



LAURA RORATO MACIEL NEUBERN SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM BAIXO TEOR DE
CIMENTO APLICADO A ESTRUTURAS PRÉ-ESFORÇADAS**

MESTRADO EM ENGENHARIA DA CONSTRUÇÃO

BRAGANÇA – PORTUGAL

2021

LAURA RORATO MACIEL NEUBERN SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM BAIXO TEOR DE
CIMENTO APLICADO A ESTRUTURAS PRÉ-ESFORÇADAS

Dissertação apresentada a Escola Superior de Tecnologia e Gestão no curso de Mestrado em Engenharia da Construção no âmbito do programa de dupla diplomação entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR e o Instituto Politécnico de Bragança - IPB como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia da Construção.

Orientadoras: Prof.^a Doutora Eduarda Cristina Pires Luso, Prof.^a Doutora Caroline Angulski da Luz e Prof.^a Doutora Graça Vasconcelos

BRAGANÇA – PORTUGAL

JULHO, 2021

LAURA RORATO MACIEL NEUBERN SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM BAIXO TEOR DE
CIMENTO APLICADO A ESTRUTURAS PRÉ-ESFORÇADAS

Esta versão da dissertação inclui as correções feitas pela banca examinadora.

Prof.^a Doutora Eduarda Cristina Pires Luso (Orientadora)
Instituto Politécnico de Bragança - IPB

Prof.^a Doutora Graça Vasconcelos (Orientadora)
Universidade do Minho - UMinho

Prof.^a Doutora Caroline Angulski da Luz (Orientadora)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Prof. Doutor Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo
(Arguente)
Universidade do Minho - UMinho

Prof.^a Doutora Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira
(Presidente)
Instituto Politécnico de Bragança - IPB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus por me guiar até onde cheguei.

Aos meus pais e avós, por batalharem muito para proporcionar a mim e ao meu irmão condições de vida excepcionais. Admiro muito o esforço de vocês e espero, algum dia, poder retribuir. Obrigada por confiarem em mim e me permitirem realizar o sonho de fazer um intercâmbio. Agradeço, principalmente, por vibrarem intensamente com minhas vitórias e demonstrarem um amor incondicional. Amo vocês, família!

Ao meu namorado, William Geremia, por acreditar em mim e topar minhas loucuras. Sua companhia sempre tornou tudo mais alegre, sorte a minha ter te conhecido em minha primeira semana de faculdade. Dividir a vida com você é bom demais! Te amo.

À professora Eduarda Luso, minha orientadora, por toda a dedicação, preocupação e paciência desprendidos durante este trabalho. Pelos ensinamentos passados no decorrer da pesquisa, que com certeza foram inúmeros, e pelos conselhos dados ao longo deste período. Foi um privilégio trabalhar ao seu lado.

Às minha coorientadoras professoras Graça Vasconcelos e Caroline Angulski, pela ajuda nas correções e por sempre estarem dispostas quando precisei! Em especial, a prof. Graça por abrir as portas da Universidade do Minho para a realização de ensaios que foram essenciais ao trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da UTFPR Pato Branco e do Departamento de Mestrado em Engenharia da Construção do IPB, por todo o conhecimento repassado durante as disciplinas. Em especial, ao prof. Gustavo Lacerda, pelas conversas, ajuda no processo de dupla diplomação e pela preocupação. Mesmo de longe, o senhor sempre torceu pelo meu sucesso e do William.

Todo o trabalho de investigação laboratorial só foi possível com a colaboração da equipe do Laboratório de Materiais do IPB, engenheira Hermínia Morais, Sr. João Pires e Sr. Octávio Pereira, e ao Sr. Antonio Matos do Laboratório de Estruturas da UMinho. Os meus sinceros agradecimentos.

A minha melhor amiga, Beatriz Affornalli, pela amizade incrível de anos e por sempre torcer por mim! Te-la como amiga é realmente maravilhoso. Aos meus amigos da UTFPR, em especial Ana Flávia, Leonardo, Bonitinho e Jaque, pela amizade que construímos, pelas festas inesquecíveis, pelos trabalhos que sempre deram certo e por fazerem da minha passagem pela faculdade um caminho mais leve.

Aos amigos que conheci em Portugal, agradeço pelas risadas, festinhas (quando ainda podia) e por passarmos juntos um momento tão difícil. Um agradecimento especial, ao Mychel, Sullivam, William, Ana e Samuel, integrantes do ap. 4 ESQ, por tantos momentos bons e por termos formado uma família neste um ano que vivemos juntos em Portugal. Não sei o que teria sido sem vocês para assistir um filminho, jogar um AGE ou falar besteira. Vai ficar na memória pra sempre, amigos.

À empresa Sika Portugal - Produtos Construção e Indústria SA, pelo fornecimento de adjuvantes sem custo para possibilitar os ensaios desta dissertação.

Por fim, mas não menos importante, à UTFPR pela educação de qualidade e pelos quatro anos maravilhosos que passei na universidade! Agradeço principalmente, a existência do programa de dupla diplomação, em parceria com o IPB, que me proporcionou momentos incríveis em Portugal. Meu eterno agradecimento.

“For some reason, I didn’t succumb to the stereotype that science wasn’t for girls.”

Sally Ride,
Primeira mulher a pisar na Lua

RESUMO

Betões auto-compactáveis devem apresentar simultaneamente fluidez e coesão, sem a presença de exsudação e segregação. Essas características necessárias ao estado fresco, geralmente, são possíveis somente mediante altos teores de finos e conseqüentemente, maior consumo de cimento. A consolidação desse tipo de betão em indústrias de pré-fabricados e em estruturas pré-esforçadas tem instigado a busca de soluções para reduzir o consumo de cimento e emissões de CO_2 , tendo em vista que a indústria cimenteira é responsável por 5% a 7% das emissões globais de gases de efeito estufa. Visando uma contribuição ao meio ambiente, esta pesquisa verificou a viabilidade técnica e econômica do betão auto-compactável com baixo consumo de cimento. Ensaio em pastas foram essenciais para determinação do teor de adição mineral e superplastificante empregados, para que posteriormente, fossem realizados ensaios no estado fresco e endurecido do betão, tais como espalhamento e resistência à compressão axial, respectivamente. Foram analisadas nove composições com o consumo de cimento reduzido, das quais apenas três apresentaram bons resultados no estado fresco. As relações água/cimento e agregados miúdo/grosso foram mantidas constantes, enquanto que o consumo de cimento variou entre $271,79 \text{ kg/m}^3$ e $299,66 \text{ kg/m}^3$, a relação sílica de fumo/cimento variou entre 5 e 15% e a relação superplastificante/cimento variou entre 0,1 e 0,5%. Os resultados apresentaram que o aumento do uso da sílica de fumo prejudica as propriedades no estado fresco, contribui com aquelas no estado endurecido e encarece o betão, devido principalmente ao fato de Portugal não possuir indústrias que produzam - como subproduto - a sílica. Já em relação ao consumo de cimento, os resultados foram bastante promissores, pois conclui-se que é viável a produção de betões auto-compactáveis com consumos inferiores a 300 kg/m^3 com garantia da qualidade de suas propriedades mecânicas e reológicas, além de uma redução das emissões de CO_2 em relação aos betões convencionais.

Palavras-chave: Betão Auto-Compactável. Cimento. Sílica de fumo. Estruturas pré-esforçadas.

ABSTRACT

Self-compacting concrete must have both fluidity and cohesion, without the presence of exudation and segregation. These necessary characteristics for the fresh state are generally only possible due to high levels of fines and, consequently, higher consumption of cement. The consolidation of this type of concrete in pre-fabricated industries and prestressed structures has instigated the search for solutions to reduce the consumption of cement and emissions of CO_2 , considering that the cement industry is responsible for 5% to 7% of global emissions of greenhouse gases. Aiming to contribute to the environment, this research verified the technical and economic viability of self-compacting concrete with low cement consumption. Paste tests were essential to determine the content of mineral addition and superplasticizer used so that later, tests could be carried out in the fresh and hardened state of the concrete, such as spreading and axial compression resistance, respectively. Nine compositions were analyzed with the consumption of cement reduced, of which only three showed good results in the fresh state. The water/cement ratio and fine/coarse aggregates were kept constant, while the cement consumption varied between $271,79 \text{ kg/m}^3$ and $299,66 \text{ kg/m}^3$, the silica fume/cement ratio varied between 5 and 15% and the superplasticizer/cement ratio varied between 0,1 and 0,5%. The results showed that the increase in silica fume harms properties in the fresh state, contributes to those in the hardened state and makes concrete more expensive, mainly since Portugal does not have industries that produce - as a by-product - silica fume. Regarding the consumption of cement, the results were very promising, as it is concluded that the production of self-compacting concrete with consumption less than 300 kg/m^3 is feasible with guaranteed quality of its mechanical and rheological properties, in addition to a reduction of CO_2 emissions compared to conventional concrete.

Keywords: Self-compacting concrete. Cement. Silica fume. Prestressed structures

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo das fontes energéticas utilizadas na produção do cimento. . .	24
Figura 2 – Esquema de funcionamento do reômetro BML.	34
Figura 3 – Representação dos tipos de tração	35
Figura 4 – Curvas tensão-deformação típicas para o betão	36
Figura 5 – Comportamento do superplastificante em partículas de cimento.	48
Figura 6 – Fluxograma da metodologia adotada.	53
Figura 7 – Curva granulométrica da areia e brita utilizadas.	57
Figura 8 – Ensaio do cone de Marsh.	59
Figura 9 – Percentuais de adjuvante superplastificante em função do logaritmo decimal do tempo para fluir (T), na substituição parcial em 5%, 10% e 15% de sílica de fumo.	60
Figura 10 – Ensaio de mini-slump realizado.	61
Figura 11 – Gráfico obtido da análise do esqueleto granular.	63
Figura 12 – Cone de Abrams.	68
Figura 13 – Ensaio de Slump Flow Test.	69
Figura 14 – Funil V com medidas em milímetros.	70
Figura 15 – Ensaio do Funil V.	70
Figura 16 – Caixa L com medidas em milímetros.	71
Figura 17 – Betão em repouso na caixa L.	72
Figura 18 – Retificação de provete	73
Figura 19 – Disposição do provete no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	74
Figura 20 – Ensaio de resistência à compressão axial em provete da composição 1. .	75
Figura 21 – Roturas satisfatórias de provetes cilíndricos.	75
Figura 22 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade.	77
Figura 23 – Ensaio da determinação do módulo de elasticidade do betão.	78
Figura 24 – Gráfico do espalhamento das misturas em função do teor de sílica . . .	82
Figura 25 – Pormenor do espalhamento da mistura 2.3	83
Figura 26 – Gráfico do tempo T500 das misturas em função do tempo tv	84
Figura 27 – Representação do agregado suspenso na pasta cimento.	85

Figura 28 – Gráfico da habilidade passante das misturas em função do teor de sílica	86
Figura 29 – Gráfico da resistência à compressão axial em função do teor de sílica e consumo de cimento	89
Figura 30 – Rotura dos provetes à compressão	91
Figura 31 – Força aplicada ao provete em função do seu deslocamento	91
Figura 32 – Deformação dos provetes em função do seu carregamento (kN)	92
Figura 33 – Módulo de elasticidade secante em função do teor de sílica e consumo de cimento	93
Figura 34 – Resistência à tração por compressão diametral em função do teor de sílica e cimento	94
Figura 35 – Índice de aglomerantes das composições em função do consumo de cimento	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do betão auto-compactável em relação ao consumo de cimento	21
Tabela 2 – Emissões de GEE na construção civil em relação aos demais setores da economia (%)	22
Tabela 3 – Composições de BAC de Wcislo e Kuniczuk (2013)	25
Tabela 4 – Comparação da pegada de carbono entre um ECO BAC e um Green BAC	26
Tabela 5 – Índices de ligantes e emissão de CO_2 em BACs encontrados na literatura	27
Tabela 6 – Principais ensaios no estado fresco com suas respectivas normas no Brasil e Europa.	32
Tabela 7 – Principais ensaios no estado endurecido com suas respectivas normas no Brasil e Europa.	37
Tabela 8 – Cimentos classificados conforme o uso de adições	38
Tabela 9 – Requisitos gerais de granulometria de agregados	40
Tabela 10 – Informações acerca do cimento CEM I 42,5R.	55
Tabela 11 – Caracterização dos agregados miúdos e graúdo.	56
Tabela 12 – Espalhamentos obtidos com o ensaios do mini-slump.	61
Tabela 13 – Dados obtidos com análise do esqueleto granular.	63
Tabela 14 – Parâmetros definidos para as composições de betão	64
Tabela 15 – Parâmetros calculados para as composições de betão	65
Tabela 16 – Parâmetros exigidos pelo Eurocódigo	66
Tabela 17 – Procedimento de mistura para o BAC	67
Tabela 18 – Resultados obtidos nos ensaios do estado fresco	81
Tabela 19 – Parâmetros das misturas resultantes	81
Tabela 20 – Massas volúmicas das composições analisadas	88
Tabela 21 – Resultados obtidos nos ensaios do estado endurecido	88
Tabela 22 – Resistência à compressão axial aos 3 dias de idade	90
Tabela 23 – Valores do módulo de elasticidade tangente inicial e secante	92
Tabela 24 – Resultados do ensaio resistência à tração por compressão diametral do betão aos 28 dias	93
Tabela 25 – Custos dos materiais e das composições finais	96

