padrão que serviu de base à introdução ou modificação de componentes que são relevantes na reologia. Inicialmente, optou-se por variar a percentagem de superplastificante e verificar qual trazia o melhor compromisso entre os parâmetros reológicos e o espalhamento. Depois de encontrada a composição base foi testada a influência da modificação da razão água/cimento, do teor em cimento, o efeito da substituição parcial do cimento por metacaulino, a influência da adição de um filler calcário e de um metacaulino.

4.1.1 Efeito da introdução de superplastificante na composição base

Partindo da composição base, com uma razão A/C=0.4, um teor em ligante de 450 kg/m^3 e com 0.8% de superplastificante, foi-se aumentando o teor de superplastificante até aos 2%. Veja-se a variação da viscosidade e da tensão de cedência representados pelos parâmetros h e g que lhes são proporcionais, respectivamente e do espalhamento em função da percentagem de superplastificante (Tabela 4.1). A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 representam a variação dos parâmetros reológicos e do espalhamento conforme o teor em SP. A presença de circunferências vermelhas em algumas formulações indica a presença de exsudação.

Tabela 4.1- Efeito do superplastificante nas propriedades do estado fresco

Padrão				
Formulação	%SP	h (N.mm.min)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
BAC_0,8SP	0,8	2861	842	325
BAC_0,9SP	0,9	2129	201	585
BAC_1,0SP	1,0	2410	207	575
BAC_1,2SP	1,2	1988	244	600
BAC_1,5SP	1,5	2585	225	600
BAC_1,7SP	1,7	1510	165	600
BAC_2,0SP	2	2041	202	700

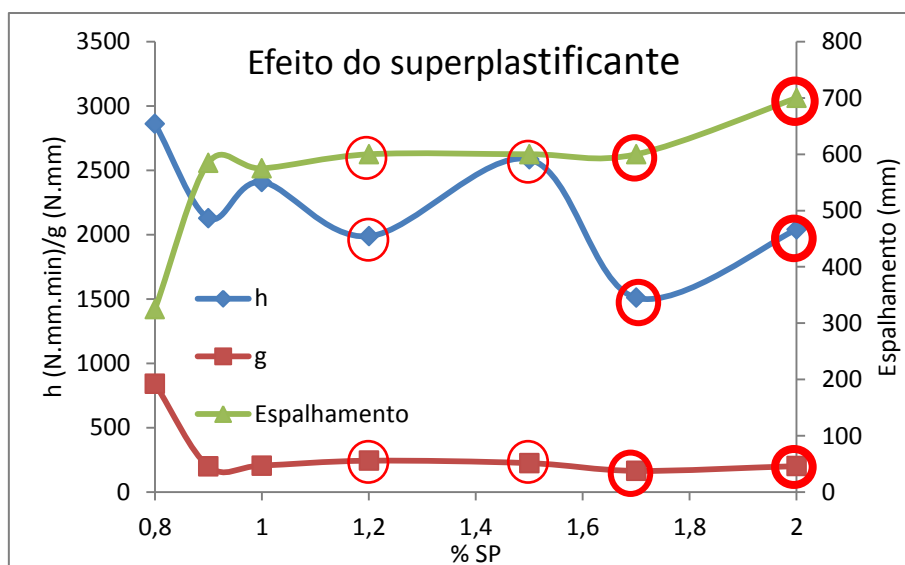


Figura 4.1- Efeito do superplastificante nas propriedades do estado fresco

A presença do superplastificante (SP) no BAC tem como finalidade aumentar a fluidez do sistema sem que seja necessário o aumento do teor em água. Ao aumentar a sua percentagem, a fluidez de mistura vai aumentando até um certo limite onde o excesso aparece sob a forma de exsudação.

Verifica-se que a viscosidade vai diminuindo apesar de algumas variações. Relativamente à tensão de cedência, esta ao diminuir até ao valor de 0,9 % de SP corrobora o comportamento do espalhamento que aumenta até esse valor de SP, o que corresponde a um aumento da fluidez do sistema. A partir do valor de 1% de SP, a tensão de cedência e espalhamento não apresentam grandes alterações, podendo-se afirmar que o aumento da quantidade em SP não acarreta benefícios para o material, provocando exsudação para baixas quantidades do mesmo. A sua utilização só é vantajosa até o seu valor ser suficiente para compensar a falta de água de amassadura, atingindo-se o espalhamento pretendido (500-600 mm).

4.1.2 Efeito do teor em água

De forma a poder ver a influência da razão água cimento (A/C), formularam-se diversas misturas com a razão A/C=0,3.

Na Tabela 4.2 e na Figura 4.2 encontram-se os parâmetros g e h e os espalhamentos obtidos para as formulações em causa.

Tabela 4.2- Efeito da razão A/C nas propriedades do estado fresco (SP= 1,0%)

Efeito de A/C (SP= 1,0%)				
Formulação	A/C	h (N.mm.min.)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
BAC_1,0SP_0,3W	0,3	33839	7063	200
BAC_1,0SP_0,4W	0,4	2410	207	575

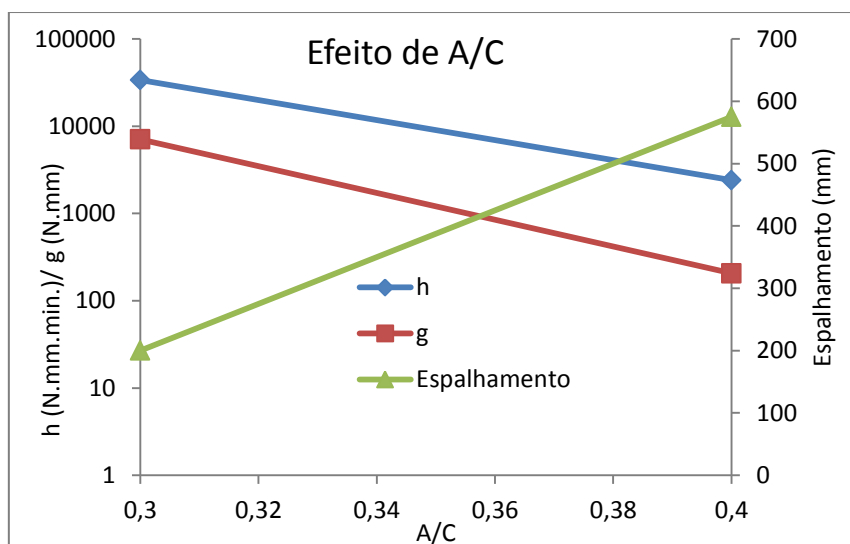


Figura 4.2- Efeito da razão A/C nas propriedades do estado fresco (SP= 1,0%)

Através da análise da Tabela 4.2 e do Gráfico 4.2, que compara os resultados de h, g e espalhamento para A/C= 0,3 e A/C= 0,4, verifica-se que à medida que se aumenta a razão A/C, o valor da viscosidade diminui, o que é expectável já que quanto mais fluida a mistura, menor será a sua viscosidade. Também a tensão de cedência diminui, pois aumentando a fluidez, existe uma maior facilidade para se vencer a resistência inicial ao movimento o que por sua vez traz um aumento do espalhamento. A escala dos parâmetros reológicos está representada sob a forma logarítmica de forma a poder abranger toda a gama de valores obtidos para a viscosidade e a tensão de cedência.

Na Tabela 4.3 e Figura 4.3, observa-se o efeito do superplastificante para as diferentes relações A/C.

Tabela 4.3- Efeito da razão A/C e do teor em SP nas propriedades do estado fresco

A/C	Formulações	% SP	h (N.mm.min)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
0,3	BAC_0,8SP_0,3W	0,8	23727	5217	200
	BAC_1,0SP_0,3W	1,0	33839	7063	200
	BAC_2,0SP_0,3W	2,0	20417	4337	200
0,4	BAC_0,8SP_0,4W	0,8	2861	842	325
	BAC_1,0SP_0,4W	1,0	2410	206,5	575
	BAC_2,0SP_0,4W	2,0	2042	202	700

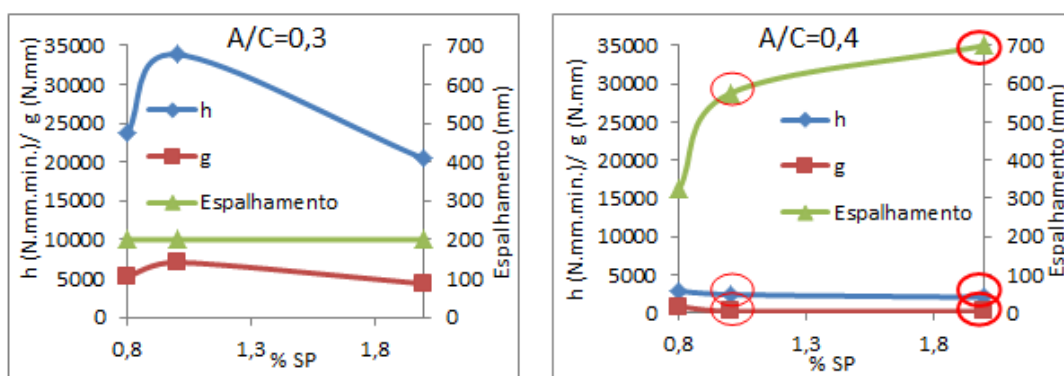


Figura 4.3- Efeito da razão A/C e do teor em SP nas propriedades do estado fresco

Mantendo a razão A/C= 0,3 e aumentando gradualmente a percentagem de SP verifica-se que tanto a viscosidade como a tensão de cedência sofrem um aumento para valores de $0.8\% \leq SP \leq 1\%$ passando a diminuir até $SP= 2,0\%$. Quando comparados estes valores com os de A/C=0,4, verifica-se que a viscosidade e a tensão de cedência são muito superiores. O mesmo é corroborado pelos diâmetros de espalhamento que se situam na ordem dos 200 mm (Figura 4.4), traduzindo-se este facto numa perda de trabalhabilidade da pasta, tendo desmoronado aquando do levantamento do cone de Abrams, estando assim longe do valor mínimo para o qual um betão é considerado autocompactável ($D \geq 500$ mm).

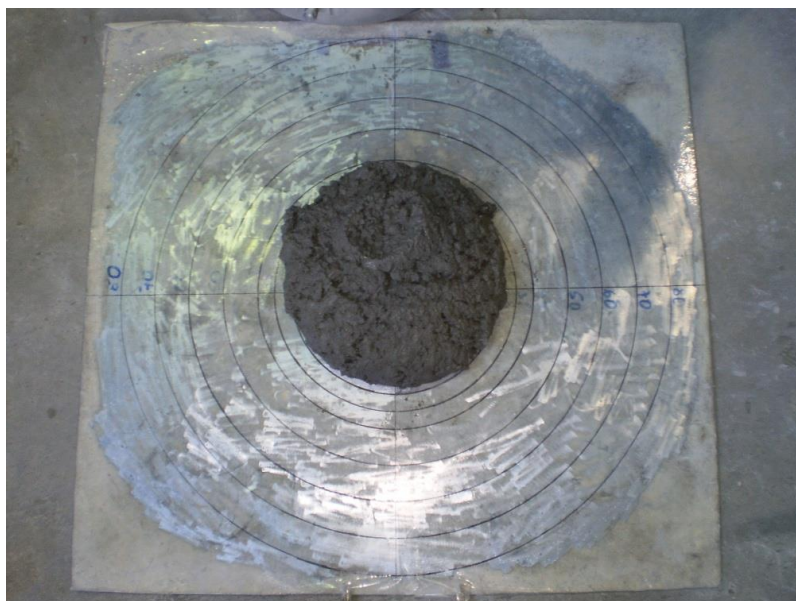


Figura 4.4- Espalhamento para A/C= 0.3

4.1.3 Efeito do teor em cimento

De forma a poder perceber a influência do teor em cimento num BAC, foi alterada a composição padrão, onde se alterou o seu teor de 450 kg/m^3 para 500 kg/m^3 . Este ajuste foi conseguido à custa da redução dos restantes elementos sólidos (brita, a areia grossa e a areia fina), de modo a que o total dos elementos sólidos perfaça os mesmos 100%.

Na Tabela 4.4 e na Figura 4.5 é possível perceber o efeito do aumento do teor em ligante para a mesma percentagem de SP.

Tabela 4.4- Efeito do teor em cimento nas propriedades do estado fresco

Teor em cimento (SP= 1,0%)				
Formulação	Teor em cimento	h (N.mm.min)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
BAC_1,0SP_450C	450	2410	207	575
BAC_1,0SP_500C	500	492	205	680

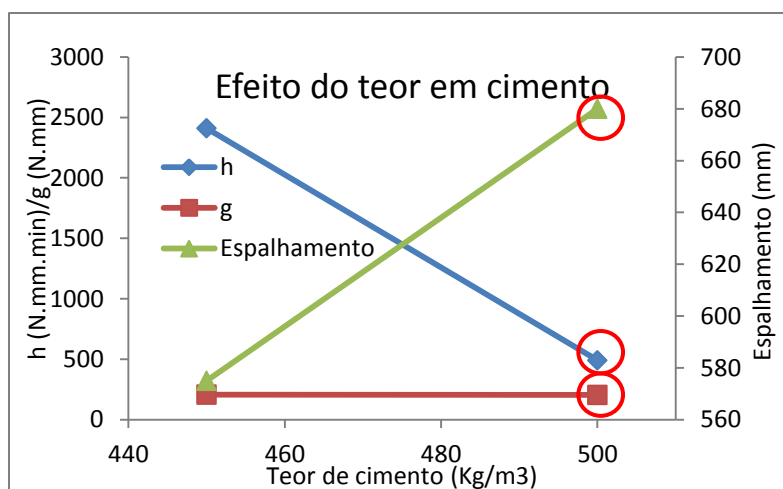


Figura 4.5- Efeito do teor em cimento nas propriedades do estado fresco

Observa-se que à medida que se aumenta o teor em cimento, a viscosidade diminui, pois o aumento do teor em material fino facilita o fluxo do material e consequentemente verifica-se um aumento do espalhamento. Relativamente à tensão de cedência, esta aparentemente não sofre alterações significativas. Contrariamente ao que seria esperado, surge exsudação para a formulação com 500 kg/m³, já que o aumento do teor em finos levaria à necessidade de uma maior quantidade de superplastificante [Barrak *et al*, 2009].

A Tabela 4.5 e a Figura 4.6 demonstram as diferenças para os teores de cimento 450 kg/m³ e 500 kg/m³.

Tabela 4.5- Efeito do teor em cimento e do teor em SP nas propriedades do estado fresco

Teor em cimento	Formulações	%SP	h (N.mm.min)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
450	BAC_1,0SP_450C	1,0	2410	207	575
	BAC_1,2SP_450C	1,2	1988	244	600
500	BAC_1,0SP_500C	1,0	789	214	670
	BAC_1,2SP_500C	1,2	492	205	680

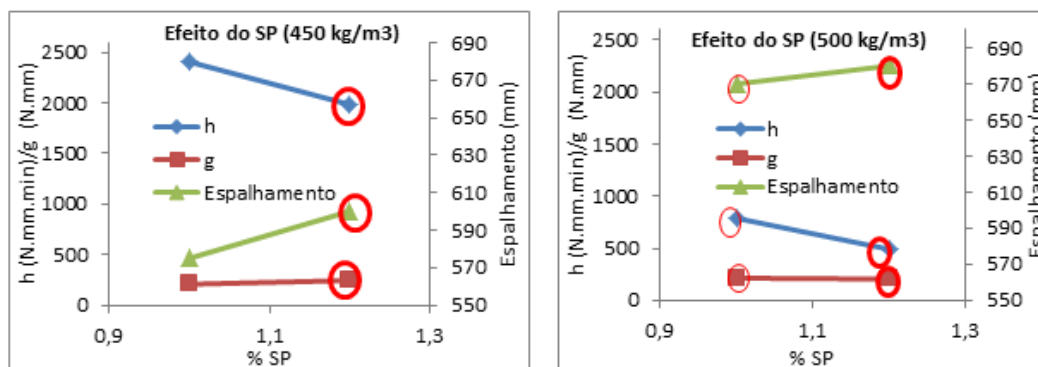


Figura 4.6- Efeito do teor em cimento e do teor em SP nas propriedades do estado fresco

Comparando as formulações de 450 kg/m³ com as de 500 kg/m³ de cimento observa-se que para os mesmos teores de SP, a tensão de cedência mantém-se constante. A viscosidade mantém o mesmo comportamento descendente, mas com a composição 450 kg/m³ a apresentar valores muito superiores pois a menor quantidade de material fino traduz-se numa maior dificuldade para a pasta fluir. O espalhamento corrobora esta tendência apresentando um menor valor para os 450 kg/m³, pois a pasta encontra-se menos fluida. Para um teor em ligante de 500 kg/m³, dá-se o fenómeno da exsudação para SP= 1,0%, aumentando gradualmente até SP= 1,2% o que poderá ser explicado pelo facto de o teor em SP ser tal que adsorvendo às partículas impede de tal forma a adsorção da água que ela acaba por ser liberta do sistema e sai sob a forma de exsudação.

4.1.4 Substituição parcial do cimento por metacaulino

Para a composição padrão foram testadas diversas formulações que tiveram como única diferença face à primeira o acrescento de adições. Foi utilizado um metacaulino (MC) nas percentagens de 10 e de 20%. Para tal, à quantidade de cimento da composição padrão foram-lhe retirados 10 e 20% e substituída essa quantidade por metacaulino.

Dentro de cada uma dessas percentagens, foi ainda alterado o valor de SP para perceber a sua influência.

Mantendo constante a percentagem de SP, variou-se a quantidade de MC (0, 10 e 20%), como é possível perceber pela análise da Tabela 4.6 e da Figura 4.7.

Tabela 4.6- Efeito do teor em MC nas propriedades do estado fresco

Influência do MC (SP= 1,0 %)				
Formulação	% MC	h (N.mm.min)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
BAC_1,0SP_0MC	0	2410	207	575
BAC_1,0SP_10MC	10	576	327	510
BAC_1,0SP_20MC	20	3154	1310	250

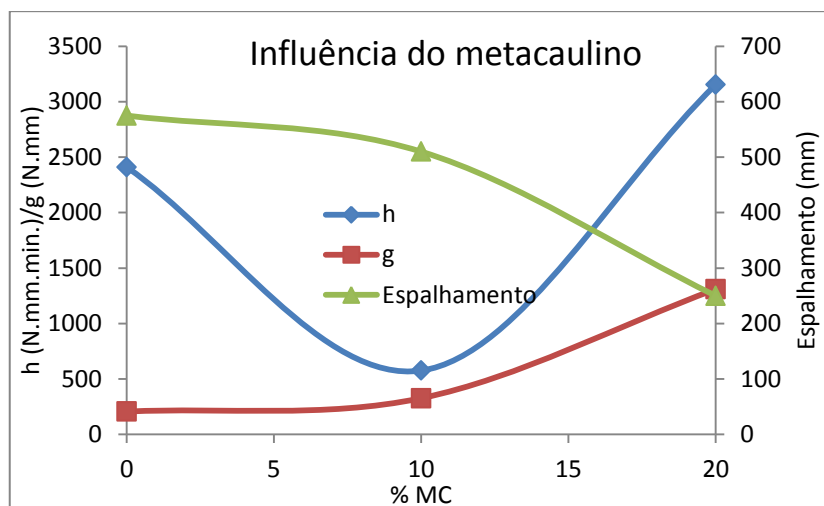


Figura 4.7- Efeito do teor em MC nas propriedades do estado fresco

Observa-se que com o aumento do teor em MC, a viscosidade tem um comportamento decrescente até 10% MC e crescente daí em diante. A tensão de cedência mantém um comportamento constante até 10% MC, momento a partir do qual o seu valor sobe até 20% MC. O espalhamento confirma este comportamento dos parâmetros reológicos até aos 10% MC pois a tensão de cedência sobe e o espalhamento desce, indicando que a mistura vai perdendo fluidez. Da mesma forma mas com mais intensidade, dos 10% MC até aos 20% MC à medida que a viscosidade sobe e a tensão de cedência sobe, o espalhamento desce, pois a formulação fica menos fluida, demonstrando que a mistura não pode ser considerada um BAC já que o espalhamento é inferior aos 500 mm, de acordo com a norma NP-EN 12350-8.

Usando o teor em SP da composição padrão do betão não se pode utilizar quantidades de metacaulino superiores a 10% pois o betão deixa de ser BAC. Para se obter o espalhamento requerido seria necessário utilizar uma maior quantidade de SP.

Veja-se na Tabela 4.7 e na Figura 4.8 o efeito do SP para formulações com 10% de MC.

Tabela 4.7- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (MC= 10%)

MC= 10%				
Formulação	%SP	h (N.mm.min)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
BAC_1,0SP_10MC	1,0	1636	550	510
BAC_1,2SP_10MC	1,2	576	327	615

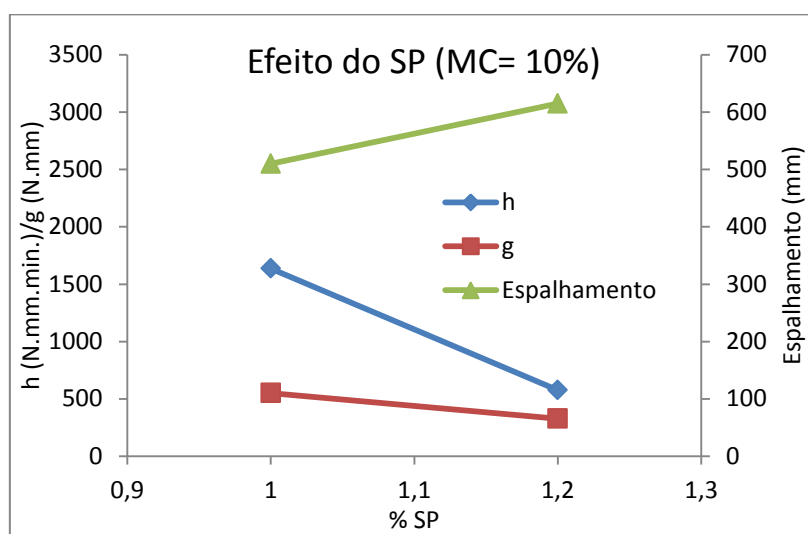


Figura 4.8- Efeito do teor em SP (MC= 10%)

Verifica-se que à medida que se aumenta a percentagem de SP os parâmetros reológicos sofrem um decréscimo, sendo mais evidente na viscosidade do que na tensão de cedência. O espalhamento ao aumentar atesta o comportamento descendente da viscosidade e da tensão de cedência. Ou seja, para MC= 10%, o aumento do teor em SP traduz-se num aumento da fluidez da pasta. Veja-se na tabela 4.8 e Figura 4.9 o efeito do SP para formulações com MC= 20%.

Tabela 4.8- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (MC= 20%)

MC= 20%				
Formulação	%SP	h (N.mm.min)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
BAC_1,0SP_20MC	1,0	3154	1310	250
BAC_1,2SP_20MC	1,2	743	340	340

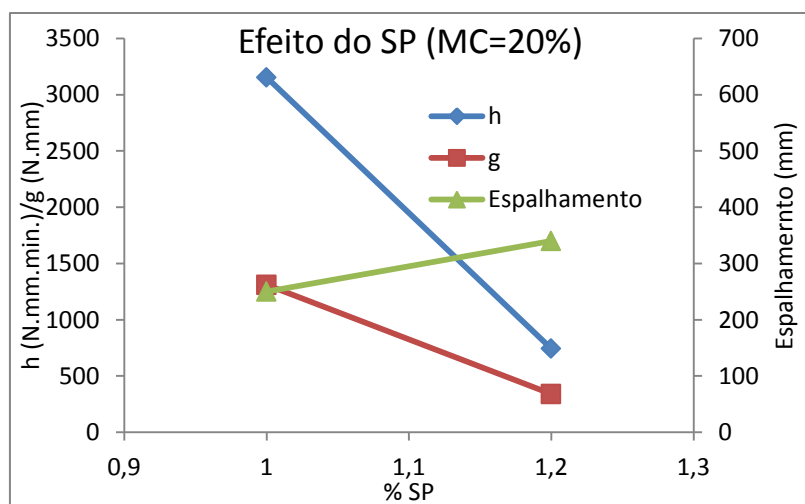


Figura 4.9- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (MC= 20%)

Também para MC= 20%, verifica-se que à medida que se aumenta a percentagem de SP, os parâmetros h e g diminuem, consequência de um aumento da fluidez o que se pode verificar pelo aumento do espalhamento. No entanto, para esta percentagem de metacaulino e apesar de o comportamento do SP ter o efeito desejado, os espalhamentos obtidos demonstram que estas formulações não podem ser consideradas um BAC devido ao reduzido diâmetro. Este efeito é devido à distribuição granulométrica mais fina do MC e à sua elevada área superficial o que promove uma grande adsorção de água na superfície das suas partículas, retirando água livre ao sistema e devido a isso provoca uma redução da trabalhabilidade.

4.1.5 Adição de filler calcário

A adição de filler (F) calcário em 1,5 e 2% do total do peso dos elementos sólidos, processa-se da mesma forma que o aumento do teor em cimento, já que foi conseguido à custa da redução dos restantes elementos sólidos como a brita, a areia grossa e a areia fina, de modo a que o total dos elementos sólidos perfaça os mesmos 100%.

Partindo da composição padrão com SP= 1,0%, foram testadas formulações com F= 0%, F= 1,5% e F= 2,0%, tendo sido avaliados os parâmetros reológicos da mistura e o respetivo espalhamento como se pode observar na Tabela 4.10 e na Figura 4.10.

Tabela 4.9- Efeito do teor em filler nas propriedades do estado fresco (SP= 1,0%)

Efeito do filler (SP= 1,0 %)				
Formulação	% Filler	h (N.mm.min)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
BAC_1,0SP_0F	0	2410	207	575
BAC_1,0SP_1,5F	1,5	1694	90	670
BAC_1,0SP_2,0F	2,0	1480	78	670

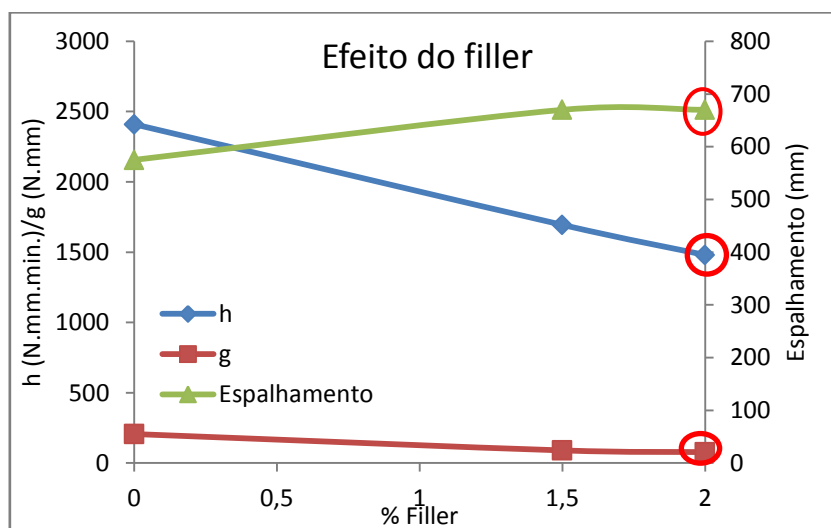


Figura 4.10- Efeito do teor em filler nas propriedades do estado fresco (SP= 1,0%)

Verifica-se que à medida que se aumenta a quantidade de filler, tanto a viscosidade como a tensão de cedência diminuem devido a um aumento de material fino que favorece o fluxo do material. Como é expectável, o espalhamento apresenta um aumento. A partir de F=1,5%, a viscosidade mantém o mesmo comportamento descendente, a tensão de cedência mantém-se constante e o espalhamento estabiliza. Observa-se o fenómeno da exsudação para F=2,0% porque o acréscimo de teor em finos não é suficiente para aumentar o teor em SP relativamente à composição padrão. Embora o filler tenha uma área superficial superior ao cimento não é suficiente para que seja necessário aumentar o teor em SP.