Tabela 26 – Resumo das propriedades avaliadas neste trabalho	98
Tabela 27 – Relação das massas (g) dos materiais constituintes da pasta.	114
Tabela 28 – Tempos obtidos no ensaio do cone de Marsh.	115
Tabela 29 – Resultados do ensaio resistência à compressão axial do betão aos 28 dias	116
Tabela 30 – Continuação da Tabela 29	116
Tabela 31 – Classes de exposição ambiental do betão conforme o eurocódigo	118
Tabela 32 – Continuação da Tabela 31	119
Tabela 33 – Limitações ao betão impostas pelo eurocódigo	119
Tabela 34 – Classes de exposição ambiental do betão conforme a norma brasileira .	120
Tabela 35 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do betão . .	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO_2	Dióxido de carbono
C_3A	Aluminato tricálcico
E_{ci}	Módulo de elasticidade tangente inicial
E_{cm}	Módulo de elasticidade secante
η	Viscosidade plástica
γ	Taxa de corte ou taxa de cisalhamento
ρ_c	Massa volúmica aparente
τ	Tensão de corte ou tensão de cisalhamento
τ_0	Tensão de cedência ou tensão de escoamento
b_i	Índice de aglomerantes
d_{max}	Dimensão máxima ou dimensão máxima característica
f_{ck}	Resistência característica a compressão do betão aos 28 dias
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias
$f_{ctk,inf}$	Resistência característica à tração inferior do betão aos 28 dias
f_{ctm}	Resistência média do betão à tração aos 28 dias
$CO_{2,eq}$	Dióxido de carbono equivalente
Al_2O_3	Óxido de alumínio
a/c	Relação água cimento
ARI	Elevada resistência inicial, aplicada a cimentos brasileiros
BAC	Betão auto-compactável
BACs	Betões auto-compactáveis
BC	Betão convencional
BS	Baixo calor de hidratação, aplicada a cimentos brasileiros
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
$CaMg(CO_3)_2$	Carbonato de cálcio e magnésio
CEM	Mistura enriquecida de cálcio, aplicada a cimentos europeus
CP	Cimento Portland
d	Menor dimensão dos peneiros para análise granulométrica dos agregados
EPG SCC	Guia Europeu para o betão auto-compactável
FA	Cinza volante
GGBFS	Escória granulada de alto forno

LF	Fíler calcário
MK	Metacaulino
MPa	Mega Pascal
N	Resistência inicial usual, aplicada a cimentos europeus
PC	Betão pré-esforçado
PH	Potencial Hidrogeniônico
R	Elevada resistência inicial, aplicada a cimentos europeus
RCC	Betão armado
RILEM	União Internacional para Testes e Pesquisa Laboratorial de Materiais e Estruturas
RS	Resistência à sulfatos, aplicada a cimentos brasileiros
S	Maior dimensão dos peneiros para análise granulométrica dos agregados
SCC	Betão auto-compactável
SF	Sílica de fumo
sf/c	Relação sílica de fumo cimento
SiO ₂	Dióxido de silício
sp/c	Relação superplastificante cimento
SR	Resistência à sulfatos, aplicada a cimentos europeus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL	19
2.1	BAC COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO	20
2.2	BAC COMO MATERIAL SUSTENTÁVEL	22
2.3	BAC EM ESTRUTURAS PRÉ-ESFORÇADAS	27
2.4	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	30
2.5	REOLOGIA DO BETÃO	32
2.6	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	34
2.7	MATERIAIS CONSTITUINTES	37
2.7.1	Cimento Portland	38
2.7.2	Agregados	39
2.7.3	Adições minerais	40
2.7.3.1	Cinza volante	41
2.7.3.2	Sílica de fumo	43
2.7.3.3	Escória de alto forno	44
2.7.3.4	Metacaulino	45
2.7.3.5	Fíler calcário	46
2.7.4	Adjuvantes	47
2.7.4.1	Superplastificantes	47
2.7.4.2	Modificadores de viscosidade	49
2.7.5	Água	50
2.8	MÉTODOS DE DOSAGEM DO BAC	51
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	55
3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS	55
3.2	OTIMIZAÇÃO DA PASTA	57
3.3	OTIMIZAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR	61
3.4	CÁLCULO E EXECUÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE BETÃO	64
3.5	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	67
3.5.1	Slump Flow Test e Slump Flow T500	67

3.5.2	Funil V	69
3.5.3	Caixa L	71
3.6	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	72
3.6.1	Resistência à tração	73
3.6.2	Resistência à compressão	75
3.6.3	Módulo de elasticidade	76
4	RESULTADOS	80
4.1	RESULTADOS COM O BETÃO FRESCO	80
4.1.1	Habilidade de preenchimento	81
4.1.2	Fluidez	83
4.1.3	Habilidade passante	85
4.2	RESULTADOS COM O BETÃO ENDURECIDO	87
4.2.1	Resistência a compressão axial	88
4.2.2	Módulo de elasticidade tangente inicial	91
4.2.3	Resistência à tração por compressão diametral	93
4.3	ANÁLISE AMBIENTAL	94
4.4	VIABILIDADE ECONÔMICA	95
5	CONCLUSÕES	98
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
	REFERÊNCIAS	102
	APÊNDICES	113
	APÊNDICE A – Proporção dos materiais utilizados para a produção de pasta	114
	APÊNDICE B – Resultados do ensaio do Cone de Marsh	115
	APÊNDICE C – Resultados detalhados do ensaio de resistência à compres- são axial do betão aos 28 dias	116
	ANEXOS	117
	ANEXO A – Recomendações do eurocódigo em relação ao betão	118
	ANEXO B – Recomendações da norma brasileira em relação ao betão	120

1 INTRODUÇÃO

O uso de betões de alta resistência, em elementos densamente armados, atende muito bem a necessidade da indústria da construção por estruturas mais dúcteis e resistentes. Porém, a estruturação de tais elementos exige que misturas de betão fresco sejam bem fluídas, tendo em vista que o risco de segregação dos materiais do betão é muito elevado, com necessidade de lançamento em lugares altos e uso excessivo de adensadores (METHA; MONTEIRO, 2014).

Nesse contexto, o betão auto-compactável (BAC) surgiu em meio a uma carência de mão de obra qualificada e problemas relacionados a falta de durabilidade das estruturas, em que sentia-se a necessidade de uma nova tecnologia em betão que, além de resolver estes problemas, trouxesse maior produtividade e menor custo (GOMES; BARROS, 2009). O material passou a ser utilizado em diversas aplicações como pontes, edifícios, túneis, elementos estruturais pré-fabricados, tanques e elementos de betão em geral (KLEIN, 2008).

Sua vasta aplicabilidade ligada a possibilidade de conferir à construção civil benefícios econômicos, tecnológicos e ambientais, otimizando o consumo de materiais e mão de obra, fazem com que o interesse pelo estudo deste material cresça constantemente a nível mundial (REPETTE, 2011). A áreas da construção civil em que há maior demanda pelo BAC é a execução de elementos pré-esforçados, pois conforme Carvalho (2017), a alta taxa de armadura existente dificulta o adensamento do betão convencional. Ou seja, tais estruturas exigem um betão mais trabalhável, propriedade intrínseca ao BAC.

Porém, o betão auto-compactável ainda é visto como um betão de elevado custo, se comparado ao convencional, o que dificulta a sua popularização nas obras. Neste sentido, já há autores que estudam a elaboração de dosagens com baixo consumo de cimento, elemento chave para a redução de custo (TUTIKIAN, 2004; REBMANN, 2011; ARAÚJO, 2011; ALCOFORADO, 2013; DINIZ *et al.*, 2018; BARBOZA; ALMEIDA, 2018; SARTORTI; SOUSA; BARBOZA, 2019; BARBOZA; ALMEIDA; STORCH, 2020).

Além do impacto econômico, tal estratégia é de extrema importância no contexto industrial, regido pelas elevadas emissões de CO_2 oriundas do processo de fabricação do cimento que, de acordo com Metha e Monteiro (2014), representam cerca de 5 a 7% das emissões globais. Assim, a produção de betões mais eficientes com baixo consumo de cimento torna-se importante para o avanço do BAC, por contribuir também para a redução de impactos ambientais (BARBOZA; ALMEIDA; STORCH, 2020).

1.1 OBJETIVOS

Dado a contextualização apresentada anteriormente, pretende-se avaliar o comportamento das propriedades do betão auto-compactável com a incorporação de diferentes teores da adição mineral sílica de fumo combinado com um baixo consumo de cimento, de tal forma que possa ser aplicado a estruturas pré-esforçadas.

Para atingir tal propósito, uma campanha experimental foi traçada tendo em vista a caracterização das propriedades no estado fresco e no estado endurecido. De modo específico buscou-se:

- a) Definir os teores ideais de superplastificante para cada teor de sílica através de ensaios em pasta, como o Cone de Marsh e Mini-Slump;
- b) Definir o esqueleto granular das composições de forma a encontrar o menor teor de vazios;
- c) Analisar as propriedades de fluidez, capacidade de passagem e resistência à segregação do betão auto-compactável produzido com diferentes teores de sílica de fumo e consumo de cimento, através de quatro ensaios no estado fresco:
 - *Slump Flow Test*;
 - *Slump Flow T500*;
 - Caixa L;
 - Funil V.
- d) Analisar a influência dos diferentes teores e consumos nas propriedades mecânicas, através de três ensaios no estado endurecido:
 - Resistência à compressão axial;
 - Resistência à tração por compressão diametral;
 - Módulo de elasticidade.
- e) Analisar a influência da redução do consumo de cimento na emissão de gases de efeito estufa através do índice de aglomerantes;
- f) Analisar a viabilidade econômica dos betões produzidos em €/m³.MPa;
- g) Analisar a viabilidade da aplicação em estruturas pré-esforçadas.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está dividida em cinco capítulos, além das referências bibliográficas, apêndices e anexos. O Capítulo 1 compreende esta introdução onde se estabeleceu as motivações do estudo, o enquadramento do tema e os objetivos que se pretende alcançar.

Já o Capítulo 2 engloba o estado da arte do betão auto-compactável. Nele é abordado a situação atual de consumo de cimento no mundo, como isso impacta na sustentabilidade e possíveis estratégias para contornar tal problema na produção de BACs. Além disso, citam-se as características necessárias para a aplicação do material em estruturas pré-esforçadas, além das propriedades requisitadas ao estado fresco deste betão e do estado endurecido. São mencionados ainda, os materiais constituintes do BAC e as diversas metodologias de dosagem encontradas na literatura.

Quanto ao Capítulo 3, o mesmo relata, de forma detalhada, a metodologia utilizada para a composição das misturas de betão auto-compactável, desde a seleção dos materiais, aos ensaios realizados em pasta e os ensaios realizados no estado fresco e endurecido. Em sequência, o Capítulo 4 apresenta os resultados do comportamento das composições estudadas quanto as propriedades do estado fresco e endurecido, à emissão de gases poluentes e a viabilidade econômica dos betões em questão.

Po fim, no Capítulo 5 faz-se a conclusão frente aos resultados obtidos, através de uma análise global do BAC e são apresentadas sugestões para futuros trabalhos. Nos apêndices estão contidos dados detalhados de determinados ensaios e nos anexos, tabelas auxiliares para o estudo.

2 BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

O betão é um dos materiais mais utilizados na construção civil e com o passar do tempo houve uma necessidade em aperfeiçoá-lo, corrigindo suas imperfeições e melhorando sua resistência. Dentro desse contexto, em 1988, o betão auto compactável (BAC) foi desenvolvido pelo Professor Hajime Okamura, na Universidade de Tóquio – Japão (OKAMURA; OUCHI, 2003) e somente a a partir de 1990, outros países começaram a usar essa tecnologia.

Na Europa, preocupados com a problemática, alguns organismos surgiram com o propósito de formular recomendações, unificar e expandir o conhecimento acerca do tema como, por exemplo, o comitê técnico 174 SCC da RILEM – em funcionamento desde 1997 e a publicação de um guia oficial, o EPG SCC (do inglês, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*) em 2005, por um conjunto de cinco federações europeias (EFNARC, 2005). Porém, no Brasil recomendações oficiais só foram publicadas em 2010 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Tais documentos definem o BAC como um tipo de betão inovador que não requer vibração alguma para sua colocação e adensamento. Ele é caracterizado por fluir devido à ação de seu próprio peso, preenchendo as formas completamente e atingindo adensamento pleno, até mesmo na presença de congestionamento de armadura.

Para ser classificado como BAC existem 3 requisitos essenciais: fluidez, capacidade de passagem em armaduras de pequeno espaçamento e resistência à segregação. Suas principais vantagens são a redução do tempo de construção e custo global da obra; a capacidade de melhor preenchimento das formas e melhor aderência; a possibilidade de maiores taxas de armadura e fácil aplicação, visto que não há a necessidade de vibração; o aumento da durabilidade das estruturas; e a melhoria da tecnologia do processo construtivo (EL DEBS *et al.*, 2008).

Entretanto, propriedades no estado endurecido como resistência à compressão, resistência à tração e capacidade de deformação são parâmetros essenciais para sua utilização. Além disso, conforme NEVILLE, A.M.; BROOKS (2013) o BAC pode ser empregado tanto em estruturas de betão armado, quanto em estruturas pré-esforçadas. A sua única limitação é a obrigatoriedade da face superior ser horizontal.

Como desvantagens, tem-se o fato de que o BAC necessita de um maior controle de qualidade dos seus materiais constituintes e do seu traço, pois suas propriedades podem sofrer modificações como o excesso de fluidez, segregação ou excesso de coesão. Uma outra desvantagem, considerada por muitos como a principal, é o seu custo por metro cúbico que

devido à necessidade de um maior teor de finos (adições minerais e fílers) para se obter auto-compactidade, é superior ao de um betão convencional, na maior parte dos casos (EL DEBS *et al.*, 2008).

Esse aumento de finos do betão auto-compactável em relação ao betão convencional (BC), de acordo com Coutinho (2011), varia entre 30% para os BACs que serão movimentados ao longo de maiores distâncias horizontais e 10% para os que não necessitam dessa movimentação. Porém, apesar de diversos autores ainda considerarem o preço do BAC como sua principal desvantagem, já há estudos que refutam esta afirmação ao averiguar o comportamento do custo do BAC por metro cúbico de betão em virtude de sua resistência (TUTIKIAN, 2004; REBMANN, 2011; ALCOFORADO, 2013; DINIZ *et al.*, 2018; BARBOZA; ALMEIDA, 2018; SARTORTI; SOUSA; BARBOZA, 2019).

Objetivando um preço de maior competitividade, é primordial adotar medidas que visem reprimir a quantidade necessária de adjuvante para que sejam mantidas as propriedades de fluidez e coesão do BAC. Assim, a medida encontrada por estes autores foi a mesma: a redução no consumo de cimento.