Veja-se na Tabela 4.11 e Figura 4.11 o efeito do aumento de SP para formulações com F=1,5%.

Tabela 4.10- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (F= 1,5 %)

F= 1,5%				
Formulação	%SP	h (N.mm.min.)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
BAC_0,8SP_1,5F	0,8	1023	183	650
BAC_1,0SP_1,5F	1,0	1694	90	670
BAC_1,2SP_1,5F	1,2	1732	171	610

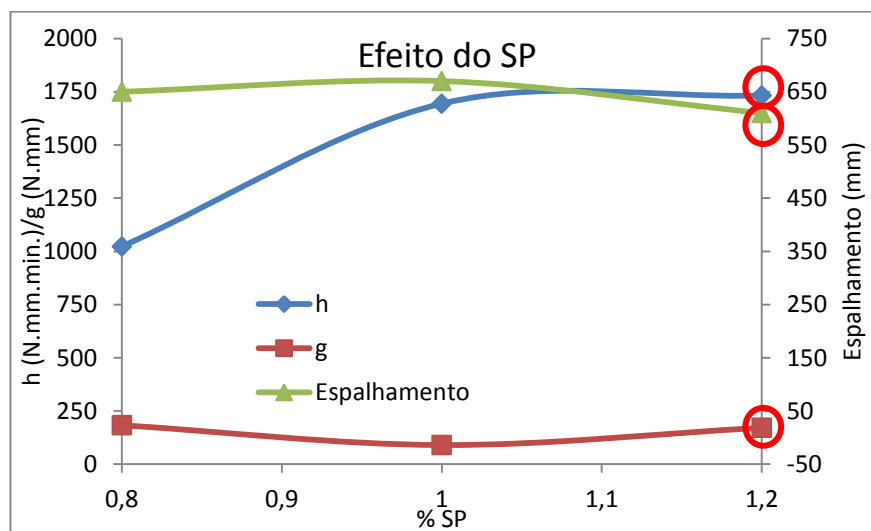


Figura 4.11- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (F= 1,5%)

Observa-se que a viscosidade comporta um aumento à medida que se aumenta o SP, enquanto que a tensão de cedência se mantém numa gama de valores praticamente constante. Verifica-se que o espalhamento praticamente não apresentou variação para as diferentes percentagens de SP, o que leva a concluir que para 1,5% de filler o adjuvante não influencia o comportamento da mistura em termos de espalhamento. Para SP=1,2% as formulações sofrem do fenómeno de exsudação porque o acréscimo do teor em finos face à composição padrão não é suficiente para aumentar o teor em SP.

Para F= 2,0%, realizaram-se diversas formulações variando a percentagem de SP como se pode ver na Tabela 4.12 e na Figura 4.12.

Tabela 4.11- Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (F= 2,0 %)

F= 2,0%				
Formulação	%SP	h (N.mm.min.)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
BAC_0,8SP_2,0F	0,8	336	243	620
BAC_1,0SP_2,0F	1,0	1480	78	670
BAC_1,2SP_2,0F	1,2	1317	207	620

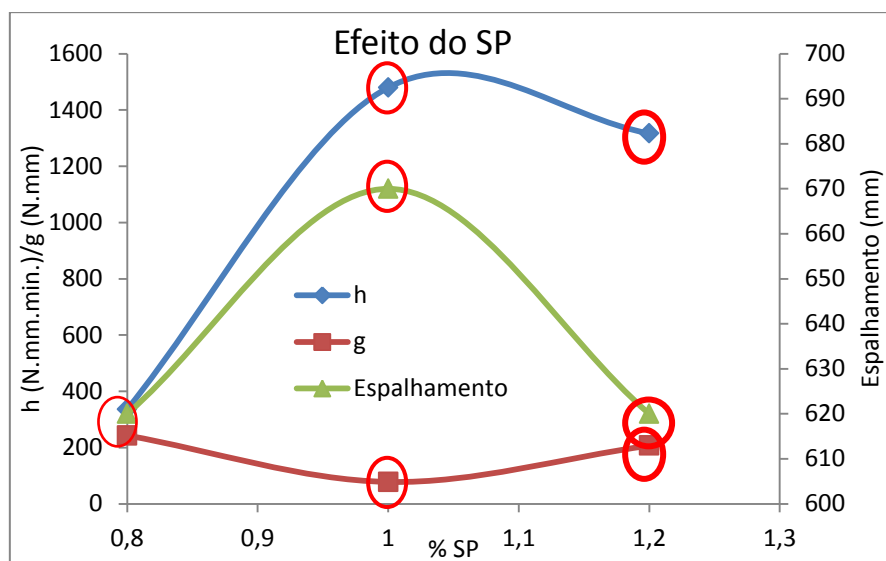


Figura 4.12-Efeito do teor em SP nas propriedades do estado fresco (F= 2,0%)

Constata-se que tanto o espalhamento como a viscosidade aumentam até SP= 1,0%, momento a partir do qual ambos os parâmetros diminuem de valor. Isto poderá ser explicado pelo facto de que a pasta segregava mesmo para SP= 0,8%, sendo cada vez mais evidente este fenómeno à medida que se aumentava a percentagem de SP. Já a tensão de cedência, adquire um comportamento inverso, diminuindo até SP= 1,0%, aumentando a partir daí.

4.1.6 Adição de metacaulino como filler

Neste conjunto de formulações, pretendeu-se perceber como se comportaria o metacaulino (MC) como uma adição. Ou seja, em vez de se substituir determinada percentagem de ligante por esta pozolana, optou-se por adicioná-la ao peso total dos sólidos, ajustando assim as quantidades dos restantes. Foram feitas adições de MC= 1,5% e MC= 2,0% de

forma a poder compará-las com as de filler calcário como é possível verificar na Tabela 4.13 e na Figura 4.13.

Tabela 4.12- Efeito do metacaulino e do filler nas propriedades do estado fresco (SP= 1,2 %)

Tipo de adição	Formulação	% Adição	h (N.mm.min)	g (N.mm)	Espalhamento (mm)
Metacaulino	BAC_1,2SP_0 MC	0	1988	244	600
	BAC_1,2SP_1,5MC	1,5	483	253	615
	BAC_1,2SP_2,0MC	2,0	379	265	600
Filler	BAC_1,2SP_0F	0	1988	244	600
	BAC_1,2SP_1,5F	1,5	1732	171	610
	BAC_1,2SP_2,0F	2,0	1317	207	620

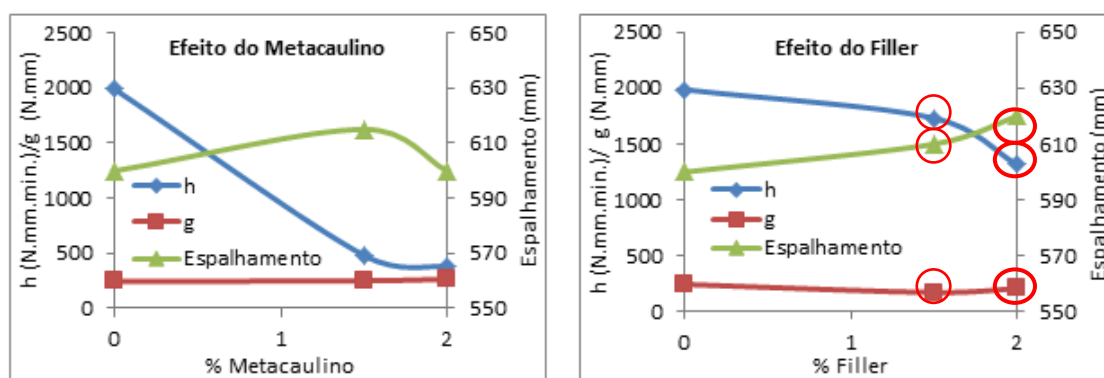


Figura 4.13- Efeito do metacaulino e do filler (SP= 1,2%) nas propriedades do estado fresco

Observa-se que com o aumento da percentagem de MC, a tensão de cedência não sofre variação significativa. O espalhamento aumenta de valor até MC= 1,5%, voltando a reduzir para MC= 2,0%, pois esta quantidade de MC já é suficiente para retirar alguma água livre ao sistema, como se pode verificar pelo ligeiro aumento da viscosidade. Quando comparado o efeito do MC com o efeito do filler, para as mesmas percentagens verifica-se que a tensão de cedência também não varia, o espalhamento aumenta continuamente até aos 2% de filler. Este facto pode ser justificado pela diferença da área superficial dos dois materiais (Tabela 4.14) Já a viscosidade sofre um decréscimo em ambos até 1,5% pelo facto de que o aumento do teor em finos ajuda o fluxo dos materiais.

4.2 Comportamento no estado endurecido

A diferença do betão autocompactável para o betão normal prende-se essencialmente com a diferença de comportamento entre os dois no estado fresco. São os parâmetros reológicos como a viscosidade e a tensão de cedência que ditam a sua maior fluidez para poder ser colocado em obra sem ser necessária a vibração.

Depois de estudada a influência no estado fresco da alteração de vários parâmetros como o efeito do superplastificante, o efeito da modificação da razão água/cimento, o efeito do teor em cimento, o efeito da substituição parcial do cimento por metacaulino e o efeito da adição de um filler calcário e de um metacaulino, é importante agora perceber o efeito das mesmas alterações no estado endurecido aos sete e aos 7 e aos 28 dias em termos de resistência mecânica, módulo de elasticidade dinâmico e durabilidade.

Para que melhor se interprete os resultados demonstrados nas tabelas e nas figuras, a presença de circunferências vermelhas em alguns pontos nas figuras indica a presença de exsudação na formulação. Quanto mais evidente for a exsudação, mais espessa é a circunferência. Além disso, a determinação das propriedades no estado endurecido foi feita através do ensaio a três cubos de dimensões $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ para cada uma das formulações. São representados nas tabelas e nas figuras seguintes os desvios padrão associados de forma a perceber em torno de que valores varia a média desses mesmos resultados.

As propriedades no estado endurecido foram avaliadas tanto aos 7 como aos 28 dias de cura, como tal os resultados serão apresentados sob a forma de tabela e de gráfico para os dois tempos de cura.

4.2.1 Efeito da introdução de superplastificante na composição base

Partindo da composição base, com uma razão $A/C=0,4$, um teor em ligante de 450 kg/m^3 e com 0,8% de superplastificante, foi-se aumentando a percentagem de superplastificante até aos 2%.

Veja-se a variação da resistência à compressão (R) e do módulo de elasticidade dinâmico (E) em função da percentagem de superplastificante para os 7 e os 28 dias de cura na Tabela 4.15 e nas Figuras 4.14 e 4.15.

Tabela 4.13- Efeito do teor em superplastificante nas propriedades mecânicas do betão

Efeito de SP para a composição padrão				
Tempo de cura	Formulação	%SP	Res. Mec. (MPa)	E (GPa)
7 dias	BAC_0,8SP	0,8	23,7±0,8	48,6±0,2
	BAC_0,9SP	0,9	25,7± 1,5	50,6±0,1
	BAC_1,0SP	1,0	33,4±4,1	53,0±0,8
	BAC_1,2SP	1,2	26,8±0,2	49,8±0,2
	BAC_1,5SP	1,5	29,4±0,2	51,4±0,2
	BAC_1,7SP	1,7	27,5±0,5	45,4±0,3
	BAC_2,0SP	2,0	24,8±1,7	43,3±0,8
28 dias	BAC_0,8SP	0,8	34,2±0,9	49,1±0,6
	BAC_0,9SP	0,9	29,1±3,0	53,3±1,7
	BAC_1,0SP	1,0	36,4±2,1	54,2±2,6
	BAC_1,2SP	1,2	29,8±0,8	50,9±0,6
	BAC_1,5SP	1,5	36,8±1,0	50,2±0,7
	BAC_1,7SP	1,7	30,9±1,3	51,4±0,8
	BAC_2,0SP	2,0	29,6±1,1	48,9±1,1

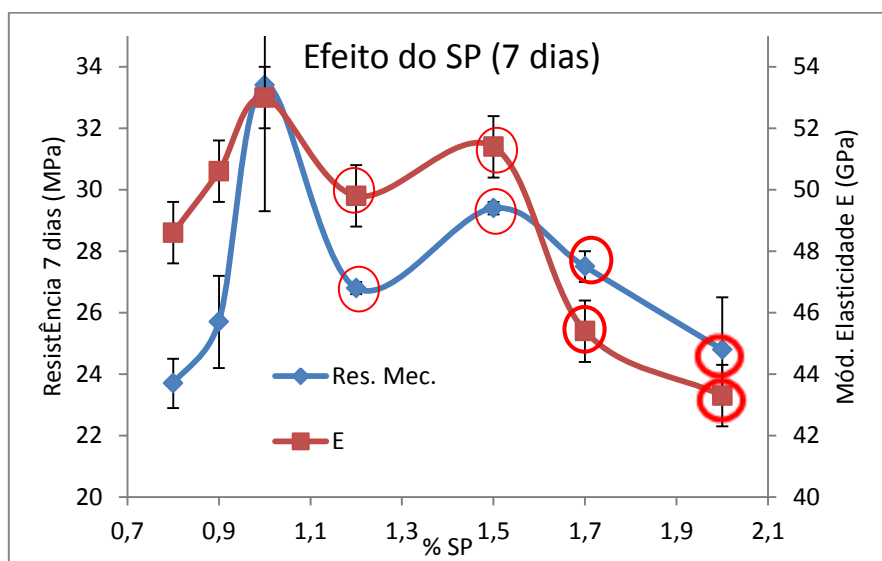


Figura 4.14- Efeito do teor em superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (7 dias)

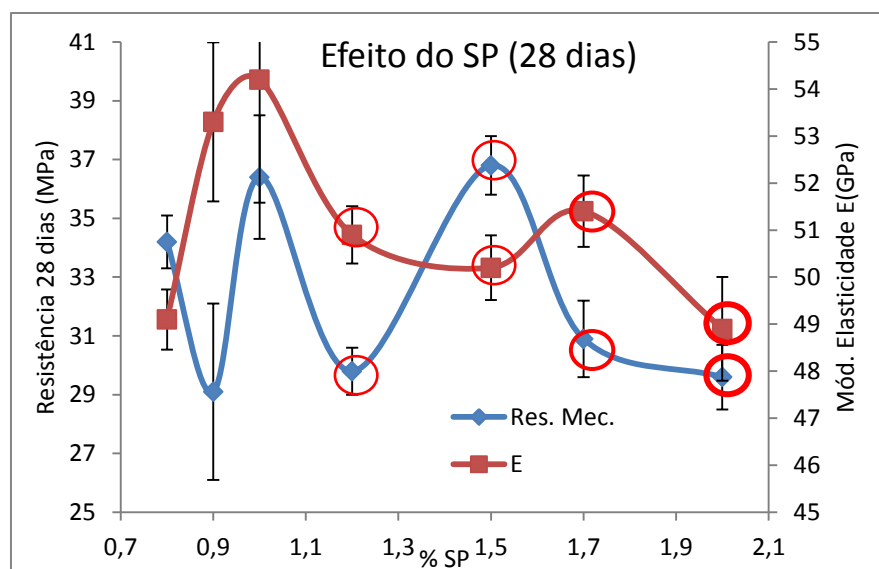


Figura 4.15- Efeito do teor em superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

Verifica-se que o aumento de SP a partir de 1%, não traz melhorias a nível de resistência mecânica nem do módulo de elasticidade pois existe uma tendência decrescente em ambos que pode ser justificada pelo aparecimento de exsudação para os teores de SP superiores a 1%. De acordo com Johnson [2010] o aparecimento de exsudação anterior à presa da pasta pode levar à variação da resistência do BAC [Johnson D *et al*, 2010]. Constata-se que o comportamento se mantém constante dos 7 para os 28 dias. Apenas se verifica um aumento da resistência mecânica e do módulo de elasticidade devido ao aumento do tempo de cura.

4.2.2 Efeito do teor em água

De forma a poder ver o efeito da razão água cimento (A/C), formularam-se diversas misturas com a razão A/C= 0,3.

Na Tabela 4.16 e nas Figuras 4.16 e 4.17 encontram-se os resultados obtidos para as formulações em causa aos 7 e aos 28 dias de cura.

Tabela 4.14- Efeito da razão A/C nas propriedades mecânicas do betão (SP=1,0%)

Efeito de A/C (SP=1,0%)				
Tempo de cura	Formulação	A/C	Res. Mec. (MPa)	E (GPa)
7 dias	BAC_1,0SP_0,3W	0,3	32,1±0,6	53,8±1,4
	BAC_1,0SP_0,4W	0,4	33,4±4,1	53,0±2,0
28 dias	BAC_1,0SP_0,3W	0,3	41,4±1,4	55,0±0,5
	BAC_1,0SP_0,4W	0,4	36,4±2,1	54,2±2,6

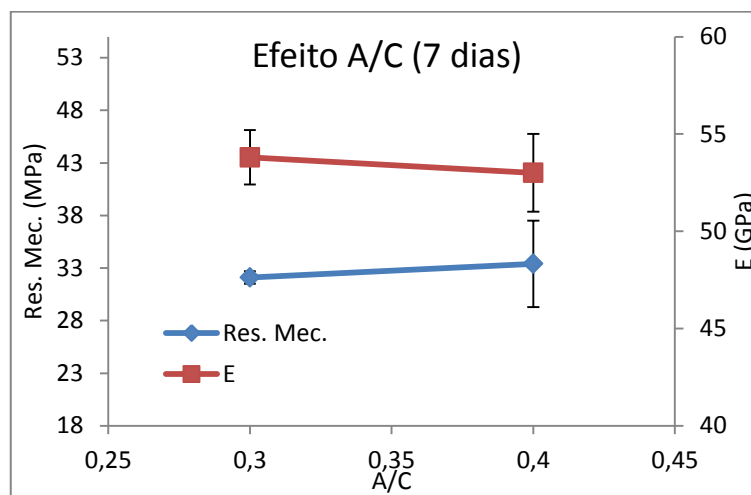


Figura 4.16- Efeito da razão A/C nas propriedades mecânicas do betão (7 dias)

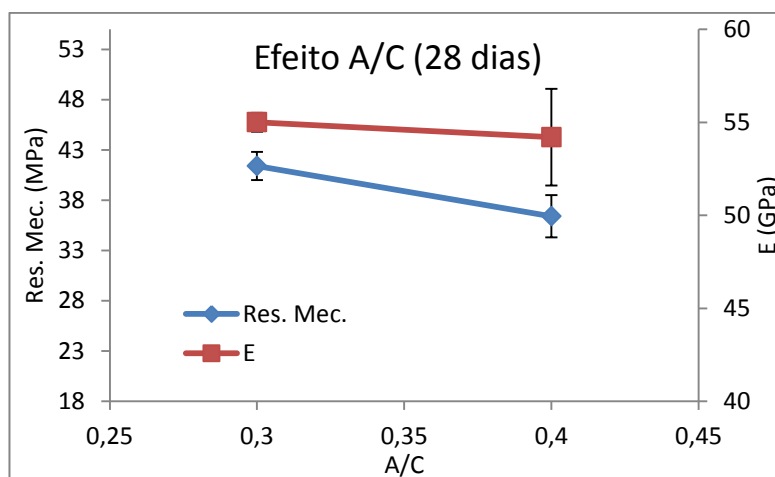


Figura 4.17- Efeito da razão A/C nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

Aos 28 dias verifica-se um aumento da resistência mecânica e do módulo de elasticidade devido ao maior tempo de cura. Da mesma forma que aos 7 dias, a razão A/C não tem influências nas propriedades no estado endurecido.

Na Tabela 4.17 e na Figura 4.18 veja-se o efeito da variação de SP para as composições com A/C= 0,3 e A/C= 0,4.

Tabela 4.15- Efeito da razão A/C e do teor em SP nas propriedades mecânicas do betão

A/C	Formulação	% SP	Res. Mec. (MPa)	E (GPa)
0,3	BAC_0,8SP_0,3W	0,8	36,6±2,4	55,4±1,1
	BAC_1,0SP_0,3W	1,0	41,4±1,4	55,0±0,5
	BAC_2,0SP_0,3W	2,0	50,5±5,2	57,7±0,5
0,4	BAC_0,8SP_0,4W	0,8	34,2±0,9	49,1±0,6
	BAC_1,0SP_0,4W	1,0	36,4±2,1	54,2±2,6
	BAC_2,0SP_0,4W	2,0	29,6±1,1	48,9±1,1

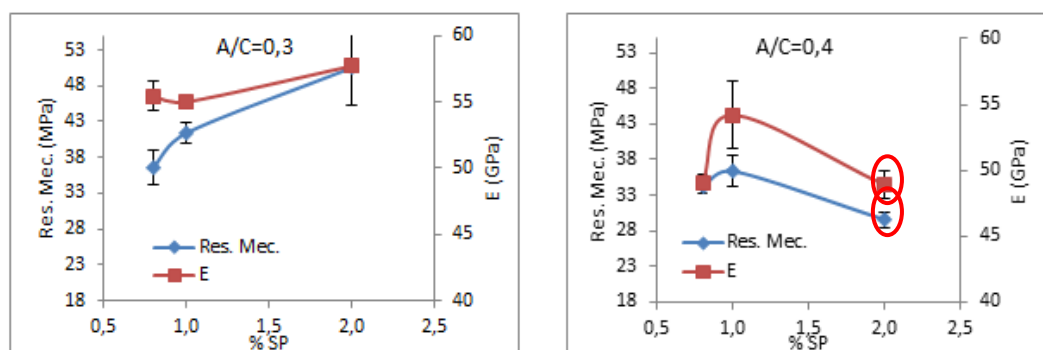


Figura 4.18- Efeito da razão A/C e do teor em SP nas propriedades mecânicas do betão

Para A/C= 0,3, a resistência mecânica aumenta conforme se aumenta o teor de SP, pois a formulação era muito pouco trabalhável e o aumento de SP provocou um aumento da água livre, permitindo assim uma melhor compactação do sistema. Para A/C= 0,4, como SP=1.0% é o adequado para esta composição, aumentando a sua percentagem verifica-se o fenómeno de exsudação, de onde resulta o decréscimo da resistência mecânica e do módulo de elasticidade dinâmico.

4.2.3 Efeito do teor em cimento

De forma a poder ver o efeito do teor em cimento, formularam-se diversas misturas com teores de 450 e 500 kg/m³. Na Tabela 4.18 e nas Figuras 4.19 e 4.20 é possível perceber o efeito do aumento do teor em ligante para a mesma percentagem de SP.

Tabela 4.16- Efeito do teor em cimento nas propriedades mecânicas do betão(SP= 1,0%)

Teor em cimento (SP= 1,0%)				
Tempo de cura	Formulação	T. cimento (Kg/m ³)	Res. Mec. (MPa)	E (GPa)
7 dias	BAC_1,0SP_450C	450,0	33,4±4,1	53,0±2,0
	BAC_1,0SP_500C	500,0	33,4±0,9	51,1±0,5
28 dias	BAC_1,0SP_450C	450,0	36,4±2,1	54,2±2,6
	BAC_1,0SP_500C	500,0	35,0±2,0	53,2±0,7

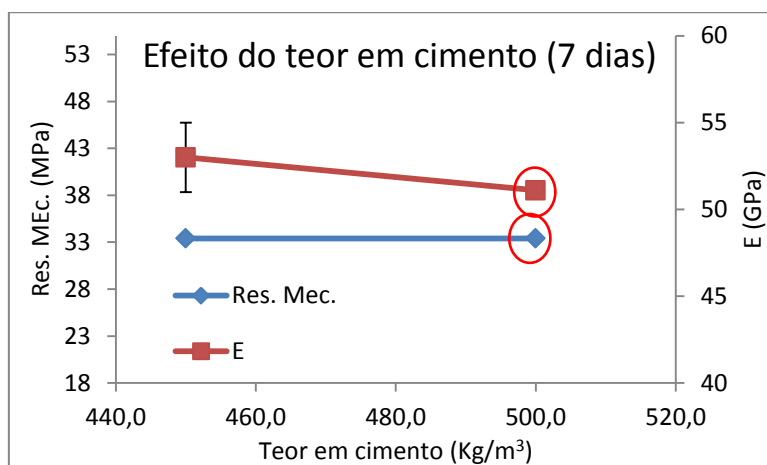


Figura 4.19- Efeito do teor em cimento nas propriedades mecânicas do betão (7 dias)

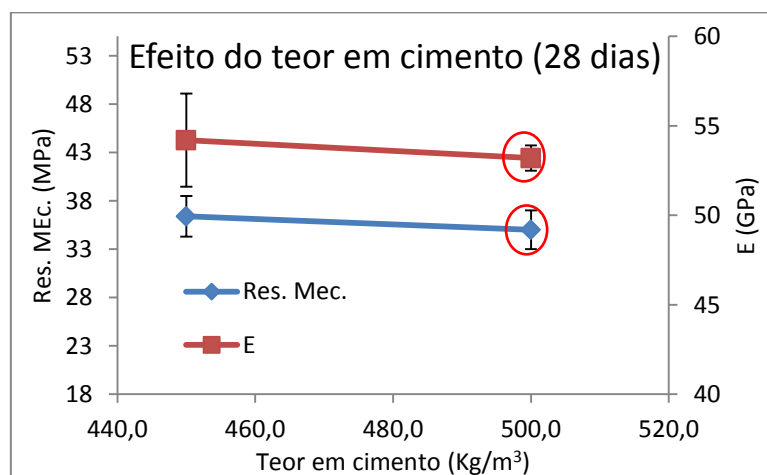


Figura 4.20- Efeito do teor em cimento nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

Constata-se que o aumento do teor em cimento não traz melhorias a nível das propriedades mecânicas. Este efeito pode ser justificado pelo facto de nas composições com 500kg/m³ haver indícios de exsudação.