2.1 BAC COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO

De acordo com Metha e Monteiro (2014), entre os materiais que compõem o betão, o cimento Portland é o que comporta maior custo e consumo energético para ser produzido. A indústria cimenteira é a terceira maior consumidora de energia do mundo (consumo de 7% da energia industrial) e o segundo maior emissor industrial de CO_2 , 5% a 7% das emissões globais.

É importante ressaltar que o alto consumo de cimento não traz problemas apenas ao meio ambiente, ele pode gerar alguns inconvenientes no desempenho de uma estrutura como uma maior tendência de desenvolver fissuras decorrentes da retração térmica e química. Entretanto, Rebmann (2011) apontou que comumente a obtenção de um betão durável e de alta resistência, ainda é associada a um alto consumo de cimento Portland.

Contrapondo esta ideia, Tutikian (2004), Wallevik *et al.* (2010), Rebmann (2011), Alcoforado (2013), Diniz *et al.* (2018), Barboza e Almeida (2018), Pelisser e Vieira A. Bernardin (2018), Sartorti, Sousa e Barboza (2019) comprovaram que é possível executar um betão com baixo consumo de cimento com alta resistência à compressão de modo economicamente viável. Um destes autores, Wallevik *et al.* (2010), ainda criou uma classificação quanto ao consumo de cimento em BAC's, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do betão auto-compactável em relação ao consumo de cimento

Classificação	Consumo de cimento (kg/m^3)
BAC Rico	> 500
BAC Regular	550 - 450
BAC Magro	450 - 380
Green BAC	380 - 315
ECO - BAC	< 315

Fonte – Wallevik *et al.* (2010).

De acordo com Repette (2011), BAC produzidos pelos mesmos materiais intrínsecos ao BC (cimento, agregados graúdos e miúdos, adjuvante superplastificante e água) e com incorporação de finos (fíler e/ou pozolanas), denotam taxas de consumo de cimento entre 350 a 450 kg/m^3 .

Entretanto, os autores citados anteriormente formularam composições com taxas de consumo de cimento abaixo ou iguais a 300 kg/m^3 (consumo mínimo do aglomerante para a maior parte das classes de agressividade ambiental apresentadas pela NP EN 206-1 (2010)), o que representa uma redução no consumo de, no mínimo, 14,29%. Estas composições apresentaram em, sua grande maioria, todas as propriedades no estado fresco indispensáveis aos BAC e uma alta resistência à compressão.

É possível obter uma alta resistência à compressão nestas composições, pois, segundo Sartorti, Sousa e Barboza (2019), para volumes de pasta próximos ao índice de vazios ótimo obtido na fase do empacotamento de agregados, o incremento do volume de agregados proporcionado pela queda de volume de cimento, confere uma microestrutura do betão com menor porosidade. Obtêm-se então, como consequência, ganhos de resistência.

Quanto a questão financeiro, Tutikian (2004) demonstrou que para maiores patamares de resistência do betão aos 28 dias (acima de 40 MPa), a tendência é de que a diferença de custos do BAC e do BC diminuam, podendo em certas circunstâncias, haver menor custo para o betão auto-compactável.

Para patamares de resistência convencionais aos 28 dias, como 30 MPa, a diferença de custos entre o BAC e o BC varia entre 4,81% e 5% aproximadamente, ao considerar valores de mão-de-obra, de equipamentos e dos materiais necessários para sua execução. Estes percentuais foram obtidos por Alcoforado (2013) calculando-se a relação do indicador “valor total por m^3 ” do BAC comparado com o mesmo indicador do BC.

Porém, apesar dos gastos do BAC serem um pouco maiores neste patamar de

resistência, o mesmo apresentou ganhos no tempo de execução das obras analisadas em questão. Houve, por exemplo, uma redução de 65 horas x homens na betonagem de cada laje com a utilização do BAC em relação ao BC (ALCOFORADO, 2013).

Além disso, Alcoforado (2013) destaca também a melhoria do acabamento na superfície da estrutura, a inexistência de ninhos de betonagem e a economia nas formas de betão, pois devido a eliminação do uso do vibrador na betonagem, há um desgaste menor na forma.

2.2 BAC COMO MATERIAL SUSTENTÁVEL

De acordo com a IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2019), em 2019 a construção civil foi responsável por 40% do consumo de energia da União Europeia, o que representa, segundo dados de 2018 da PORDATA (Base de dados de Portugal Contemporâneo), cerca de 12% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) do continente europeu e 11,2% em Portugal (Tabela 2). Sendo assim, práticas sustentáveis tem um peso cada vez mais significativo no mercado da construção, sendo analisados, constantemente, diferentes meios de manter o ritmo e a qualidade da construção sem prejudicar o ambiente (BRAGANÇA; TAVARES, 2016).

Tabela 2 – Emissões de GEE na construção civil em relação aos demais setores da economia (%)

Período	UE (%)	Portugal (%)
2000	13,3	14,2
2002	12,6	12,8
2004	12,1	13,0
2006	12,1	12,7
2008	12,1	12,7
2010	11,3	13,3
2012	11,0	11,5
2014	11,1	11,8
2016	11,2	11,1
2018	11,8	11,2

Fonte – PORDATA - Base de dados Portugal Contemporâneo.

Nesse sentido, a escolha de materiais ambientalmente amigáveis é uma saída. Porém, devido a existência de diversas metodologias de análise, escolher o material mais adequado tornou-se uma tarefa complexa. Uma das metodologias mais conhecidas e utilizadas é a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA, do inglês *Life Cycle Assessment*), regido pela ISO 14040 (2006), a qual avalia a carga ambiental de produtos e serviços durante todo o ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima até sua disposição final (CUNHA, 2016).

Para tal, utilizam-se inventários contendo entradas e saídas de cada estágio do ciclo

de vida. Usualmente inclui os seguintes estágios, sendo o transporte considerado em todas as fases (ZAMBRANA-VASQUEZ *et al.*, 2015): extração de matéria prima, produção dos componentes, manufatura e montagem, uso e disposição final.

Porém, um levantamento detalhado de todas as cargas ambientais de um bem ou serviço é trabalhoso e complexo, sendo sua eficácia diretamente relacionada com a necessidade de um aplicador com experiência e habilidade, visto que não existe um único método para a coleta de dados. Tal fato faz com que muitas empresas façam de forma superficial ou mesmo abandonem essa análise. Raramente, a LCA é utilizada na fase de escolha de materiais na construção civil (COSTA, 2012).

Tendo em vista essa dificuldade, alguns autores, como Morini (2019), buscaram simplificar esse estudo, utilizando apenas a energia incorporada e a pegada de carbono como métricas para avaliar a carga ambiental de um material. Tal análise é uma forma rápida e confiável de obter informações que permitam aos envolvidos definirem, desde o início, materiais de menor impacto ambiental.

De acordo com DING (2004), a energia incorporada é “a energia consumida durante a extração, processamento da matéria prima, manufatura dos materiais de construção e componentes, mais a energia utilizada nos vários processos durante a construção e a demolição dos prédios”. Essa energia consumida refere-se a quantidade de combustíveis fósseis utilizada para produzir um determinado bem ou serviço.

Assim, o resultado mais importante da avaliação da energia incorporada é a quantidade de combustível fóssil consumido (entrada, E_{cons}) em relação ao bem produzido (saída, E_{prod}), expresso em energia ou massa. Esta relação entrada/saída, apresentada na equação 2.1, é chamada de retorno de investimento (EROI, do inglês *Energy Return of Investment*) (AGOSTINHO; SICHE, 2014).

$$EROI = \frac{E_{cons}}{E_{prod}} \quad (2.1)$$

Já a pegada de carbono pode ser definida, conforme Wiedmann e Minx (2008), como uma medida da quantidade total de emissões de CO_2 que é direta e indiretamente causada por uma atividade ou é acumulada ao longo dos ciclos de vida de um produto. O seu resultado é expresso em $CO_{2,eq}$, o que corresponde a medida de todos os gases de efeito estufa (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hexafluoreto de enxofre e trifluoreto de nitrogênio) que individualmente são emitidos.

Através da pegada de carbono de uma empresa ou organização pode-se verificar a evolução das emissões ao longo de um intervalo de tempo, o que permite realizar várias comparações entre anos diferentes e torna possível avaliar a eficiência das políticas ambientais adotadas. Adicionalmente, a pegada de carbono serve como indicador de desenvolvimento sustentável e de proteção ambiental, auxiliando a implementação de estratégias ambientais (CARBALLO-PENELA; DOMÉNECH, 2010).

Para o caso específico do BAC, conforme apresentado no subcapítulo anterior, o cimento é o material empregado com maior emissão de dióxido de carbono e o que possui maior consumo energético. Dentre os insumos energéticos necessários para o seu processo de fabricação no Brasil, mais de 75% são referentes a fontes não renováveis (óleo diesel, coque de petróleo, carvão mineral, gás natural e óleo combustível), conforme apresenta a Figura 1 (EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

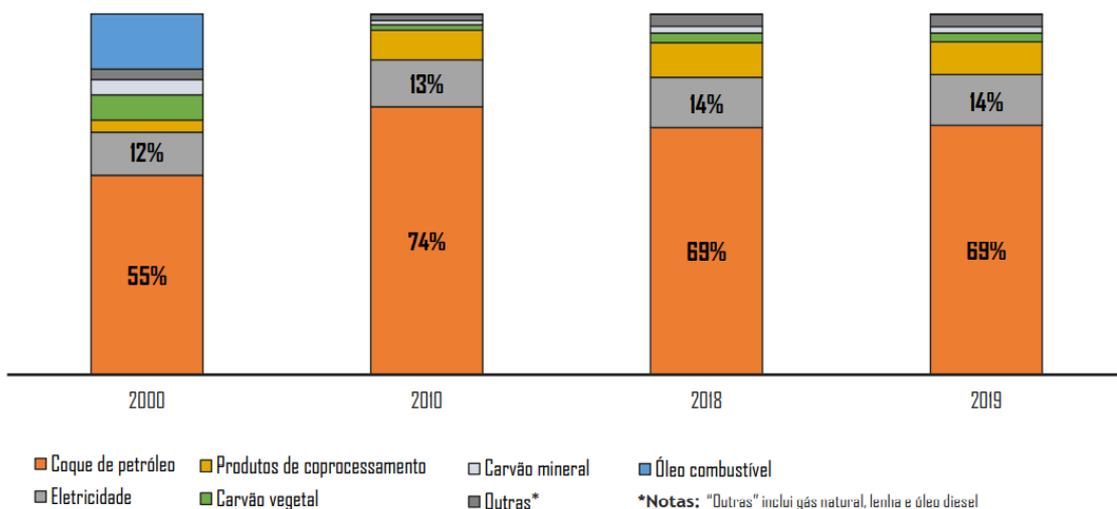


Figura 1 – Consumo das fontes energéticas utilizadas na produção do cimento.

Fonte – EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2020).

A fim de minimizar os impactos ambientais, a grande estratégia para a redução tanto da pegada de carbono quanto da energia incorporada ao BAC, é a redução de cimento, solução apresentada no subcapítulo anterior, combinada ao uso de adições. Diversos estudos como Wcislo e Kuniczuk (2013), Matos *et al.* (2018), Matos, Sakata e Prudêncio (2019) e Matos, Foiato e Prudêncio (2019) comprovaram que a redução do consumo de cimento reduz a pegada de carbono gerada pelo BAC.

Especificamente no estudo de Wcislo e Kuniczuk (2013), foram produzidas duas composições de BAC, ambos de classe C30/37, com adição de cinza volante e com consumos de cimento de 285 e 340 kg/m³ (Tabela 3). Dentre os diversos resultados obtidos pelo autor, a

emissão de $CO_{2,eq}$ referente a produção e transporte dos materiais empregados, a produção do betão e ao total estão contidos na Tabela 4.

Tabela 3 – Composições de BAC de Wcislo e Kuniczuk (2013)

Materiais utilizados no BAC	ECO BAC	Green BAC
CP (kg/m^3)	285	340
FA (kg/m^3)	100	190
Areia (kg/m^3)	700	652
Brita (kg/m^3)	1060	985
SP 1 (%*)	2,24	-
SP 2 (%*)	-	2,44
Estabilizador (%*)	0,27	-
Água	170	160

Nota: CP = Cimento Portland, FA = Cinza Volante, SP 1 = Superplastificante 1, SP 2 = Superplastificante 2, %* = Porcentagem em relação a massa de cimento utilizada.

Fonte – Adaptado de Wcislo e Kuniczuk (2013).

Analisando os resultados obtidos pelo autor, percebe-se que no quesito produção dos materiais empregados, o cimento é o que gera a maior diferença de emissão de $CO_{2,eq}$ entre as composições, cerca de 16,2%. No transporte de materiais, outros componentes apresentaram cerca de 38% a mais de emissões no Green BAC, devido ao consumo de cinza volante nessa composição ser quase o dobro da outra. Porém, ainda nessa categoria, o transporte do cimento é o segundo quesito que gera maior diferença entre as composições, cerca de 16,1%.

Já na produção do betão, as emissões são as mesmas, visto que em termos de execução não há diferença entre as composições. Entretanto, no total de emissões o ECO BAC apresentou cerca de 14,2% a menos de emissão de $CO_{2,eq}$ que o Green BAC, comprovando o impacto do consumo de cimento na pegada de carbono.

Porém, é importante ressaltar que um baixo consumo de CP - quando mal equilibrado com adições e adjuvantes - pode resultar em betões com baixa resistência. Assim, uma outra forma simples e comumente utilizada de avaliar a eficiência ecológica de um betão é o índice de ligantes (b_i), em $kg/m^3/MPa$, que mede o consumo de aglomerantes (cimento e adições) por m^3 de betão para uma unidade de resistência à compressão (MPa) (DAMINELI *et al.*, 2010).