Na Tabela 4.19 e na Figura 4.21 veja-se o efeito da variação de SP para as composições com 450 e 500 kg/m³.

Tabela 4.17-Efeito do teor em cimento e em superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

T. cimento	Formulação	% SP	Res. Mec. (MPa)	E (GPa)
450	BAC_1,0SP_450C	1,0	33,4±4,1	53,0±2,0
	BAC_1,2SP_450C	1,2	26,8±0,2	49,8±0,1
500	BAC_1,0SP_500C	1,0	33,4±0,9	51,1±0,5
	BAC_1,2SP_500C	1,2	31,5±3,2	51,2±1,0

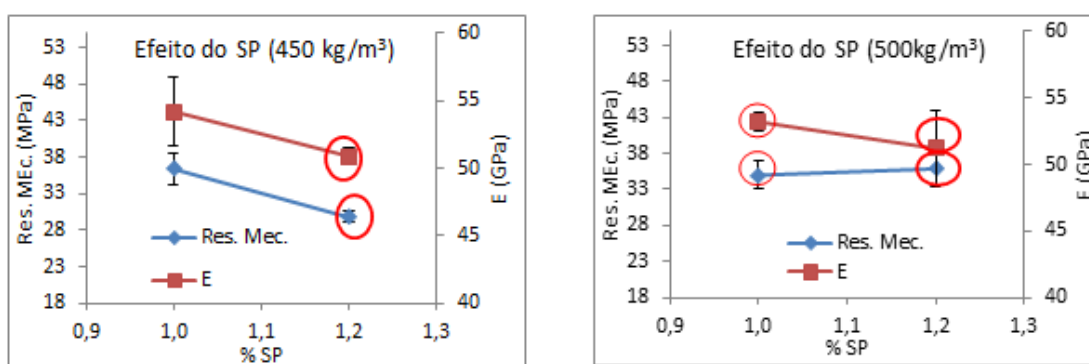


Figura 4.21- Efeito do teor em cimento e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

Verifica-se que o aumento da percentagem em SP para um teor em cimento de 450 kg/m³ não traz vantagens ao sistema pois a resistência mecânica e o módulo de elasticidade não sofrem melhorias devido à existência de exsudação. A exsudação presente para SP= 1,2% conduz a um ligeiro decréscimo na resistência mecânica. Para a formulação com 500kg/m³ de betão, verifica-se uma diminuição dos valores da resistência mecânica e do módulo de elasticidade relativamente à composição com 450 kg/m³, pois o fenómeno de exsudação surge mais cedo sendo tanto maior quanto maior o teor em SP.

4.2.4 Substituição parcial do cimento por metacaulino

Mantendo constante a percentagem de SP, variou-se a quantidade de MC (0, 10 e 20%), como é possível perceber pela análise da Tabela 4.20 e das Figuras 4.22 e 4.23.

Tabela 4.18- Efeito do teor em metacaulino nas propriedades mecânicas do betão

Tempo de cura	Formulação	% MC	Res. Mec.	E
7 dias	BAC_0,8SP_0MC	0	23,7±0,8	48,6±0,2
	BAC_1,0SP_10MC	10,0	34,0±0,9	52,5±0,3
	BAC_1,0SP_20MC	20,0	36,2±0,3	48,9±1,0
28 dias	BAC_0,8SP_0MC	0	34,2±0,9	49,1±0,6
	BAC_1,0SP_10MC	10,0	44,4±2,4	54,3±1,0
	BAC_1,0SP_20MC	20,0	43,3±2,9	50,2±0,5

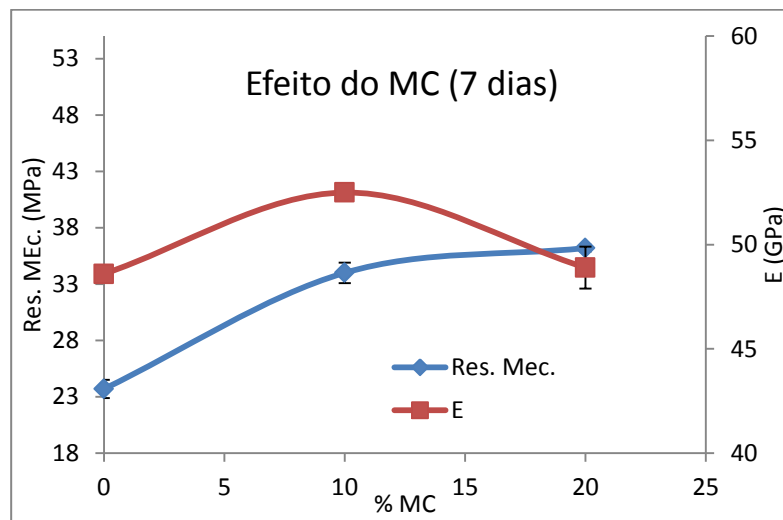


Figura 4.22- Efeito do teor em metacaulino nas propriedades mecânicas do betão (7 dias)

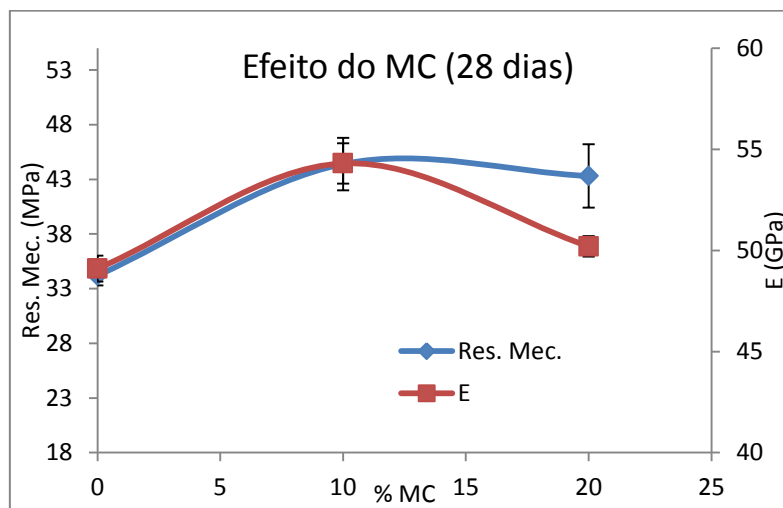


Figura 4.23- Efeito do teor em metacaulino nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

Para SP= 1,0%, verifica-se que a resistência mecânica sobe conforme se aumenta a percentagem de MC até MC= 10,0%, o mesmo acontecendo para o módulo de elasticidade, devido à reacção pozolânica.

Na Tabela 4.21 e Figura 4.24 veja-se o efeito da variação de SP para as composições com 10% e 20% de MC.

Tabela 4.19-Efeito do teor em metacaulino e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

% MC	Formulação	% SP	Res. Mec.	± Res. Mec.	E	± E
10%	BAC_1,0SP_10MC	1,0	44,4	2,4	54,3	1,04
	BAC_1,2SP_10MC	1,2	43,8	1,8	55,3	0,24
20%	BAC_1,0SP_20MC	1,0	43,3	2,9	50,2	0,5
	BAC_1,2SP_20MC	1,2	47,7	2,4	55,2	2,6

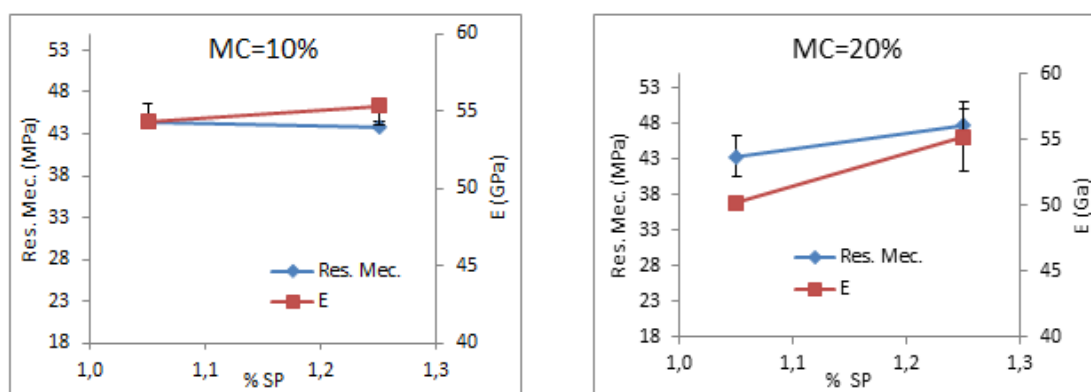


Figura 4.24- Efeito do teor em metacaulino e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

Para MC= 10% o teor em SP não tem influência no sistema já que a resistência mecânica e o módulo de elasticidade não sofrem variações significativas. Pode-se concluir que não é necessário utilizar teores em SP superiores a 1%.

Também para MC= 20%, as propriedades mecânicas não sofrem alterações com o aumento do teor em SP. Aquando no estado fresco foi verificado que esta formulação não obteve um espalhamento suficiente para ser considerado um BAC. Este facto que indica a falta de fluidez da pasta, pode prejudicar a compactação do material dentro dos moldes (o que poderia ser corrigido com vibração) e assim causar um decréscimo na resistência mecânica.

4.2.5 Adição de filler calcário

Partindo da composição padrão com SP= 1.0% e mantendo este valor foram testadas formulações com F= 0%, F= 1,5% e F= 2.0%, tendo sido avaliados as propriedades mecânicas dos sistemas como se pode observar na Tabela 4.22 e nas Figuras 4.25 e 4.26.

Tabela 4.20- Efeito do filler nas propriedades mecânicas do betão (SP= 1,0%)

Adição de filler (SP= 1,0%)				
Tempo de cura	Formulação	% filler	Res. Mec. (MPa)	E (GPa)
7 dias	BAC_1,0SP_0F	0	33,4±4,1	53,0±0,8
	BAC_1,0SP_1,5F	1,5	28,7±1,5	50,7±0,2
	BAC_1,0SP_2,0F	2,0	30,8±2,1	51,7±0,6
28 dias	BAC_1,0SP_0F	0	36,4±2,1	54,2±2,6
	BAC_1,0SP_1,5F	1,5	32,3±0,7	50,2±1,6
	BAC_1,0SP_2,0F	2,0	33,7±0,8	51,0±0,4

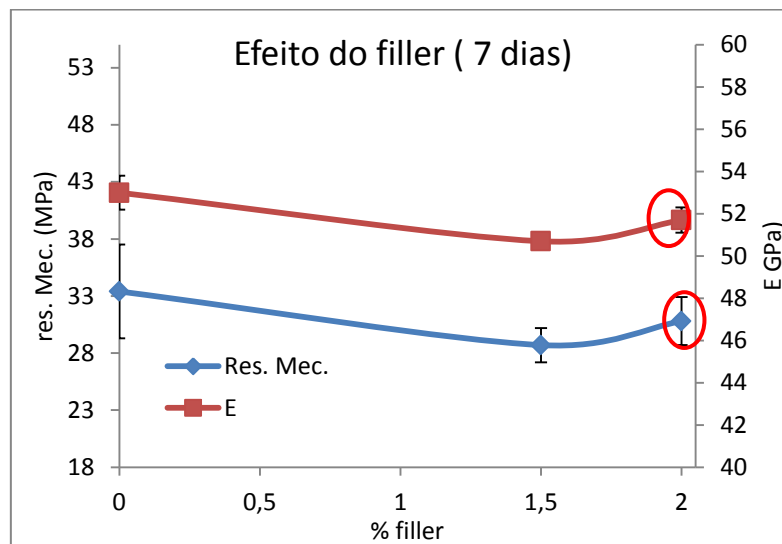


Figura 4.25- Efeito do filler nas propriedades mecânicas do betão (7 dias)

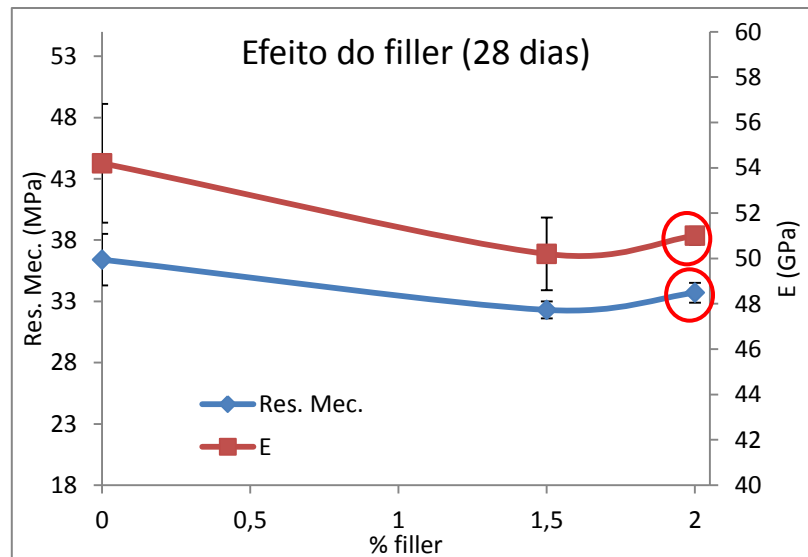


Figura 4.26- Efeito do filler (28 dias)

Constata-se que o aumento da percentagem do filler não traz melhorias em termos de propriedades mecânicas para o BAC. O aparecimento de exsudação poderá explicar a redução de resistência mecânica e módulo de elasticidade a partir de SP= 1,0%. Verifica-se que o filler não tem o efeito desejado. Como esperado, a evolução do comportamento durante a cura é semelhante tanto para os 7 como para os 28 dias.

Veja-se a variação de SP para F= 1,5% e F= 2,0% na Tabela 4.23 e na Figura 4.27.

Tabela 4.21- Efeito do teor em filler e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

% Filler	Formulação	% SP	Res. Mec.	E
F=1,5%	BAC_0,8SP_1,5F	0,8	33,9±2,9	53,0±0,3
	BAC_1,0SP_1,5F	1,0	32,3±0,7	50,2±1,6
	BAC_1,2SP_1,5F	1,2	30,7±1,8	49,8±1,7
F=2,0%	BAC_0,8SP_2,0F	0,8	33,1±4,4	52,3±0,7
	BAC_1,0SP_2,0F	1,0	33,7±0,8	51,0±0,4
	BAC_1,2SP_2,0F	1,2	24±0,5	45,3±0,8

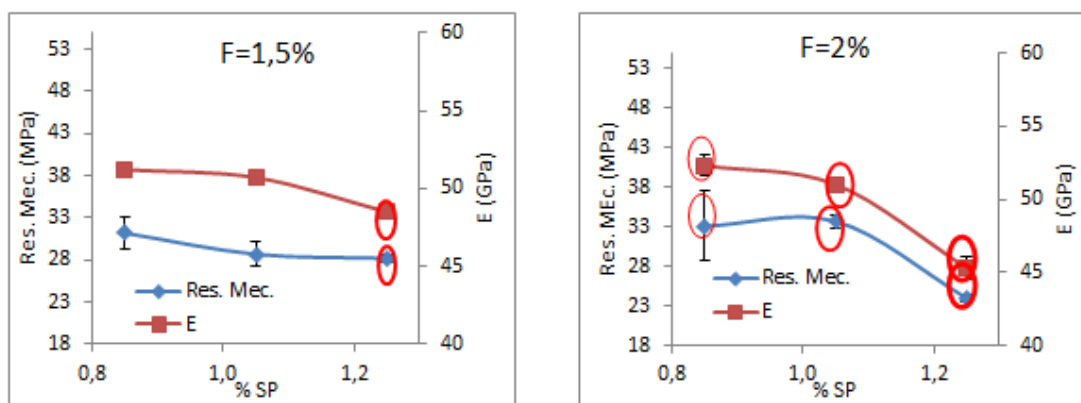


Figura 4.27- Efeito do teor em filler e superplastificante nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

Para F= 1,5% verifica-se que há uma diminuição de valores em termos das propriedades mecânicas conforme se aumenta a percentagem de SP. Existe este decréscimo de resistência mecânica e do módulo de elasticidade pois à medida que a quantidade de SP aumenta existe no limite a formação de exsudação e quando esta está presente, afecta as propriedades no estado endurecido.

Nas formulações com F= 2,0% verifica-se que há uma diminuição da resistência e do módulo de elasticidade, o que já acontecia para F= 1,5%. Acontece que neste caso as formulações sofrem do fenómeno de exsudação mais cedo, para SP= 0,8%. É por esta razão que ocorre a diminuição das propriedades mecânicas logo a partir dessa percentagem de adjuvante.

4.2.6 Adição de metacaulino como filler

Na Tabela 4.24 e na Figura 4.28, encontra-se a comparação de valores das propriedades mecânicas para as formulações com adições de filler e de metacaulino nas percentagens de 0, 1,5 e 2%.

Tabela 4.22- Efeito do metacaulino e do filler nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

Tipo de adição	Formulação	% Adição	Res. Mec.	E
Filler	BAC_1,2SP_0F	0,0	26,8±0,2	49,8±0,2
	BAC_1,2SP_1,5F	1,5	28,2±0,4	48,5±0,2
	BAC_1,2SP_2,0F	2,0	19,9±1,5	43,9±0,1
MC	BAC_1,2SP_0MC	0,0	26,8±0,2	49,8±0,2
	BAC_1,2SP_1,5MC	1,5	33,5±2,8	53,8±1,1
	BAC_1,2SP_2,0MC	2	37,8±0,1	54,5±1,0

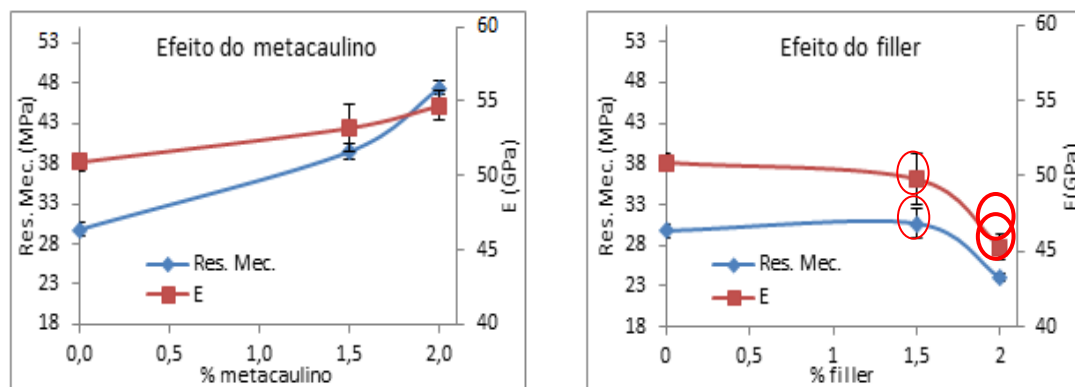


Figura 4.28- Efeito do metacaulino e do filler nas propriedades mecânicas do betão (28 dias)

Como foi visto anteriormente, o aumento da percentagem de filler calcário traz um decréscimo nas propriedades mecânicas devido à formação de exsudação no sistema, manifestando-se este decréscimo com mais intensidade a partir de $F= 1,5\%$, pois verifica-se uma diminuição da trabalhabilidade dos materiais, o que implica uma má compactação dentro dos moldes.

Com a adição de metacaulino há um aumento da resistência mecânica e do módulo de elasticidade dinâmico. O facto de haver exsudação para $MC= 0\%$ e depois deixar de existir para as formulações com $MC= 1,5$ e $MC= 2,0\%$ acontece porque a percentagem de SP para $MC=0\%$ é excessiva e aumentando a quantidade de pozolanas aumenta-se também a quantidade de finos no sistema, o que requer uma maior percentagem de SP.

O facto de haver exsudação para $MC= 0\%$ deve-se ao facto de esta composição não ter o teor em SP adequado (1%), mas sim superior ($1,2\%$). A introdução de um material muito fino, com elevada área superficial, como o MC, implica uma diminuição da água livre do sistema e essa é a razão para a qual as outras composições não apresentam exsudação.

4.2.7 Durabilidade

Os efeitos causados pelas variações dos constituintes na durabilidade de betões foram avaliados através do ensaio de penetração de cloretos.

Efeito do superplastificante

Veja-se a profundidade de penetração de cloretos em função do teor de superplastificante na Tabela 4.25 e nas Figuras 4.29 e 4.30.

Tabela 4.23- Efeito do teor em superplastificante

Formulação	Penetração (cm)
BAC_0,8SP	1,62
BAC_0,9SP	1,51
BAC_1,0SP	1,27
BAC_1,2SP	1,56
BAC_1,5SP	1,66
BAC_1,7SP	1,85
BAC_2,0SP	1,72

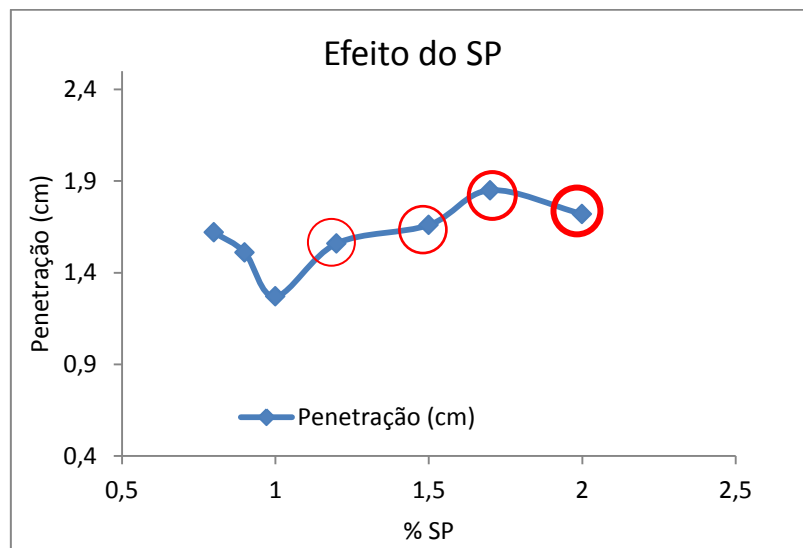


Figura 4.29- Efeito do teor em SP



Figura 4.30- Efeito teor em superplastificante na durabilidade

A Figura 4.30 ilustra os dois provetes com menor e maior profundidade de penetração dos cloretos, que não correspondem à menor e maior quantidade de superplastificante.

O mínimo de profundidade de penetração é atingido para o valor de superplastificante ideal utilizado na composição base. A partir deste valor, a profundidade de penetração aumenta com o incremento do teor em SP. Este facto pode ser explicado pelo aparecimento de exsudação a partir de SP= 1,2%.

Efeito do teor em água

Veja-se a profundidade de penetração dos cloretos em função da razão A/C na Tabela 4.26 e nas Figuras 4.31 e 4.32.

Tabela 4.24- Efeito da razão A/C na durabilidade

Formulação	Razão A/C	Penetração (cm)
BAC_1,0SP_0,3W	0,3	1,30±0,11
BAC_1,0SP_0,4W	0,4	1,27±0,23

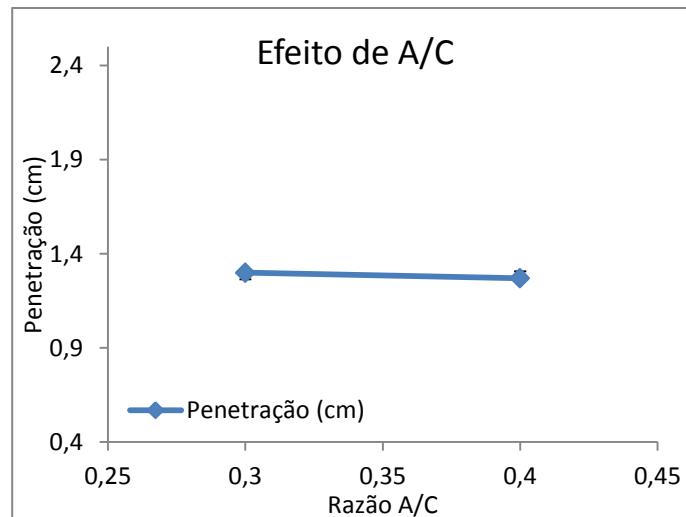


Figura 4.31- Efeito da razão A/C na durabilidade



Figura 4.32- Efeito da razão A/C na durabilidade

Verifica-se que a variação da razão A/C não traz efeitos visíveis em termos de penetração de cloretos para a composição padrão.

Efeito do teor em cimento

Veja-se a profundidade de penetração dos cloretos em função do teor em cimento na Tabela 4.27 e nas Figuras 4.33 e 4.34.

Tabela 4.25- Efeito do teor em cimento na durabilidade

Formulação	T. cimento	Penetração (cm)
BAC_1,0SP_450C	450	1,56±0,25
BAC_1,0SP_500C	500	2,25±0,36

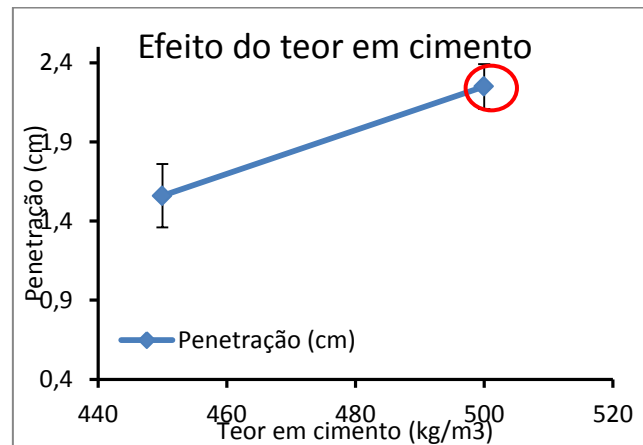


Figura 4.33- Efeito do teor em cimento na durabilidade



Figura 4.34- Efeito do teor em cimento na durabilidade

À medida que se aumenta o teor em cimento, há um aumento da profundidade de penetração, contrariamente ao que seria esperado já que são os produtos da reacção de hidratação que se ligam aos iões cloreto, impedindo-os de difundir para o interior do provete. Segundo Aydin *et al* [2006], o aumento do teor em cimento reduz ligeiramente a

profundidade de penetração de cloretos. No entanto, o aparecimento de exsudação é o único motivo que poderá explicar o aumento da profundidade de penetração devido a uma má compactação no sistema, facilitando assim a difusão dos cloretos para o interior do provete.

Substituição parcial do cimento por metacaulino

Veja-se a profundidade de penetração dos cloretos em função da substituição parcial do cimento por metacaulino (MC) na Tabela 4.28 e nas Figuras 4.35 e 4.36.