Conforme Matos, Sakata e Prudêncio (2019), índices de até $5 kg/m^3/MPa$ são indicadores de betões ecoeficientes, enquanto que em betões convencionais, esse valor costuma

Tabela 4 – Comparação da pegada de carbono entre um ECO BAC e um Green BAC

Componentes	ECO BAC	Green BAC
Produção dos materiais (CO_2eq/m^3)		
Cimento	265,06	316,21
Agregados	3,27	3,04
Outros componentes	0,05	0,05
Total	268,38	319,30
Transporte dos materiais (CO_2eq/m^3)		
Cimento	9,78	11,66
Agregados	30,19	28,08
Outros componentes	2,29	3,73
Total	42,25	43,47
Produção de betão (CO_2eq/m^3)		
Eletricidade	2,08	2,08
Diesel	0,83	0,83
Óleo combustível	0,98	0,98
Total	3,89	3,89
Total de emissões (CO_2eq/m^3)		
Total	314,51	366,65

Fonte – Adaptado de Wcislo e Kuniczuk (2013).

estar entre 10 a 20 $kg/m^3/MPa$. Até o presente momento, o menor conteúdo de aglutinante relatado para um BAC de alto desempenho foi de 4,7 $kg/m^3/MPa$, como demonstra a Tabela 5, ordenada em ordem decrescente de consumo de cimento.

Na comparação da Tabela 5 foram excluídos os BACs que incluíam nanomateriais, fibras e polímeros, ou que eram curados sob alta temperatura e pressão. Ainda, de acordo com a tabela, o índice de ligantes (b_i) médio é de 6,0, sendo 8,3 o valor mais alto e 4,7 o valor mais baixo. É importante ressaltar que estes extremos não correspondem ao menor e maior valor da resistência característica a compressão do betão.

Sendo assim, é possível perceber uma alta utilização de cimento e adições não resulta, necessariamente, em um betão mais resistente, mas em um betão altamente poluente. O contrário também verdadeiro: uma baixa utilização de cimento e adições não resulta, necessariamente, em um betão menos resistente, mas em um betão menos poluente. Isso demonstra que é possível formular uma composição de BAC que encontre o ponto de equilíbrio entre a resistência do betão e a sua emissão de poluentes.

Tabela 5 – Índices de ligantes e emissão de CO₂ em BACs encontrados na literatura

Referências	Aglomerantes (kg/m ³)					CO ₂ (kg/m ³)	fck (MPa)	bi (kg/m ³ /MPa)
	CP	FA	MK	LF	SF			
Sukumar, Nagamani e Raghavanb (2008)	583	50				584	81,3	7,2
Nepomuceno (2005)	472	92				474	56,8	8,3
Pelisser e Vieira A. Bernardin (2018)	472		52			481	67,2	7,2
Liu (2010)	437	80				439	69,7	6,3
Guneyisi, Gesoglu e Ozbay (2010)	383				68	384	71,1	5,4
Vejmelkova <i>et al.</i> (2011)	364		243			407	67,7	6,0
Yazici (2008)	360	180		734	60	369	79,0	4,7
Jalal <i>et al.</i> (2015)	360				40	361	56,5	6,4
Uysal e M. (2011)	357	193				361	67,5	5,4
Sebaibi <i>et al.</i> (2013)	357	40				358	50,0	7,2
Celik <i>et al.</i> (2015)	317	136				320	51,0	6,3
Sahmaran, Yaman e Tokyay (2009)	300	200		68		305	59,1	5,2
Proske <i>et al.</i> (2014)	280	162				284	53,9	5,3
Zhao <i>et al.</i> (2015)	276	184				280	56,0	5,0
Matos, Sakata e Prudêncio (2019)	255	109				257	55,3	4,7

Nota: CP = Cimento Portland, FA = Cinza Volante, MK = Metacaulino, LF = Fíler, SF = Sílica de fumo, fck = Resistência característica a compressão do betão, bi = índice de ligantes.

Fonte – Autoria própria (2021).

2.3 BAC EM ESTRUTURAS PRÉ-ESFORÇADAS

Estruturas pré-esforçadas ou protendidas, como são conhecidas no Brasil, são aquelas em que é introduzido um estado prévio de tensões capazes de melhorar sua resistência e o seu comportamento, sob diversas condições de carga. Sua utilização é vasta, desde indústrias de pré-fabricados até mesmo execuções *in loco* utilizam este sistema construtivo em vigas, pilares, painéis, reservatórios, silos, etc.

Para se confeccionar uma peça tanto de betão armado (RCC, do inglês *reinforced cement concrete*) quanto betão pré-esforçado, os materiais utilizados são os mesmos. A principal diferença entre eles está no tipo de aço empregado e no procedimento construtivo.

Nos elementos fletidos de RCC, a armadura longitudinal é simplesmente colocada na estrutura e só passa a trabalhar quando o betão começa a se deformar, após a retirada do escoramento. Diz-se então que esta armadura é do tipo passiva, ou seja, só funciona depois de solicitada pela deformação advinda do betão.

Já em elementos fletidos de betão pré-esforçado (PC, do inglês *prestressed concrete*), mesmo que não haja a retirada do escoramento, a armadura longitudinal principal - constituída

por aço de protensão - é distendida por elementos (macacos de protensão) externos à estrutura e a partir daquele instante, passa a resistir esforços, independente da movimentação do betão. Diz-se então que a armadura de pré-esforço é chamada de “ativa”.

Quanto ao aço empregado, aquele empregado no PC caracteriza-se por uma elevada resistência (até três vezes maior que o aço do RCC) e pela ausência de patamar de escoamento. A utilização deste tipo de aço nas estruturas em betão armado é proibido, devido aos alongamentos excessivos que produziriam fissuras muito abertas, situação que não ocorre no pré-esforço devido ao alongamento prévio do aço.

Ainda que haja diferenças, as peças de betão armado e pré-esforçado funcionam de mesma forma, sendo as regras de projeto e execução iguais para as duas. As normas técnicas que regem ambos os casos são a NBR 6118 (2014) no Brasil e a NP EN 1992-1-1 (2010) em Portugal.

Quanto ao seu custo, Carvalho (2017) afirma que as estruturas pré-esforçadas são, em diversas situações, mais econômicas que as executadas com madeira, aço ou mesmo betão armado. Em relação as estruturas de madeira e de aço, a manutenção do PC é mais simples e mais barata. Já em relação as de betão armado, os elementos de PC tem a fissuração impedida ou mais controlada na região tracionada dos trechos fletidos, o que reduz o risco de corrosão das armaduras e durabilidade das estruturas.

Além das características citadas acima, Cachim (2016) relaciona outras vantagens do betão pré-esforçado face as estruturas de betão armado como a redução das deformações; a redução da seção transversal para vão iguais, o que permite estruturas mais esbeltas, por exemplo; a capacidade de vencer vãos maiores; a redução do peso próprio; e a utilização racional dos betões e aços de alta resistência, pois no caso do aço, por exemplo, sem o pré-esforço ele não atingiria tensões de cedência (tensões de escoamento, no Brasil) tão elevadas.

Apesar das vantagens, o autor também cita certas desvantagens quanto a sua utilização como a necessidade de mão de obra especializada e de equipamentos específicos como o macaco hidráulico, por exemplo; a necessidade de maior controle de execução, devido a maior complexidade do sistema; o fato de terem um peso final relativamente alto, se comparado as estruturas metálicas e de madeira; e por fim, o fato de que para vãos ou cargas pequenas, as soluções em PC não são, em geral, competitivas em termos econômicos.

Quanto a sua classificação, inicialmente, ela pode ser obtida considerando o mecanismo de aderência entre a armadura ativa e o betão. Desta forma tem-se os seguintes tipos de PC (CHOLFE; BONILHA, 2015):

- Com aderência inicial (também chamado de pré-tensão): a aderência entre a armadura e o betão é iniciada quando do lançamento do mesmo, sendo a tensão aplicada no aço realizada antes do lançamento do betão;
- Com aderência posterior (também chamado de pós-tensão): a tensão aplicada no aço é feita após o endurecimento do betão e portanto, cria a aderência entre a armadura e o betão nesse momento;
- Sem aderência (também chamado de pós-tensão não aderente): neste caso a armadura também é tensionada após o endurecimento do betão, mas o aço não é aderido ao betão devido a utilização de bainhas (funcionam como um revestimento da armadura).

De uma maneira geral, as propriedades do betão que são analisadas para estruturas em RCC são a resistência à compressão, a resistência à tração, o módulo de elasticidade e o peso volúmico. Porém, no caso do PC há outros dois quesitos essenciais em seu estudo: a fluência (do inglês, *creep*) e a retração do betão (do inglês, *shrinkage*).

Quanto a retração do betão, ela pode ser entendida com uma perda de volume de betão ao longo do tempo e que tem diversas origens. De forma simplificada, conforme explica a norma NP EN 1992-1-1 (2010), a retração pode ser dividida em duas parcelas: por secagem e autogénea (ou no Brasil, autógena). A retração por secagem deve-se a uma perda de água lenta do betão para o meio ambiente e é explicada pela presença de meniscos de água na superfície do betão, quando a taxa de evaporação é superior à taxa de exsudação. Esses meniscos geram uma pressão capilar negativa que tendem a juntar as partículas sólidas e conseqüentemente causam retração.

Já a retração autógena é provocada pelas reações químicas que ocorrem na hidratação do cimento e se dá, principalmente, nos primeiros dias após a betonagem (embora o processo se mantenha ativo durante vários anos em ritmo lento). Essa perda ocorre devido ao volume absoluto dos produtos de hidratação ser menor do que o volume total do cimento não hidratado e água antes da hidratação (CACHIM, 2016).

Ambas as parcelas de retração podem ocorrer tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, causando deformações no betão que podem ser elásticas (reversíveis), viscoelásticas (parcialmente reversíveis, consistindo de uma fase viscosa e outra elástica) ou plásticas (não reversíveis). A perda excessiva de água de amassamento de uma mistura fresca, por exemplo, causa uma deformação plástica. Esse fenômeno pode ser reduzido pelo ajuste da dosagem do

betão de forma a evitar exsudação, ou pela proteção da peça contra evaporação e ou ainda, pelo uso de adjuvantes retentores de água (METHA; MONTEIRO, 2014).

Quanto a fluência, sua definição pode ser dada como "um aumento de deformação sob carga constante" e conforme a NP EN 1992-1-1 (2010), ela depende da composição do betão, da idade no primeiro carregamento, da duração e intensidade das cargas aplicadas, etc. Juntamente com a retração, seus efeitos apresentam uma série de consequências indesejáveis, tais como: aumento de flechas em lajes e vigas, perdas de tensão em estruturas de PC, aumento da curvatura de pilares, dentre outros.

Se comparado com o betão convencional, os resultados de fluência e retração do BAC divide a opinião entre diversos autores. De acordo com D'Ambrósia et al. (2005), a retração do BAC pode ser superior a do BC em até 50%. Já para Persson (2005), valores semelhantes podem ser encontrados para fluência e retração, porque embora o BAC apresente menor quantidade de agregado graúdo que o BC (o que aumenta a sua fluência e retração), ele possui melhor empacotamento das partículas no estado fresco e maior resistência (que reduzem a fluência e a retração). Ou seja, o autor sugere que um efeito acaba equilibrando o outro.

Além disso, os BACs possuem, em geral, resistência superior às de betões convencionais. Tal propriedade é de grande importância em elementos pré-esforçados, pois betões de alta resistência permitem a redução das dimensões da peça e consequente redução do peso próprio, além de possuírem, em sua maior parte, módulo de elasticidade superior à betões convencionais, o que diminui tanto as deformações imediatas quanto as que ocorrem a longo prazo, ou seja, reduz as perdas de protensão oriundas da retração e fluência (CHOLFE; BONILHA, 2015).

Entretanto, os modelos de previsão desses fenômenos foram desenvolvidos para o betão convencional e, como todo material recente, o BAC apresenta poucos resultados experimentais de fluência e retração. Assim, diferente de outras propriedades - como por exemplo, a resistência à compressão - a previsão da fluência e da retração é um problema complexo e ainda não entendido completamente pela ciência (WENDLING; SADHASIVAM; FLOYD, 2018).

2.4 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

As características no estado fresco do BAC governam as propriedades fundamentais desse betão, as quais lhe conferem a auto-compacidade, ou seja, determinam o seu comportamento da fluidez e a sua deformabilidade. São elas (GOMES; BARROS, 2009):

- a) Habilidade de preenchimento, relacionada diretamente com a fluidez elevada e

coesão da mistura;

- b) Habilidade passante, relacionada diretamente com a viscosidade da pasta e as características dos agregados;
- c) Resistência à segregação, relacionada diretamente com a viscosidade e coesão da mistura;

Para que o betão disponha da habilidade de preenchimento ou também chamada de deformabilidade, além da elevada fluidez, é necessário que o betão possua elevada coesão para que, ao ser lançado, não ocorra a segregação da mistura, possibilitando o preenchimento de todos os espaços, mantendo sua homogeneidade (NEVILLE, A.M.; BROOKS, 2013).

Uma grande deformabilidade do betão pode provocar um processo de segregação, caso este não possua coesão e viscosidade adequadas. Do mesmo modo, uma mistura com baixa deformabilidade também pode provocar segregação, devido ao bloqueio do fluxo do BAC ao passar por obstáculos ou restrições, além do betão apresentar baixa fluidez (GUETTI, 2012).

Quanto a habilidade de passagem, pode-se defini-la como a propriedade que caracteriza a capacidade do BAC de passar por entre obstáculos, como, por exemplo, armaduras, sem que haja segregação ou obstrução do fluxo (EFNARC, 2005). Ela está ligada com as características dos agregados, principalmente no que diz respeito a dimensão máxima característica dos agregados graúdos, que podem bloquear o fluxo do betão.

Já a resistência à segregação do betão, também conhecida como coesão, pode ser definida como a separação dos constituintes de betão, de modo que sua distribuição não seja mais uniforme. Na maior parte dos casos, a diferença entre as dimensões das partículas que compõem os agregados é a principal causa da segregação, que pode ser controlada pela escolha de granulometrias adequadas e cuidado no manuseio (NEVILLE, A.M.; BROOKS, 2013).

Estas propriedades de auto-compacidade devem ser qualificadas através de ensaios e portanto, na Tabela 6 são citadas as normas brasileiras e portuguesas que regem estes procedimentos. Porém, é a norma NP EN 206 + A1 (2017) que define os limites aceitos para cada um desses ensaios, conforme apresentado na seção 4.1. É importante destacar também que as normas de ambos países são bem semelhantes pelo fato de terem seguido os mesmos documentos de referência sobre o BAC como, por exemplo, a EFNARC (2002) (MENDES; BAUER; SILVA, 2017).

Estas propriedades são extremamente sensíveis a mudanças na composição do betão como alterações na granulometria dos agregados, no teor de adições e/ou adjuvantes utilizados,

Tabela 6 – Principais ensaios no estado fresco com suas respectivas normas no Brasil e Europa.

Ensaio	Propriedade avaliada	Localidade	Norma
Slump flow test	Habilidade de preenchimento	Brasil	NBR 15823-2 (2017)
	Resistência à segregação	Europa	NP EN 12350-8 (2019)
Slump flow T500	Habilidade de preenchimento	Brasil	NBR 15823-2 (2017)
	Fluidez	Europa	NP EN 12350-8 (2019)
Funil V	Fluidez	Brasil	NBR 15823-5 (2017)
		Europa	NP EN 12350-9 (2010)
Caixa L	Habilidade passante	Brasil	NBR 15823-4 (2017)
		Europa	NP EN 12350-10 (2010)
Anel J	Habilidade passante	Brasil	NBR 15823-3 (2017)
		Europa	NP EN 12350-12 (2010)
Coluna de segregação	Resistência à segregação	Brasil	NBR 15823-6 (2017)
		Europa	NP EN 12350-11 + Errata 1 (2012)

Fonte – Autoria própria (2021).

no teor de cimento, etc. Portanto, no subcapítulo 4.1 foram apresentados os comportamentos de cada uma das propriedades face as mudanças nas composições de BAC juntamente com os resultados obtidos. Já em relação aos ensaios realizados, a execução e valores admitidos pelas normas brasileira e portuguesa, estão contidos no subcapítulo 3.5 da metodologia experimental.

2.5 REOLOGIA DO BETÃO

A reologia, de modo resumido, compreende o estudo das deformações e escoamento dos materiais (CARNEIRO, 2018). É um ramo da física sugerida pela primeira vez por Bingham (1933) para descrever a deformação e escoamento de materiais quando submetidos a esforços originados por forças externas.

Todos os métodos de ensaio normalizados para betão tentam avaliar suas propriedades no estado fresco em termos de uma quantidade única, considerando - de forma implícita - que esse material se comporta da maneira mais simples possível, como um fluido newtoniano. Porém, essa suposição não é correta, uma vez que o betão exige a imposição de uma tensão ou força mínima para o início do escoamento, indicando que o seu comportamento não pode ser caracterizado por uma constante única (GHIO, 1993).

Os modelos reológicos independentes do tempo, como o modelo plástico de Bingham (1933), permitem ajustar os dados da tensão de corte/cisalhamento, taxa de corte/cisalhamento e viscosidade. Na literatura, devido a uma vasta evidência experimental das propriedades reológicas do betão no estado fresco, concluiu-se que o material se comporta como um fluido

plástico ou binghamiano (GHIO, 1993; FERRARIS, 1999; WALLEVIK, 2006).

A explicação para o comportamento de um fluido plástico ou binghamiano é que o material, em repouso, apresenta uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir a qualquer tensão inferior à tensão de cedência e se comporta como um sólido elástico rígido. Caso a tensão de escoamento seja excedida, a estrutura se desintegra e o sistema se comporta como um fluido newtoniano. Quando a tensão de corte/cisalhamento aplicada for reduzida e atingir valores inferiores à tensão de escoamento, a estrutura tridimensional é recuperada (FERRARIS, 1999).

Os ensaios reológicos, ao contrário do que acontece com os ensaios de trabalhabilidade, permitem caracterizar de forma quantitativa o comportamento do material através da tensão de cedência e da viscosidade plástica (FIGUEIRAS, 2006).

Assim, a tensão necessária ao escoamento do material, a tensão de corte também chamada de tensão de cisalhamento (τ), é igual a soma da tensão de cedência (τ_0) e da multiplicação entre a taxa de corte (γ) e a viscosidade plástica (η), conforme apresentado na Equação 2.2.

$$\tau = \tau_0 + \eta * \gamma \quad (2.2)$$

A tensão de cedência (τ_0), é a mínima energia necessária para que o betão tenha movimento, ou seja, inicie o seu escoamento (KRAUS, 2006). Para Klein (2008), a tensão mínima no BAC deve ser bem mais baixa que a do betão convencional a fim de garantir a fluidez necessária ao betão.

Já a viscosidade plástica (η), é a propriedade que caracteriza a resistência à deformação durante o processo de escoamento do betão em seu estado fresco e requer valores mais altos que o betão convencional (CARNEIRO, 2018). A viscosidade deve ser moderada para que haja a estabilidade da mistura (KRAUS, 2006).

A reologia do betão fresco tem sido estudada com determinações que variam entre métodos de ensaio simples e práticos, como o ensaio de abatimento de tronco de cone, até equipamentos mais sofisticados que determinam as curvas de escoamento do material, como os reômetros (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

Existem diversos tipos de reômetros, porém um dos mais utilizados no estudo do BAC é o reômetro BML. Trata-se de dois cilindros coaxiais que contém o material a ser ensaiado entre eles (Figura 2). Conforme é aplicado uma velocidade de rotação no cilindro exterior,

forma-se uma força tangencial entre os dois cilindros, permitindo a obtenção de uma taxa de cisalhamento aproximadamente uniforme ao longo de toda a amostra. Essa uniformidade depende da distância existente entre os cilindros, pois quando distância for pequena a taxa de cisalhamento é considerada uniforme (SATO, 2015).

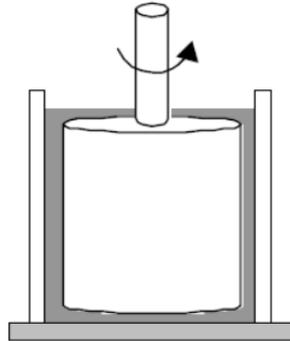


Figura 2 – Esquema de funcionamento do reômetro BML.
Fonte – Hackley e Ferraris (2001).

A taxa da tensão de cisalhamento é medida, neste caso, em termos da deflexão do cilindro interno, que mantém-se imóvel. Além disso, é importante ressaltar que o material ensaiado no equipamento não é o betão, mas uma pasta de cimento (cimento, adições, água e adjuvante) (SILVEIRA, 2014).

Isto porque os resultados obtidos a partir de um reômetro só podem ser interpretados caso o fluido avaliado seja homogêneo. Devido a extensa variação da distribuição granulométrica das partículas presentes em uma mistura de betão, esse material não pode ser considerado como homogêneo (GHIO, 1993).

Porém, como a pasta de cimento corresponde a maior parte da área superficial do betão e é responsável pela fluidez e coesão também do betão, as propriedades reológicas da pasta de cimento podem ser relacionadas com aquelas do BAC. De uma maneira geral, o comportamento reológico das pastas de cimento fresco é semelhante ao dos betões, ou seja, se aproxima de um fluido binghamiano (CASTRO; LIBORIO; PANDOLFELLI, 2011).

2.6 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Dentre as principais propriedades mecânicas do betão destacam-se a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a resistência à tração. Conforme Khayat e Schutter (2014), a resistência à compressão é considerada uma das propriedades mais importantes do betão, uma vez que através dela é possível referenciar diversas outras propriedades, como a efetividade de uma adição ou até mesmo, as emissões de CO_2 - como apresentado na seção 2.2.

Ainda em relação a resistência à compressão, o comportamento do BAC é similar ao betão convencional, quando na mesma faixa de resistência. Porém, a faixa de resistência do BAC apresenta muitos resultados superiores ao BC (entre 20 a 150 MPa), devido a ação dos superplastificantes que reduzem a quantidade de água de amassadura e consequentemente, reduzem a porosidade do material. Essa grande diferença também pode ser explicada pela maior presença de finos no auto-compactável, o que torna a matriz do cimento mais densa, melhorando o seu comportamento mecânico (REPETTE, 2011).

É importante ressaltar que quando se compara o BC com o BAC, para altas resistências à compressão, percebe-se que no BAC ocorre uma ruptura frágil na interface aço- betão. Este fato ocorre, pois ele possui uma maior capacidade de aderência, ou seja, maior envolvimento das barras de aço da estrutura, o que gera um acréscimo no atrito da barra de aço com o betão (se comparado com o BC) e, portanto, aumenta a probabilidade de ruptura brusca da interface aço- betão (ISA; CEA; RENÓFIO, 2004).

Quanto a resistência à tração, ela pode ser obtida através de três tipos de ensaio: tração direta, tração por compressão diametral e tração na flexão (Figura 3). No entanto, esses diferentes métodos de ensaios fornecem diferentes valores de resistência à tração para um mesmo material, sendo o ensaio de compressão diametral o mais usual (devido a dificuldade de execução do ensaio de tração direta) (NEVILLE, A.M.; BROOKS, 2013).

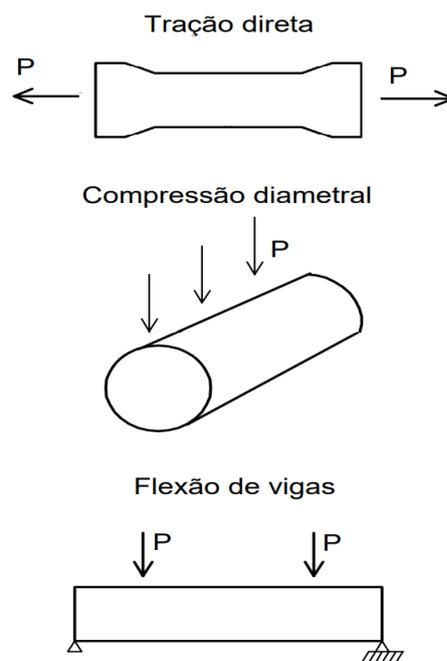


Figura 3 – Representação dos tipos de tração
Fonte – Adaptado de Araújo (2001).

Já em relação ao módulo de elasticidade (ME) ou módulo de *Young*, ele pode ser definido como a razão entre a tensão e a deformação que, inicialmente, apresenta comportamento linear. Ao contrário de materiais idealizados que seguem a Lei de *Hooke* (Equação 2.3), ou seja, que mantém uma proporcionalidade entre a força aplicada e a deformação, o betão não possui proporcionalidade entre esses termos. Porém, de forma simplificada, define-se apenas dois módulos (Figura 4): o módulo tangente inicial (E_{ci}) que se refere a tangente da curva na origem do gráfico e o módulo secante (E_{cm}) que supõe um comportamento elástico linear.

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.3)$$

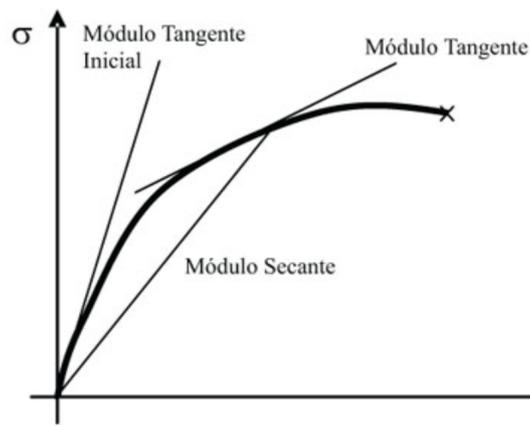


Figura 4 – Curvas tensão-deformação típicas para o betão
Fonte – Adaptado de NEVILLE, A.M.; BROOKS (2013).

Devido ao BAC conter menor quantidade de agregado graúdo, seu módulo de elasticidade tende a ser menor (até 10%) que o do BC, dado a uma mesma resistência à compressão. No entanto, essa diferença tende a variar de acordo com o nível de resistência do betão de sua composição, dando a entender que não é possível estabelecer uma comparação generalizada com relação a essa propriedade (CARNEIRO, 2018).

Porém, um BAC com maior teor de britas (cujo espalhamento está entre 550 mm e 650 mm), pode resultar em um módulo da mesma ordem que um betão convencional. Ou ainda, a depender das condições de cura dos provetes a diferença de ME entre eles tende a reduzir (REPETTE, 2011). De modo a simplificar o estudo das propriedades no estado endurecido, na Tabela 7 são citadas as normas brasileiras e europeias que regem estes procedimentos. Tal como ocorre no caso das propriedades do estado fresco, as normas de ambos países são bem semelhantes pelo fato de terem seguido os mesmos documentos de referência sobre o BAC como, por exemplo, a EFNARC (2002) (MENDES; BAUER; SILVA, 2017).

Tabela 7 – Principais ensaios no estado endurecido com suas respectivas normas no Brasil e Europa.

Ensaio	Localidade	Normas
Resistência à compressão axial	Brasil	NBR 5739 (2018)
	Europa	NP EN 12390-3 (2019)
Resistência à tração por compressão diametral	Brasil	NBR 7222 (2011)
	Europa	NP EN 12390-6 (2011)
Módulo de elasticidade	Brasil	NBR 8522 (2017)
	Europa	NP EN 12390-13 (2014) LNEC E 397 (1993)

Fonte – Autoria própria (2021).

Através da Tabela 7 percebe-se que há duas normas na Europa para a determinação do módulo de elasticidade, isso ocorre pois a NP EN 12390-13 (2014) determina o ensaio para a obtenção do módulo de elasticidade secante, enquanto que a LNEC E 397 (1993), determina o módulo de elasticidade tangente inicial. Esta última é uma norma específica de Portugal, sendo encontrada versões parecidas para outros países europeus.

Por fim, a execução e valores admitidos pelas normas brasileira e portuguesa para os ensaios realizados estão contidos no subcapítulo 3.6 da metodologia experimental. Enquanto que no subcapítulo 4.2 foram apresentados os comportamentos de cada uma das propriedades face as mudanças nas composições de BAC juntamente com os resultados obtidos.