Tabela 4.26- Efeito do MC na durabilidade

Formulação	% MC	Penetração (cm)
BAC_1,0SP_0MC	0	1,27±0,25
BAC_1,0SP_10MC	10	0,78±0,13
BAC_1,0SP_20MC	20	0,41±0,19

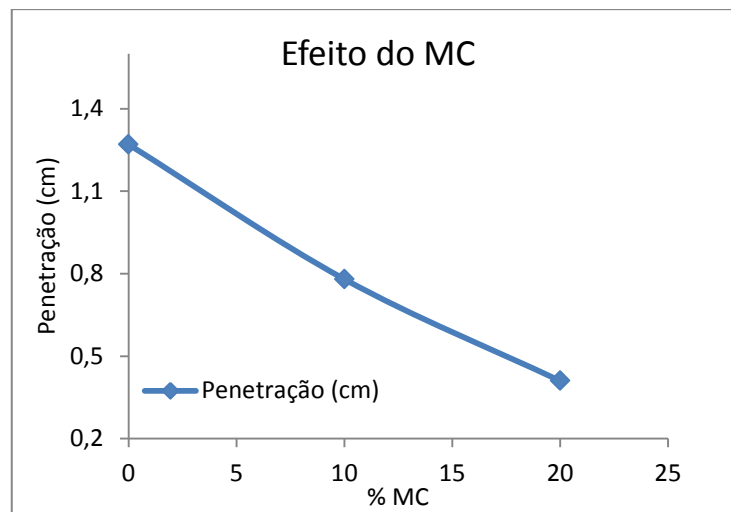


Figura 4.35- Efeito do MC na durabilidade

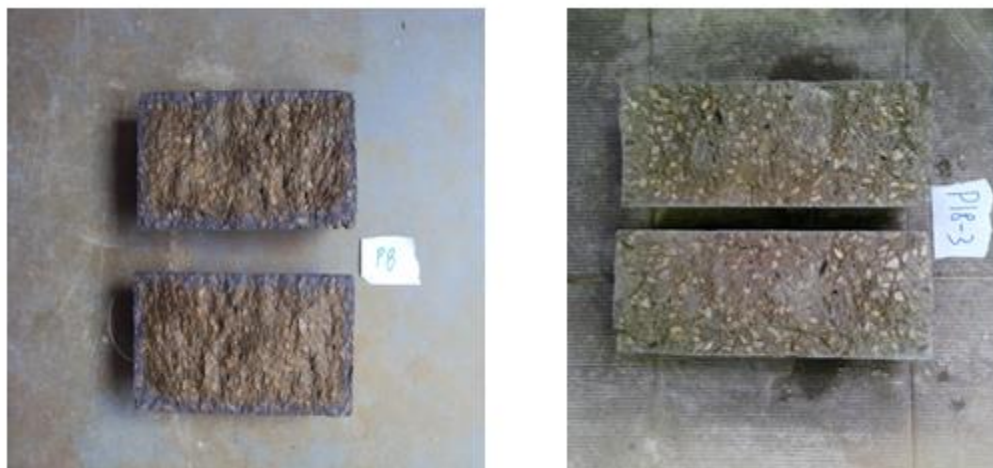


Figura 4.36- Efeito do MC na durabilidade

Observa-se que à medida que se aumenta o teor em metacaulino a profundidade de penetração de cloretos diminui. Isto acontece pois a substituição parcial do cimento por pozolanas (cinzas e metacaulino), implica a formação adicional de produtos hidratados aumentando a capacidade de ligação com os iões cloreto relativamente aos betões produzidos apenas com cimento. Bai et Martin-Perez [2005], afirmam também que o sistema de poros torna-se mais fino e segmentado, dificultando a difusão dos cloretos, devido ao aumento da capacidade de ligação da matriz cimentícia e à formação de produtos da reacção pozolânica no interior dos espaços capilares [Bai et al 2003, Martin-Perez et al 2005].

Adição de filler calcário

Veja-se a profundidade de penetração dos cloretos em função da adição de filler calcário na Tabela 4.29 e nas Figuras 4.37 e 4.38.

Tabela 4.27- Efeito do filler na durabilidade

Formulação	% Filler	Penetração (cm)
BAC_1,0SP_0F	0	1,27±0,25
BAC_1,0SP_1,5F	1,5	1,64±0,17
BAC_1,0SP_2,0F	2,0	2,46±0,11

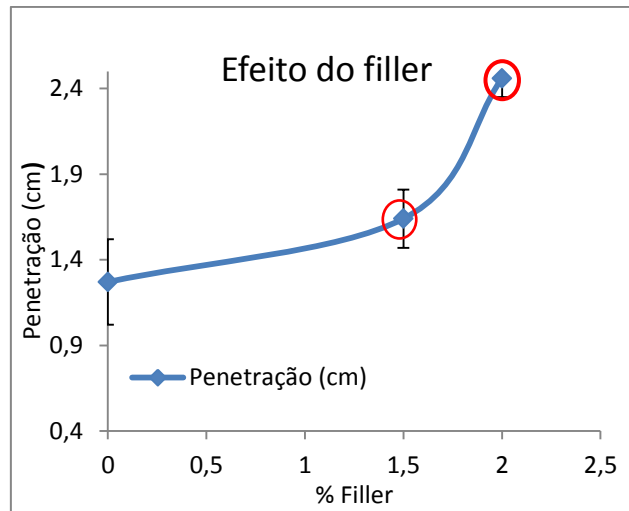


Figura 4.37- Efeito do filler na durabilidade

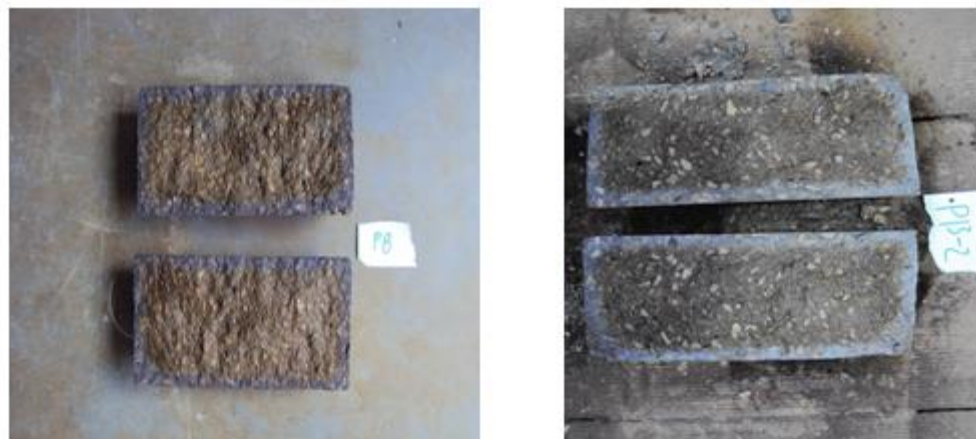


Figura 4.38- Efeito do filler na durabilidade

Verifica-se que a adição de filler calcário revelou-se prejudicial em termos de durabilidade já que com o seu aumento, a profundidade de penetração aumentou. Isto pode-se dever ao facto do aparecimento de exsudação para $F= 2,0\%$. A presença de exsudação no estado fresco aquando da composição desta formulação, provocou uma má compactação no sistema, facilitando assim a difusão dos cloretos para o interior do provete.

Adição de metacaulino como filler

Veja-se a profundidade de penetração dos cloretos em função da adição de filler calcário na Tabela 4.30 e nas Figuras 4.39 e 4.40.

Tabela 4.28- Efeito do metacaulino e do filler na durabilidade

Tipo de adição	Formulação	% Adição	Penetração (cm)
Metacaulino	BAC_1,2SP_0MC	0	1,56±0,49
	BAC_1,2SP_1,5MC	1,5	0,91±0,12
	BAC_1,2SP_2,0MC	2,0	0,79±0,11
Filler	BAC_1,2SP_0F	0	1,56±0,49
	BAC_1,2SP_1,5F	1,5	1,55±0,44
	BAC_1,2SP_2,0F	2,0	2,24±0,47

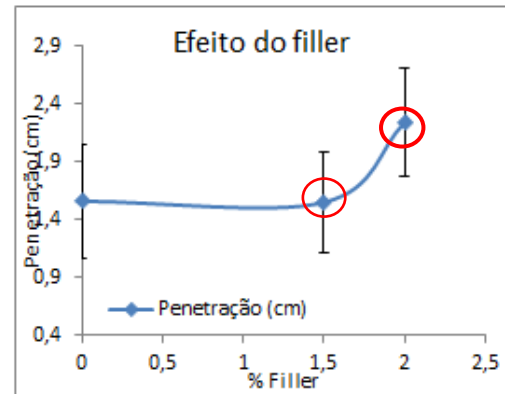
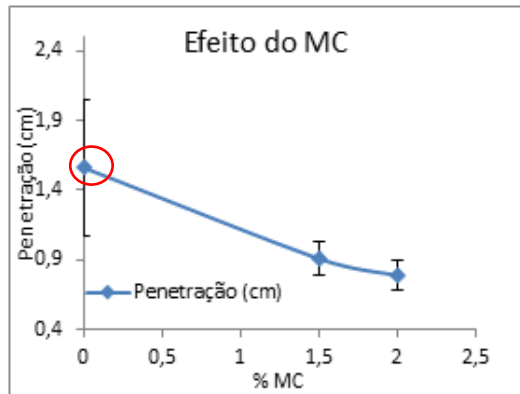


Figura 4.39- Efeito do metacaulino e do filler na durabilidade

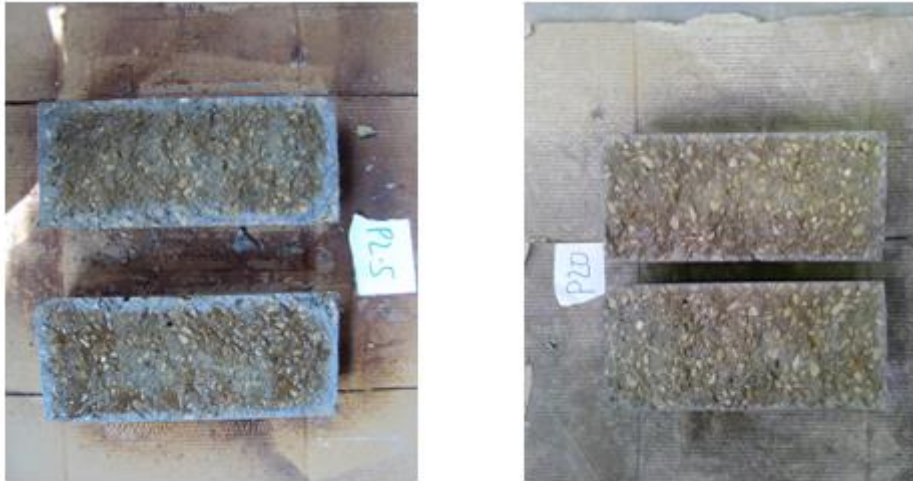


Figura 4.40- Efeito do metacaulino na durabilidade

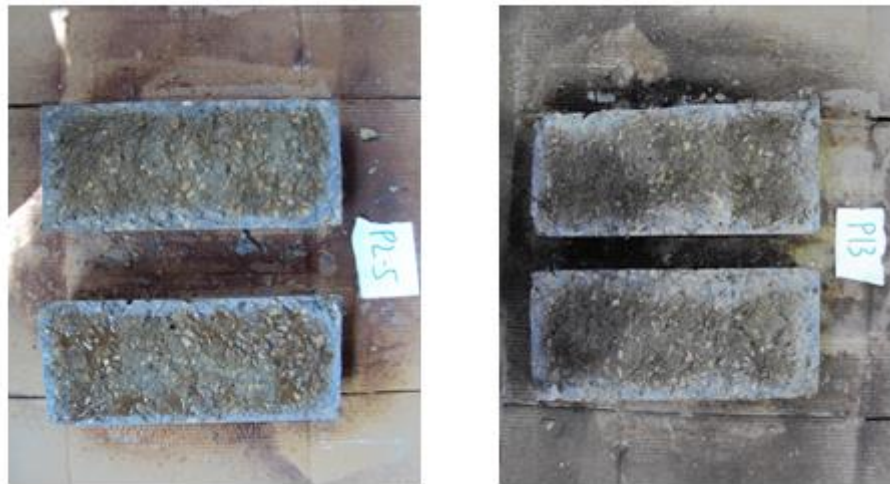


Figura 4.41- Efeito do filler na durabilidade

Verifica-se que quando utilizado o metacaulino como adição, o seu efeito é o mesmo que quando o mesmo é utilizado como substituição parcial do cimento. Com o aumento do teor da pozolana, observa-se uma diminuição na profundidade de penetração dos cloretos. O seu acrescento à composição implica a formação adicional de produtos hidratados, o que aumenta a capacidade de ligação com os iões cloreto, levando assim a uma diminuição da difusão dos cloretos [Bai et al 2003, Martin-Perez et al 2005].

Relativamente à adição de filler, constata-se mais uma vez que o seu aumento é prejudicial. O facto de ter ocorrido exsudação aquando da formulação da pasta provocou uma má compactação no sistema, facilitando assim a difusão dos cloretos para o interior do provete. Por fim, quando comparadas as duas adições verifica-se que o metacaulino é mais

eficaz na resistência à penetração de cloretos. Já o filler não teve o efeito desejado, já que a sua função passaria por melhorar a distribuição granulométrica, o que se traduziria numa maior retenção de água, eliminando a exsudação e portanto deveria ter havido uma menor profundidade de penetração.