2.7 MATERIAIS CONSTITUINTES

A maior parte dos componentes do betão auto-compactável são os mesmos utilizados para a fabricação dos BC (EFNARC, 2005). Os únicos componentes atípicos são os finos minerais, visto que atualmente, a maior parte dos betões convencionais já utilizam algum tipo de adjuvante. No entanto, dadas as propriedades requeridas ao BAC no estado fresco deverá ter-se um cuidado maior na fase de seleção e caracterização dos materiais constituintes de um modo a garantir um comportamento uniforme e consistente (APEB, 2007).

Neste tópico serão tratados os materiais comumente utilizados no BAC, a fim de explicitar as propriedades do betão que cada material influencia e demais consequência do seu uso.

2.7.1 Cimento Portland

Assim como no Brasil, o cimento (ligante hidráulico) pode ser dividido em 5 grandes classes de acordo com a utilização de adições na norma europeia, como mostra a Tabela 8. Porém, uma diferença entre as normas é encontrada na classificação da resistência mecânica. Na NP EN 197-1 (2012) o cimento pode ser da classe mecânica 32,5, 42,5 ou 52,5 e ainda levar a sigla "SR" que remete a resistência à sulfatos. Quanto a resistência inicial a letra "N" indica uma resistência inicial usual e "R" uma elevada resistência inicial, sendo aplicável para qualquer cimento.

Já na norma brasileira, o cimento pode ser da classe de resistência 25, 32 e 40 e levar a sigla "RS" que denota resistência à sulfatos ou "BS" para baixo calor de hidratação. Quanto a resistência inicial, somente o CP V recebe o termo "ARI" que remete a uma alta resistência inicial.

Tabela 8 – Cimentos classificados conforme o uso de adições

Especificação	Cimentos europeus NP EN 197-1 (2012)	Cimentos brasileiros NBR 16697 (2018)	Clínquer (%)
Cimento Portland comum	CEM I	CP I e CP V-ARI*	95 - 100
Cimento Portland com diferentes adições (6 - 35%)	CEM II	CP II	65 - 94
Cimento Portland de alto forno (36 - 95%)	CEM III	CP III	5 - 64
Cimento Portland pozolânico (11 - 55%)	CEM IV	CP IV	45 - 89
Cimento Portland composto (18 - 49%)	CEM V	-	20 - 64

Nota: CP V-ARI* é equivalente ao CEM I 42,5R.

Fonte – Adaptado de NP EN 197-1 (2012) e NBR 16697 (2018).

Não existe qualquer restrição quanto ao tipo de cimento a utilizar no BAC, pois não há qualquer tipo de requisito especial para o mesmo. Todo o tipo de cimento Portland (CP), em conformidade com a NP EN 197-1 (2012), pode ser utilizado na produção do BAC (ARAÚJO, 2011). Porém, em Portugal, o tipo de CP mais utilizado no BAC é o tipo I, seguido pelos tipos II e III. Relativamente à classe de resistência mecânica, o tipo mais frequente é o 42,5, logo seguido do cimento da classe 52,5 (SILVA, 2013).

Os requisitos específicos do tipo e composição do cimento devem-se a três fatores, além do requisitos de resistência mecânica: finura, composição química e compatibilidade com o adjuvante utilizado (CARNEIRO, 2018).

Em relação à finura, quanto maior for a superfície específica das partículas de cimento, maior será a viscosidade plástica da pasta. O aumento da viscosidade está relacionado com o fato de que um cimento com uma superfície específica mais elevada possui um número maior de partículas, o que faz aumentar a área de contato com a água e conseqüentemente, sua resistência à compressão. Por outro lado, quanto mais fino o cimento, maior a dosagem de superplastificante necessária para alcançar a mesma trabalhabilidade, uma vez que a eficiência do adjuvante é influenciada diretamente pela finura do cimento (SILVA, 2013).

Além disso, quanto maiores os teores de C_3A (aluminato tricálcico) no cimento, maior será sua finura e maior teor de álcalis, o que demanda de uma proporção maior de adjuvante do tipo superplastificante e pode gerar algumas mudanças na propriedade de fluidez do BAC. Deste modo, o ajuste da dimensão as partículas de cimento através de adições tais como fíler calcário, escória de alto-forno, cinzas volantes ou sílica - materiais normalmente com elevada superfície específica - constitui um fator favorável (NAWA; IZUMI; EDAMATSU, 1998).

2.7.2 Agregados

Conforme a EFNARC (2005), os agregados usualmente utilizados na fabricação de betões convencionais servem para o BAC, sendo preferível empregar agregados limpos e com uma granulometria contínua. Tal recomendação é de extrema importância, pois uma distribuição granulométrica pouco contínua resulta em um maior consumo de cimento, uma menor fluidez da mistura e um aumento dos vazios entre os agregados, o que afeta as características mecânicas e de durabilidade do betão no estado endurecido (CALADO *et al.*, 2015).

Além disso, as características dos próprios agregados, nomeadamente, forma e textura das partículas, exercem grande influência nas propriedades do betão no estado fresco. Agregados com uma elevada superfície específica e textura áspera necessitam de maiores quantidades de pasta e água para obter elevada fluidez, enquanto que partículas arredondadas potenciam uma melhoria na fluidez e promovem uma redução na percentagem de vazios devido ao seu melhor empacotamento (FIGUEIRAS, 2013).

Conforme recomendação da NP EN 12620+A1 (2010), é preciso determinar a massa

volúmica, o índice de absorção de água, a dimensão máxima (d_{max}), o módulo de finura, o teor de finos e as relações d/D e D/d . Estas duas últimas relações referem-se às exigências da NP EN 12620+A1 (2010), em que d é a menor dimensão dos peneiros (da análise granulométrica) e S a maior. A relação D/d deve ser menor que 1,4 e a relação d/D , apesar de não possuir qualquer limitação de valor, serve de parâmetro para classificação da categoria do agregado, como apresenta a Tabela 9.

Tabela 9 – Requisitos gerais de granulometria de agregados

Agregado	Dimensão	Percentagem de passados em massa					Categoria G
		2D	1,4 D	D	d	d/2	
Grosso	$D/d \leq 2$ ou	100	98 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5	$G_c85/20$
	$D \leq 11,2$ mm	100	98 a 100	80 a 99	0 a 20	0 a 5	$G_c80/20$
	$D/d > 2$ e $D > 11,2$ mm	100	98 a 100	90 a 99	0 a 15	0 a 5	$G_c90/15$
Areia	$D \leq 4$ mm e $d=0$	100	95 a 100	85 a 99	-	-	G_F85
Agregado natural 0/8	$D=8$ mm e $d=0$	100	98 a 100	90 a 99	-	-	$G_{NG}90$
Granul. extensa	$D \leq 45$ mm e $d=0$	100	98 a 100	90 a 99	-	-	G_A90
		100	98 a 100	85 a 99	-	-	G_A85

Fonte – Adaptado de NP EN 12620+A1 (2010).

Conforme recomendação de Gomes e Barros (2009), o volume de agregados finos pode variar entre 40 e 50% do volume de argamassa do BAC e o de agregados grossos entre 28 e 35% do volume de betão. Além disso, segundo a especificação EFNARC (2005), a dimensão máxima do agregado grosso para o BAC não deve ultrapassar 20 mm, sendo usual variar entre 16 e 20 mm.

No Brasil, tais atribuições aos agregados são dadas na norma NBR 7211 (2019), além de outras propriedades como desgaste, substâncias nocivas e durabilidade, também apresentadas na NP EN 12620+A1 (2010).

2.7.3 Adições minerais

As adições minerais têm a função de melhorar a matriz do betão, uma vez que modificam o tamanho dos poros quer seja por efeito fíler (preenchimento de poros), quer seja devido ao efeito pozolânico (modificação do tamanho dos cristais: formação de novos, menores e menos porosos) (GUETTI, 2012).

Além disso, elas aumentam a compacidade dos materiais cimentícios, existindo

também evidências da melhoria ao nível da fluidez do betão fresco pelo efeito físico da forma esférica das partículas (efeito de rolamento) (NEPOMUCENO, 2005). Como o BAC requer um elevado volume de pasta, o uso de finos é prática comum na fabricação desse tipo de betão (EFNARC, 2005).

As adições permitem ainda uma redução na quantidade de cimento, o que reduz problemas associados com o calor de hidratação e a retração térmica. Porém, com a redução do consumo de cimento, o BAC pode sofrer um decréscimo de resistência, dependendo do tipo de adição empregada, e se torna mais atraente do ponto de vista econômico, para uma aplicação que não demande resistências elevadas (REPETTE, 2005).

A NP EN 206 + A1 (2017) classifica as adições em dois grupos de acordo com suas capacidades reativas com a água: adições do tipo I – quase inertes (por exemplo, o fíler calcário e o fíler de vidro moído) e adições do tipo II – pozolânicas ou potencialmente hidráulicas (por exemplo, escórias de alto-forno, cinzas volantes, sílica de fumo e metacaulino). As quase inertes provocam uma ação física no betão, proporcionando uma estrutura com maior compacidade, enquanto que as adições do Tipo II estão relacionadas com a melhora significativa da durabilidade do betão (GOMES; GETTU; AGULLÓ, 2003).

Nos subcapítulos seguintes serão detalhadas as adições mais frequentes no BAC: a cinza volante, a sílica de fumo, a escória de alto forno, o metacaulino e o fíler calcário.

2.7.3.1 Cinza volante

As cinzas volantes ((FA), do inglês *fly ash*) são um subproduto obtido quando se queimam carvões pulverizados, numa central de energia. Estas são obtidas por precipitação eletrostática ou mecânica das poeiras arrastadas dos gases de combustão da queima. Trata-se de um pó fino constituído principalmente por partículas esféricas e vítreas composto essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 (NUNES, 2001).

Existem diversos efeitos possíveis de ocorrer devido da adição de cinza volante ao betão. São eles:

- a) Melhora da deformabilidade e trabalhabilidade do betão devido ao efeito de rolamento, devido a sua forma esférica e elevada finura e conseqüentemente, aos baixos coeficientes de atrito entre as suas partículas e entre as partículas dos outros componentes (NEVILLE, 2016);
- b) Redução do calor de hidratação (o que aumenta o tempo de presa), do crescimento

da resistência nas primeiras idades e da sensibilidade às mudanças da quantidade de água do BAC (GONÇALVES; VIEIRA, 2019);

- c) Aumento da resistência ao ataque químico e da resistência à penetração dos cloretos (MUSTAPHA; SULAIMAN A. MOHAMED; UMARA, 2020);
- d) Atuação de forma semelhante aos agentes de viscosidade, ou seja, permitem aumentar a viscosidade no estado fresco obtendo assim, uma boa resistência à segregação, sem, no entanto, diminuir a fluidez (NEPOMUCENO, 2005);
- e) Maior substituição de cimento, o que reduz a retração térmica. Entretanto, níveis altos da adição podem produzir uma fração de pasta resistente ao escoamento (EFNARC, 2005).

Em Portugal, a produção de FA mantém-se em alta desde o início dos anos 2000, quando começou a ser utilizada em larga escala na construção civil do país. Em 2017, por exemplo, foram produzidas 411 mil toneladas de cinza volante através das duas centrais termoelétricas do país, cujo combustível é o carvão: a Central Termoelétrica do Pego e a Central Termoelétrica de Sines (GONÇALVES; VIEIRA, 2019).

Porém, durante o acordo de Paris de 2015, cujo objetivo era alcançar a descarbonização das economias mundiais e limitar o aumento da temperatura média global em menos de 2°C até 2050, o governo português decidiu adotar medidas para atingir esta meta. Dentre elas, aumentar o investimento em energias renováveis e acabar com a produção de energia com base no carvão (DUARTE, 2019).

Assim, em 2019, Portugal anunciou o fechamento das centrais de Pego e Sines até 2023 e conseqüentemente, fim da produção de cinzas volantes no país. Entretanto, o que vem gerado muitas discussões é o fato de Portugal não possuir nenhuma indústria que produza outros subprodutos, como a escória granulada de alto forno e a sílica de fumo. Desde então, a (DUARTE, 2019) anunciou que o custo do betão irá aumentar cerca de 10 a 15%, pois o cimento é mais caro que cinzas volantes e em caso de utilização de outras adições, as mesmas teriam de ser importadas.

Porém, do ponto de vista ambiental a decisão é extremamente positiva, visto que de acordo com (SILVA, 2013), a nível mundial, aproximadamente apenas 10% das cinzas são aplicadas a fabricação do betão, enquanto que cerca de 80% são lançadas na natureza (simplesmente enterradas) causando então, graves problemas ambientais. Os restantes 10% são utilizados em atividades secundárias, como, por exemplo, material de enchimento para estradas.

A norma europeia que determina requisitos e critérios de conformidade para a cinza volante é NP EN 450-1 (2012), porém a avaliação da conformidade é atribuição da NP EN 450-2 (2006). Para o caso das normas brasileiras, utiliza-se a NBR 12653 (2015).

2.7.3.2 Sílica de fumo

A sílica de fumo, também conhecida como sílica ativa no Brasil, é um subproduto da fabricação de silício e ligas de ferrossilício a partir de quartzo de elevada pureza e de carvão. Num forno elétrico, os vapores de óxido de silício (SiO) oxidam e condensam na forma de partículas esféricas extremamente finas de dióxido de silício (SiO_2) amorfo. Quando o forno é suficientemente aquecido e eficaz, o carbono é todo queimado obtendo-se a sílica isenta de carbono e com dimensões inferiores a 0,001mm (ARAÚJO, 2011).

Devido a extrema finura da sílica de fumo (SF, do inglês *silica fume*) e em função da forma esférica das partículas, há uma redução de espaço disponível para água. Tal efeito densifica a pasta do cimento, efeito esse denominado de empacotamento. Por este motivo, também é conhecida como microsílica ou nanosílica (REPETTE, 2005). O nome sílica ativa advém do fato de que na forma vítrea (amorfa) é altamente reativa. Ela produz um efeito microfíler e um efeito pozolânico durante o processo de hidratação do cimento, atuando na formação de uma microestrutura (CARNEIRO, 2018).