CAPÍTULO 5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões

O presente trabalho tinha como objectivo avaliar características como a fluidez, a deformabilidade, a trabalhabilidade, a resistência à segregação e os parâmetros reológicos de betão autocompactável (BAC) no estado fresco. Depois de atingido o estado endurecido pretendia-se estudar as propriedades mecânicas, como a resistência mecânica à compressão e o módulo de elasticidade, e a durabilidade. Também se pretendia ver a correlação existente entre estes dois estados. Foram assim elaboradas diversas formulações onde se promove a variação do teor em superplastificante, em água, em cimento, adição de uma pozolana (metacaulino) como substituição parcial no cimento, adição de um filler e adição de uma pozolana como filler. Foi estudado o papel dos constituintes nas formulações e ao mesmo tempo pretendeu-se encontrar composições que tivessem um comportamento adequado no estado fresco e verificar as consequências no estado endurecido.

O estudo do comportamento do betão autocompactável começou pela obtenção de uma formulação base que respeitasse as propriedades exigidas a um BAC no estado fresco, de forma a servir de base à análise do efeito da modificação ou introdução de novos constituintes.

Constatou-se que o aumento de SP só traz vantagens até um certo limite. Ou seja, até o seu valor ser suficiente para compensar a falta de água de amassadura, atingindo-se o espalhamento pretendido (500-600 mm). A partir desse limite não há melhorias nos parâmetros reológicos nem no espalhamento, mas apenas o aparecimento de exsudação. A utilização de SP para as outras formulações revelou-se eficaz, atingindo-se uma fluidez e trabalhabilidade adequadas nas pastas. No entanto, quando o adjuvante era utilizado para compensar uma razão água/cimento muito baixa ou um excesso de finos, o seu efeito era nulo, obtendo-se assim elevadas tensões de cedência e viscosidades e por conseguinte, espalhamentos muito reduzidos.

A razão Água/Cimento (A/C) é um parâmetro que tem uma elevada influência no comportamento em fresco do BAC. Apesar de se tentar sempre reduzir ao máximo a quantidade de água no sistema com o intuito de se formarem menos poros durante a cura e assim obter uma maior densidade, a redução da razão A/C de 0,4 para 0,3 não traz

melhorias. A utilização de maiores teores em SP (até 2%) não é suficiente para compensar a falta de água de amassadura para $A/C= 0,3$, o que afecta bastante a trabalhabilidade e a fluidez do betão. Obtêm-se maiores resistências mecânicas para $A/C= 0,3$ do que para $A/C= 0,4$, no entanto a mistura não pode ser considerada como um BAC devido ao seu reduzido espalhamento.

O aumento do teor em cimento (de 450kg/m^3 para 500kg/m^3) resulta num maior espalhamento, provocado por uma diminuição do valor da tensão de cedência e da viscosidade, que é o pretendido para um BAC. A nível de propriedades no estado endurecido, a resistência mecânica e o módulo de elasticidade não sofrem alterações significativas, no entanto para um teor de 450 kg/m^3 o aumento do teor em SP provoca uma diminuição nestas propriedades causada pelo aparecimento de exsudação. Na prática, terá de haver um rácio que tenha em conta se o aumento do espalhamento da pasta, compensará o aumento do custo provocado por uma maior adição de ligante.

A adição de uma pozolana como substituição parcial no cimento traz melhorias até 10% de substituição. O seu efeito secundário de filler preenche os espaços vazios deixados pelos agregados e pelo ligante, tornando a mistura mais fluida, diminuindo assim a sua viscosidade e aumentando o espalhamento. Quando se aumenta a substituição para 20%, verifica-se que o sistema deixa de poder ser classificado de BAC devido ao seu reduzido espalhamento. A utilização de maiores quantidades de SP levaria provavelmente a um aumento deste valor. Verifica-se que o efeito do adjuvante é bastante mais evidente para menores valores de substituição do cimento pela pozolana. No estado endurecido, é a sua reatividade pozolânica que provoca o maior efeito nas propriedades mecânicas. É para os 20% de MC que as formulações têm uma maior resistência mecânica e maior módulo de elasticidade, ainda que os valores para 10% de MC estejam muito próximos. Uma maior quantidade de SP aquando da substituição por 20% e provavelmente a diferença seria mais acentuada, aliado ao facto de a mistura aumentar o espalhamento e assim poder ser denominada de BAC. Importa referir que foi neste conjunto de formulações (10 e 20% de substituição parcial do cimento por metacaulino que se obtiveram os valores mais elevados de resistência à compressão).

A adição de um filler calcário em vários teores (1,5 e 2%) implica uma diminuição dos parâmetros reológicos e o conseqüente aumento no espalhamento. Para $F= 2,0\%$ surge o fenómeno de exsudação pois o aumento do teor em finos não é suficiente para aumentar o

teor em SP relativamente à composição padrão. Quando a adição de filler é de 1,5%, o adjuvante não tem efeito em termos de espalhamento e surge exsudação para SP= 1,2%. Aumentando a adição para F= 2,0%, a formação de exsudação é proporcional ao aumento do teor em SP. A nível de propriedades no estado endurecido, estas não sofrem melhorias com o aumento do filler para o mesmo teor de SP. No entanto, há uma diminuição da resistência mecânica quando F= 1,5% à medida que se aumenta o teor em SP devido ao aparecimento de exsudação. Para F= 2,0% o comportamento é o mesmo, onde com o aumento do teor em SP, o grau de segregação aumentou, o que se manifestou numa gradual perda de resistência à compressão e de módulo de elasticidade.

Além de ter sido utilizada como substituição parcial do ligante, a pozolana (MC) foi também introduzida como se se tratasse de um filler, ou seja, com a intenção de preencher os espaços vazios deixados pelos outros constituintes. De forma a poder compará-la com o próprio filler calcário foi utilizada nos mesmos teores (1,5 e 2,0%). Verificou-se que o espalhamento aumentou até MC= 1,5%, valor a partir do qual começou a diminuir, o que pode ser explicado pelo facto de para esta percentagem o MC já retirar alguma água livre ao sistema, o que é corroborado por um decréscimo da viscosidade seguido de um aumento. Para as mesmas percentagens, o filler apresenta um comportamento crescente em termos de espalhamento e respectiva diminuição da viscosidade. A razão pela qual isto acontece deve estar relacionada com as diferentes áreas superficiais dos materiais, o metacaulino tem uma área superficial bastante superior à do filler devido à sua maior finura. Ou seja, o metacaulino funciona melhor como filler do que o próprio filler calcário. Este comportamento tem repercussões no estado endurecido, onde o betão obtém maiores valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade quando comparado com o filler, devido também ao facto deste último apresentar exsudação aquando do estado fresco.

A nível de propriedades reológicas, a tensão de cedência apresenta um comportamento bastante estável para qualquer formulação, ao contrário da viscosidade que é bastante afectada pelas diversas variações dos teores dos constituintes, o que tem uma consequência directa no espalhamento.

Relativamente à durabilidade, verificou-se que a presença de superplastificante apenas tem efeito na resistência à penetração de cloretos quando existe exsudação na formulação da pasta. A variação do teor em água e do teor em cimento tiveram resultados contrários ao esperado. Esperava-se um aumento da difusão dos cloretos com a redução do teor em água

devido à falta de trabalhabilidade da pasta quando no estado fresco e portanto uma má compactação dos constituintes e uma diminuição da difusão dos mesmos aquando do aumento do teor em cimento devido ao aumento dos produtos da reacção de hidratação. O aumento do teor em metacaulino revelou-se benéfico pois a profundidade de penetração observada foi muito reduzida ao contrário do que aconteceu com o filler calcário. O efeito do metacaulino revelou-se benéfico tanto quando utilizado como substituição parcial do cimento como quando utilizado como filler.

O trabalho realizado permitiu estabelecer correlações entre os constituintes usados e as propriedades no estado fresco que acabam por definir verdadeiramente um betão autocompactável.

Destacam-se algumas das questões mais importantes a abordar em trabalhos futuros relacionados com a aplicação e formulação de betões autocompactáveis.

A utilização de diferentes superplastificantes deverá ser testada para as mesmas composições base de forma a demonstrar se estes têm ou não diferenças muito acentuadas entre si com o objectivo de entender se o tipo de superplastificante utilizado tem efeito nas propriedades reológicas.

O modo de mistura e a ordem como os diferentes constituintes líquidos ou sólidos são introduzidos no sistema com o intuito de perceber se o método tem ou não influência nas propriedades do sistema, principalmente as relativas ao estado fresco.

Avaliar a longo prazo outras características como a retracção e a fendilhação e mesmo a penetração por cloretos.

Criar um método de correlação, rápido e simples para a formulação do betão autocompactável, tendo em conta o tipo de fluidez pretendido, resistência, tempo de presa, entre outros.

Referências

- Allen T, 1997. Particle Size Measurements, 5th edition, Ed. Chapman and Hall, Great Britain
- Aydin S, Yazici H, Yigiter H, 2006. Effects of cement type, water/cement ratio and cement concrete on sea water resistance of concrete. Engineering Faculty, Department of Civil Engineering. Dokuz Eylul University, Izmir, Turkey.
- Ambrose J, Pera J, 2002. Design of self-levelling concrete, 1st North American Conference on Design and Use of Self-consolidating Concrete, Hanley Wood, LLC, Addison, IL, Chicago, Illinois, p. 89-94
- Anagnostopoulos N, Sideris K, 2012, Durability of normal strength self-compacting concretes and their impact on service life of reinforced concrete structures, Construction and Building Materials, p.1-7
- Appleton J, Costa A, 2002, Estruturas de Betão I, Instituto Superior Técnico, p 13-70
- Bai W. J, I. S. Weir, 1998. Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater, Cement and Concrete Research, 33, 353-362
- Barrak, M. Bascoul, A., Mouret, Michel., 2007. Self-compacting concrete paste constituents: Hierarchical class of their influence on flow properties of the paste. Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université de Toulouse, France, p.5-10
- Barrela E, 2010, Comportamento reológico do betão autocompactável, tese de mestrado, Universidade Nova de Lisboa
- Barros J, Camões A., Pereira E, 2004. Betão Autocompactável Reforçado com Fibras de Aço, Método de conceção e propriedades mecânicas, Universidade do Minho, p.1-4
- Barros P.G.S, 2008. Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto autoadensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas
- Bédérina M, Khenfer, R.M., Quéneudec M., 2004. Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different

- sand concretes, Laboratoire de Génie Civil, Université A. Tledji de Laghouat, Algeria, France, p.5
- Bilberg, P, 1999. Selfcompacting concrete for civil engineering structures- the Swedish experience, Swedish Cement and Concrete Research Institute (p142-163)
 - Bouzoubaâ N, Lachemi M, 2001. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash, Cement & Concrete Research: p. 413-420
 - Brito J., Silva P., 2009. Betão autocompactável- estado atual do conhecimento, Instituto Superior Técnico, p. 16-20
 - Catálo de fichas técnicas, Sika, 2013
 - Cordin J, Le Roy R., Schwartzentruber L., 2004, Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC), École Nationale des Travaux Publics de l'Etat, p.1-11
 - Daczko C, 2002. Stability of Self Consolidating Concrete, Assumed or Ensured? First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, USA, p.242-252
 - Domone P, 2005, Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, Univeristy College London, p. 1-12
 - ERMCO, 2005, European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use.
 - Esping O, 2003. Methods for characterisation of fillers and fines for selfcompacting concrete. 3rd International Rilem. Symposium of SelfCompacting Concrete, Reykjavik, Iceland
 - Ferreira R, Jalali S., 2002. Betão autocompactável- Influência dos superplastificantes (carboxilatos modificados) na fluidez e deformabilidade das pastas ligantes, Universidade do Minho, p.1-16
 - Golaszewsky J. S, 2007, Rheology of fresh mortars and fresh concrete mixtures, Concrete technology, 6 p. 42-51
 - Greim M, 1997, Rheological measurements of building materials- A comprehensive research program , Annual Trans. Nord Rheology Society, p.5-13
 - Hewlett P. C, 2001. Lea's Chemistry of cement and concrete, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom

- Holschemacher K, 2004. Hardened material properties of self-compacting concrete, *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. X, nº4, Lithuanian Academy of Sciences, p. 261-266
- Johnson D, Johnson G, Robertson I., 2010. Quantifying segregation in self-consolidating concrete through image analysis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Hawaii, p. 1
- Lagier F, Kurtis K. E., 2007. Influence of Portland cement composition on early age reactions with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 37(10), 1411-1417
- Martin D.J, 2002. Economic impact of SCC in precast applications, 1st North American Conference on Design and Use of Self-consolidating Concrete, Chicago-Illinois, p. 47-152
- Martin-Perez B, Zibara H., Hooton R.D., Thomas M.D.A., 2000. A study of the effect of chloride binding on service life predictions, *Cement and Concrete Research*, 28, 1571-1584.
- Nawa T, Izumi T, Edamatsu Y, 1998. State-of-the-art on materials and design of self-compacting concrete. *Journal: Concrete Engineering Series*, Japan: p. 160-190.
- Nunes, Figueiras, Coutinho et al, 2004. Aplicações do betão autocompactável na indústria da construção, Congresso Nacional da Construção, FEUP, p.381-386
- Nunes S, 2001, Betão Autocompactável: Tecnologia e Propriedades, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, p. 28
- Okamura H, Ouchi M, 2003, Self-Compacting Concrete, Japan Concrete Institute, p.1-11
- Ouchi M, 2000, Self-Compacting concrete, Development, Applications and Investigations, Kochi University of Technology, p.1-5
- Persson B, 2000. A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete, *Cement and Concrete Research*, p.1-6
- Skarendahl, A., 1998. Self-Compacting Concrete in Sweden. Research and Application- International Workshop on Self-Compacting Concrete, p. 45-74
- Varela N., Vieira F., 2005. 1º Congresso Nacional de Argamassas, APFAC Lisboa Portugal, p. 1-11