Sua utilização aumenta a densidade do betão, a estabilidade do betão no estado fresco - ou seja, há ausência de segregação e exsudação, a resistência mecânica (quando bem dosada) e a resistência ao desgaste e ao ataque químico, pois reduz a permeabilidade do betão aos íons cloreto. Também se verifica haver controle das reações álcalis-sílica, com o uso da sílica de fumo (ADIL; KEVERN; MANN, 2020).

Porém, é válido ressaltar que com a utilização da sílica, é recomendado o uso de adjuvantes superplastificantes, devido a necessidade de mais água e o aumento de coesão do betão, consistindo numa boa solução para as propriedades do betão fresco. Além disso, quando mal doseada, pode causar problemas de rápido endurecimento superficial, dificultando a execução do acabamento dos elementos de betão (ARAÚJO, 2011).

Os percentuais encontrados nas literaturas para emprego de sílica de fumo variam entre 5 e 25%. Entretanto, alguns pesquisadores afirmam que o percentual de 10% é o mais indicado (GOMES; BARROS, 2009), enquanto outros afirmam que o ideal é apenas 5% (ADIL; KEVERN; MANN, 2020). Porém, há pesquisadores que apenas indicam uma margem de uso,

como por exemplo, Smarzewski (2020) recomenda a utilização de no máximo 10%, pois além desta percentagem não há ganhos significativos que justifiquem o uso da sílica.

A norma europeia que determina requisitos e critérios de conformidade para a sílica de fumo é NP EN 13263-1 + A1 (2009), porém a avaliação da conformidade é atribuição da NP EN 13263-2 + A1 (2009). Para o caso das normas brasileiras, a NBR 13956-1 (2012) determina os requisitos necessários à sílica, a NBR 13956-2 (2012) determina os ensaios químicos, a NBR 13956-3 (2012) determina o índice de desempenho com o cimento Portland e por fim, a NBR 13956-4 (2012) determina a obtenção da finura da sílica.

2.7.3.3 Escória de alto forno

A escória granulada de alto forno (GGBFS, do inglês *Grounded granulated blast furnace slag*) é um subproduto da indústria siderúrgica e é obtida, inicialmente, em estado líquido nos altos-fornos durante a fabricação de ferro-gusa. Depois de fundida, ela é arrefecida por têmpera em água resultando em um produto vítreo granular que, depois de triturado, adquire uma finura semelhante à do cimento Portland (NEVILLE, 2016).

Esta é uma adição hidraulicamente ativa, bastante fina e com baixo calor de hidratação. Por este último fato, elevadas proporções de escória granulada de alto forno podem alterar a estabilidade da mistura de BAC, com riscos de segregação (EFNARC, 2005).

Na Europa não é muito comum a utilização da escória, pois sua disponibilidade não é abundante. Isso porque a produção do aço é feita, quase exclusivamente, em fornos elétricos através da fundição de sucata, diferentemente de países como os Estados Unidos e Brasil, onde grande parte do aço é produzida a partir de minérios em altos-fornos (SILVA, 2013).

Conforme, Wilson M. L. and Kosmatka (2016), ao contrário das cinzas volantes e da sílica de fumo, a escória apresenta-se sob a forma de partículas angulosas com superfície rugosa e de dimensão inferior a 45 μm , semelhante às do cimento. Os betões produzidos com esta adição apresentam, normalmente, uma baixa permeabilidade quando endurecido. Por este motivo, a GGBFS é habitualmente utilizada em betões que necessitem de maior resistência à ataques químicos, particularmente em ambientes marítimos (SIDDIQUE, 2008).

Além disso, existem diversos efeitos benéficos possíveis da adição de escória de alto-forno ao BAC. São eles (NEVILLE, 2016):

- a) Melhoria da trabalhabilidade do betão fresco, devido a uma melhor dispersão das partículas cimentícias e das características de sua superfície, que são lisas e

absorvem pouca água durante a mistura;

- b) Menor velocidade da liberação de calor, o que faz com que a temperatura de pico da hidratação do cimento seja menor e conseqüentemente, reduz os efeitos prejudiciais da elevada temperatura inicial na resistência e na permeabilidade. Porém, em temperaturas abaixo de 10°C, o desenvolvimento da resistência é lento e, portanto, o uso de escória de alto-forno não é recomendado;

As normas europeias que regulamentam esta adição são a NP EN 15167-1 (2008) e a NP EN 15167-2 (2008) que tratam, respectivamente, das definições (especificações e critérios de conformidade) e da avaliação da conformidade. Já no Brasil, não há norma específica que regulamente o uso da escória como adição, porém NBR 16697 (2018) limita a quantidade do material no cimento.

2.7.3.4 Metacaulino

O metacaulino, também conhecido como metacaulim no Brasil ou do inglês, *meta-kaolin* (MK), é um material pozolânico e uma forma desidroxilada da caulinita, argilomineral presente no caulino. Ele é formado quando o caulino é calcinado a uma temperatura entre 500 e 800°C. O caulino é um mineral argiloso, fino e branco que tem sido tradicionalmente utilizado na fabricação de porcelanas, enquanto que a caulinita é apenas o termo mineralógico aplicável às argilas de caulino (VELOSA *et al.*, 2013).

A qualidade do metacaulino é controlada durante a fabricação, resultando num material menos variável do que as pozolanas industriais, que são subprodutos. Quando usado para substituir o cimento em níveis de 5 a 10% por peso, o BAC produzido é geralmente mais coeso e menos propenso a segregar (SEELAPUREDDY; BOMMISSETTY; SESHAGIRI, 2020).

Poon *et al.* (2001) mostraram que a substituição de até 20% de cimento por metacaulino aumentou a resistência à compressão do betão em cerca de 11% aos 28 dias. Os níveis de substituição de até 25% permanecem benéficos para a resistência do betão de alto desempenho (resistência nominal de 65 MPa aos 28 dias), conforme observado por Badogiannis *et al.* (2002).

Além disso, conforme Cassagnabere *et al.* (2010), um cimento muito reativo, como o CEM I 52,5R, combinado com o metacaulino apresenta propriedades mecânicas promissoras tanto em idade precoce quanto a longo prazo em condições de cura a vapor.

Um estudo em argamassas, com posterior validação em betões auto-compactáveis, mostrou que o uso do MK aumenta a porosidade da mistura, principalmente quando utilizadas

altas taxa de substituição (25%). Fato este que comprova que o empacotamento do esqueleto granular da matriz também pode ser modificado de acordo com o tamanho da partícula e a proporção de MK (CASSAGNABERE *et al.*, 2010).

Por exemplo, metacaulinos mais grossos que o cimento causam uma perda de densidade de empacotamento do aglutinante. Conseqüentemente, metacaulinos mais finos, causam um aumento da porosidade da mistura e atuam na forma de efeito fíler (preenchimento de poros). Portanto, conforme Cassagnabere *et al.* (2010), um alto nível de substituição de cimento ou uma finura inadequada de MK podem perturbar o empacotamento e, conseqüentemente, a porosidade do material.

Atualmente não existem normas técnicas na Europa para a caracterização do metacaulino. Porém, no Brasil há três: a NBR 15894-1 (2010) determina os requisitos necessários ao material, a NBR 15894-2 (2010) determina o índice de desempenho com o cimento Portland e por fim, a NBR 13956-4 (2012) determina a obtenção da finura do MK.

2.7.3.5 Fíler calcário

O fíler calcário, derivado da rocha calcária, pode ser classificado como calcítico ou dolomítico, dependendo de sua composição química. O calcário calcítico é aquele em que predomina a calcita, mineral composto essencialmente de carbonato de cálcio (CaCO_3). Já o calcário dolomítico é gerado a partir da substituição de parte do cálcio existente na calcita por magnésio, formando a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (MELO, 2005).

No que diz respeito a forma, seus grãos são prismas, com faces retangulares, diferindo do formato dos grãos de cinza volante e sílica de fumo, os quais são arredondados. A sua principal função no BAC é aumentar a viscosidade da pasta, a tensão superficial e a coesão do betão, além de estabilizar a água na matriz do betão. O uso desta adição também impede significativamente o aumento de temperatura do betão, reduzindo a fendilhação devida aos gradientes térmicos (ARAÚJO, 2011).

A principal diferença entre o fíler (LF, em inglês *limestone filler*) e as outras adições mencionadas é o fato do primeiro ser praticamente inerte quimicamente, não possuindo qualquer atividade pozolânica. Ou seja, apresenta uma reação quase nula tanto com a água de amassadura como com os compostos de cimento hidratado (SILVA, 2013).

Em Portugal, a norma LNEC 446 (2005) constitui um guia para utilização de LF na produção de misturas de cimento e de adições, estabelecendo as propriedades de características

necessárias, bem como os métodos de ensaio para a sua determinação. Já no Brasil, assim como ocorre com a escória de alto forno, não há norma específica que limite o seu uso como adição, porém a NBR 16697 (2018) limita o seu uso em cimentos.

2.7.4 Adjuvantes

Atualmente, o uso de adjuvante - como é conhecido em Portugal - ou aditivo no Brasil, é indispensável para a produção de determinados tipos de betão (de elevada resistência, de elevado desempenho, auto-compactável, etc). Há pesquisas que indicam que 70 a 80% de todo o betão produzido no mundo contém um ou mais aditivos (METHA; MONTEIRO, 2014).

Quanto ao seu efeito, ele pode atuar tanto física como quimicamente com o processo de hidratação do cimento, modificando uma ou mais propriedades do betão, tanto no estado fresco como no endurecido. Os adjuvantes utilizados em betões são regidos, em Portugal, pelas normas NP EN 934-1 (2008) e NP EN 934-1:2009+A1 (2012), enquanto que os ensaios de caracterização são de responsabilidade da NBR 480, dividida em 15 partes (SILVA, 2013).

Já no Brasil, é a norma NBR 11768 - dividida em três partes - que rege os requisitos necessários, os ensaios de desempenho e os de caracterização. Especificamente, para a produção do BAC os adjuvantes mais comuns são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade, tratados a fundo nas subseções seguintes.

2.7.4.1 Superplastificantes

O principal motivo para a utilização do superplastificante está associado a necessidade de reduzir a quantidade de água na amassadura, garantindo uma adequada viscosidade. Isso porque, na ausência do adjuvante em questão, as partículas de cimento - quando em contato com a água - apresentam forte tendência para a floculação, devido a diversos tipos de interações, tais como forças de *Van der Waals* entre as partículas (forças eletrostáticas entre regiões com cargas opostas). Quanto mais pronunciado for este efeito de floculação, maior será a viscosidade da composição (REPETTE, 2005).

Ou seja, as partículas de cimento tendem a produzir aglomerados de tamanho significativo que retêm água. Porém, com a utilização do superplastificante, as moléculas do adjuvante são adsorvidas às partículas de cimento, o que impede a sua floculação (Figura 5). Conseqüentemente, as partículas são distribuídas de forma homogênea na solução aquosa, minimizando a quantidade de água necessária para que estas fiquem dispersas, o que conduz a

uma maior fluidez/trabalhabilidade do betão (NEVILLE, A.M.; BROOKS, 2013).

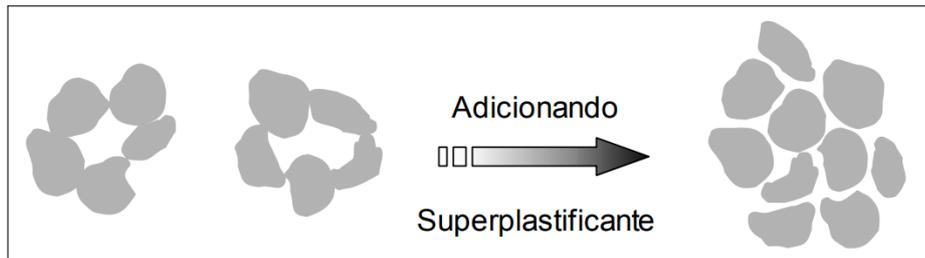


Figura 5 – Comportamento do superplastificante em partículas de cimento.

Fonte – Nunes (2001).

Em termos do betão endurecido, se a incorporação do superplastificante for utilizada para reduzir o conteúdo em água, a redução na relação água/cimento resulta num aumento da resistência. Isso porque há uma melhor dispersão das partículas de cimento, permitindo que as reações de hidratação se deem de forma mais homogênea. Porém, é importante ressaltar que a presença do superplastificante nas primeiras idades retarda a evolução da resistência, enquanto que nas idades subsequentes esta evolução é acelerada (KRAUS, 2006).

Além disso, este tipo de adjuvante pode ser organizado em dois grupos (DACZKO, 2019):

- plastificantes / redutores de água (redução de 5 a 12%), sendo em sua maioria compostos por linhossulfonatos - subproduto da indústria de celulose;
- superplastificantes / redutores de água de alta eficácia (redução de 12 a 40%), podendo ser de três diferentes composições: sulfonatos naftaleno, sulfonato melamino e policarboxílicos.

Dentre os produtos apresentados acima o superplastificante a base de policarboxilatos é o mais utilizado atualmente, tendo em vista que os demais ou necessitam ser aplicados em maior quantidade - no caso dos plastificantes a base de linhossulfonatos - ou apresentam perda de trabalhabilidade mais rápida, no caso do superplastificantes a base de sulfonatos (naftaleno e melamino). Ele exerce um efeito de dispersão mais eficiente nas partículas de cimento através de dois mecanismos: repulsão eletrostática e repulsão estérica (SILVA, 2013).

A primeira ocorre através das moléculas do adjuvante, que ao serem adsorvidas, envolvem as partículas de cimento e criam uma estrutura carregada negativamente, provocando a repulsão eletrostática entre elas. Já o segundo mecanismo se dá pela criação de uma barreira formada pelas cadeias laterais das moléculas de superplastificante, impedindo o contato entre as partículas (DACZKO, 2019).

Contudo, a utilização dos superplastificantes pode provocar alguns efeitos indesejáveis, como por exemplo, incorporação de certa quantidade de ar ou retardamento exagerado do endurecimento. Portanto, um estudo rigoroso da sua utilização deve ser realizado, levando em conta a finura do cimento, pois quanto mais fino, maior a dosagem do adjuvante para alcançar uma trabalhabilidade adequada (FIGUEIRAS, 2013).

2.7.4.2 Modificadores de viscosidade

Os agentes modificadores de viscosidade (VMA - do inglês "*viscosity modifying agent*") são adjuvantes químicos utilizados para aumentar a coesão do betão, sem alterar significativamente a fluidez - desde que combinado com a utilização de superplastificantes. Eles formam uma rede que retém a água, ou seja, limita-se a perda da água por exsudação, o que acaba minimizando a tendência de segregação do betão. Do ponto de vista reológico, ele proporciona uma viscosidade moderada-alta na mistura (KRAUS, 2006).

Quanto a sua composição, ela pode ser dividida em três grupos (GOMES; BARROS, 2009):

- sintéticos solúveis em água e polímeros orgânicos naturais (álcool polivinílico, poliacrilato etc.);
- emulsões acrílicas;
- polissacarídeos naturais solúveis em água, copolímeros de estireno com grupos carboxílicos e polieletrólitos sintéticos.

Dos grupos acima, os dois primeiros são geralmente aplicados em betões submersos, em que o VMA atua sobre as partículas de cimento. Já o terceiro grupo é comumente utilizado em BACs e betões projetados, sendo a atuação do VMA sobre a água de amassadura. Isso ocorre, pois neste último, as cadeias poliméricas do adjuvante são aderidas às moléculas de água, que adsorvem e fixam parte dessa água na amassadura. Além disso, as moléculas do adjuvante também contribuem para o aumento da viscosidade da mistura ao formar um gel tridimensional que bloqueia o movimento de água livre (SILVA, 2013).

Em relação a sua utilização no BAC, ela é opcional, mas recomendado em duas situações: quando há agregados mal graduados na mistura e/ou quando as adições minerais não são utilizadas. No caso em que opta-se pela não utilização de adições minerais o motivo é muitas vezes, devido ao alto custo de aquisição ou então, devido ao fato de que as adições geram uma mistura com maior área superficial das partículas, ocasionando em maior consumo de água.

Assim, com a utilização correta do VMA, o consumo de água não aumenta e a trabalhabilidade e coesão da mistura são mantidas (ALMEIDA; EVARISTO, 2017).

Além disso, o uso do agente torna o BAC menos sensível a variações no teor de umidade dos agregados e a variações nas propriedades dos materiais, deixando a mistura mais estável. Este efeito é visto de forma mais significativa em situações de constante alteração alteração da umidades dos agregados (EFNARC, 2005).

Porém, diversos autores (Tutikian e Molin (2008), Nanthagopalan e Santhanam (2011), Daczko (2019)) afirmam que há uma ligeira redução da resistência à compressão do BAC endurecido com a utilização do VMA, especialmente nas primeiras idades. Este comportamento deve-se, fundamentalmente, ao atraso da hidratação e a menor disponibilidade de água por uma parte da mesma estar retido pelo promotor de viscosidade.

2.7.5 Água

Apesar da água ser o material que exige praticamente nenhum controle de qualidade, é certamente o parâmetro mais importante no controle das propriedades do betão fresco e endurecido. Isso porque ela permite alterar a reologia do betão, uma vez que um aumento da quantidade de água livre causa uma diminuição da tensão de cedência (maior deformabilidade) e numa diminuição da viscosidade da mistura (FIGUEIRAS, 2013).

Desse modo, a água utilizada na amassadura não vai só contribuir para as propriedades do BAC no estado fresco, mas para o estado endurecido também através da sua influência na hidratação do cimento e na formação da microestrutura da pasta. Geralmente, o seu uso é expresso como uma relação água/cimento (por peso ou volume), relação água/materiais cimentícios, água/materiais finos etc (NEVILLE, 2016).

A água de amassadura, em Portugal, ou amassamento no Brasil, refere-se a quantidade de água de uma misturam que pode ser dividida em quatro partes: uma para hidratação do cimento, uma para a adsorção dos agregados e materiais finos, uma para preencher a porosidade do esqueleto granular e outra para garantir a fluidez do betão. Já a água livre é aquela em que retira-se a água adsorvida pelos materiais finos e/ou agregados do total de água (GOMES; BARROS, 2009).

Quanto a quantidade empregada, ela depende de vários fatores, tais como propriedades dos agregados, tipo de cimento, quantidade total de partículas finas na mistura, uso de adições ou adjuvantes, etc. Contudo, o fator determinante para a sua quantidade é o tipo de betão

a ser produzido: para betões de alto desempenho, geralmente a relação água/cimento está na faixa de 0,35, enquanto para betões convencionais está na faixa de 0,50 (METHA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, a qualidade da água empregada no BAC deve obedecer as mesmas exigências estabelecidas para a água de mistura do BC, conforme recomenda a norma NP EN 1008 (2003). Assim, optou-se por utilizar água da rede pública de abastecimento nas misturas a serem produzidas.

2.8 MÉTODOS DE DOSAGEM DO BAC

Diferentemente dos métodos utilizados em betões convencionais, os desenvolvidos para o BAC são fundamentados em princípios não comuns que têm como meta o atender a propriedades muito específicas, principalmente no estado fresco. É preciso garantir uma relação entre a habilidade de fluir facilmente nas formas e a estabilidade das misturas, que garante a ausência de segregação (GOMES; BARROS, 2009).

Existem diversas propostas para a determinação da composição do BAC, dentre eles, destacam-se os seguintes:

- a) o método de Okamura e Ouchi (2003), foi provavelmente o primeiro formulado especificamente para o BAC e que já não é muito utilizado;
- b) o método da JSCE, JAPANESE SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1998) (Sociedade Japonesa de Engenheiros Cívicos) que baseia-se em práticas e investigações realizadas no Japão;
- c) o método CBI de Skarendahl e Petersson (2000) que baseia-se no conceito de que o betão se encontra dividido numa fase sólida, constituída pelos agregados grossos e finos, e numa fase líquida que inclui os restantes constituintes;
- d) o método de Sedran (2000) desenvolvido em parceria com o LCPC - Laboratório Central de Pontes e Estradas de Paris, baseado em um novo tipo de reômetro e em um programa computacional para otimizar as misturas;
- e) o método desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, descrito por Figueiras (2006), que utiliza como base primária o método de Okamura e Ouchi (2003) de modo a simplificá-lo ao dia a dia das indústrias de betão pronto e da pré-fabricação. É um procedimento de tentativa-erro;

- f) o método de Ferreira (2001) que baseia-se na curva de Faury (curva granulométrica de referência), cujo objetivo é representar a mistura na forma mais otimizada possível;
- g) o método de Nepomuceno (2005) que tem como base os métodos japoneses (Okamura e Ouchi (2003) e JSCE, JAPANESE SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1998)), mas diferencia-se ao introduzir novos parâmetros (até então considerados constantes) que se adequam melhor ao controle da resistência à compressão;
- h) o método de REPETTE (2005) para a dosagem de BAC contendo fíler calcário, que fundamenta-se na incorporação de agregado em pasta, onde a resistência desejada é definida pela relação água/cimento;
- i) o método de Tutikian (2004) composto de seis passos, sendo o BAC obtido a partir de um betão convencional dosado seguindo o procedimento IPT/EPUSP desenvolvido por HELENE e TERZIAN (1992);
- j) por fim, o método de Gomes e Barros (2009) voltado para a dosagem de BAC de alta resistência, que considera o betão como bifásico, sendo uma fase a pasta e a outra o esqueleto granular.

Dentre estes métodos, o de Gomes e Barros (2009) é aquele utilizado na maior parte das literaturas encontradas e portanto, foi adotado como o método de dosagem para este trabalho. Além de ser conhecido como "Método de Gomes", também é chamado de "Método UPC", referente ao estudo desenvolvido por GOMES, GETTU e AGULLÓ (2003) na Universidade Politécnica da Catalunha, Espanha.

A proposta adotada determina o BAC por meio de três etapas: pasta, agregado (esqueleto granular) e betão, sendo as duas primeiras etapas referentes a uma otimização separada da composição do betão. Esta é uma das principais vantagens desse método, pois que permite a determinação independente dos diferentes parâmetros e variáveis da mistura (GOMES; BARROS, 2009).

Dentre estes parâmetros, tem-se:

- a) dosagem do adjuvante superplastificante (sp) em relação à massa de cimento (c), sp/c ;
- b) dosagem de adição mineral (f), que pode ser fíler, sílica, metaculino, etc, em relação à massa de cimento (c), f/c ;

- c) Obtenção da proporção dos agregados pela densidade seca da mistura destes;
- d) Determinação do volume de pasta que proporciona ao betão os requisitos de auto-adensabilidade: habilidade de preenchimento, habilidade de passante e resistência à segregação.

Assim, através da Figura 6 é possível identificar o passo a passo necessário para a obtenção de um BAC. O primeiro passo é a escolha de todos os materiais a serem utilizados e o segundo refere-se a otimização da pasta e do esqueleto granular.

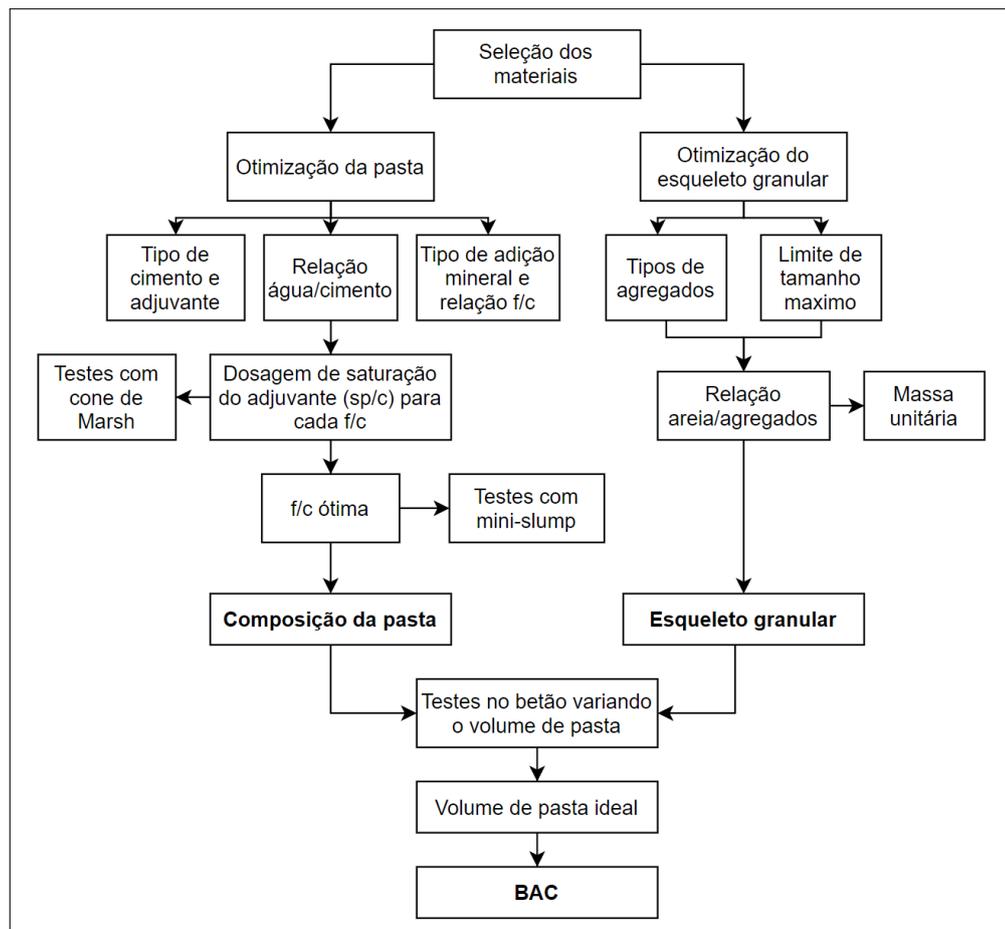


Figura 6 – Fluxograma da metodologia adotada.

Fonte – Adaptado de Gomes e Barros (2009).

Para a otimização da pasta são necessários dois ensaios: o teste com o cone de Marsh e o teste com mini-slump. O primeiro ensaio é regido, na Europa, pela norma NP EN 445 (2000) e no Brasil, pela NBR 7681-2 (2013) que diferencia-se da europeia em alguns quesitos.

Enquanto o Eurocódigo solicita 3 medições, sendo a terceira necessariamente 30 min após a mistura ser executada, a NBR solicita sucessivas medições (sem definir o número exato) a intervalos máximos de 30 min. Consequentemente, o tempo para fluir (T) na NBR é a média de todas as medições, enquanto que no Eurocódigo ele é a média apenas da segunda e

terceira medição. Além disso, a norma brasileira define a peneira com abertura de 2,36 mm e não 1,5 mm, como a norma europeia.

Já para o teste de mini-slump, também conhecido como mini-cone de Kantro, não existem normas europeias técnicas específicas para ele. O Eurocódigo que mais se aproxima do procedimento necessário a este ensaio é o NP EN 12350-8 (2019) que apesar de não ser aplicável em pastas, serve de guia. Portanto, foi utilizada a norma brasileira NBR 13276 (2016), específica para este ensaio e a norma NBR 7215 (2019) que especifica as dimensões do mini-cone a ser utilizado.

Quanto a otimização do esqueleto granular, não há norma técnica nem europeia nem brasileira que regulamente este procedimento. Esta análise é descrita pelo próprio método de Gomes e Barros (2009) e refere-se a um processo de otimização entre os agregados miúdo e graúdo de modo a se encontrar a maior compactação seca sem haver a necessidade de compactar os agregados, pois desse modo, há uma redução de vazios. Isso se fundamenta na hipótese de que uma combinação de agregados com o menor teor de vazios leva ao mínimo volume de pasta, porosidade e retração, colaborando com o fato do BAC requerer mais pasta do que os betões convencionais para assegurar viscosidade e fluidez (GOMES; BARROS, 2009).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os passos referentes a metodologia experimental do trabalho com base no método de Gomes e Barros (2009), apresentado no capítulo 2. São eles: seleção de materiais, otimização da pasta e do esqueleto granular, produção de betões com diferentes teores de pasta e realização de ensaios no estado fresco e endurecido, conforme apresentado no fluxograma da Figura 6.

Estes procedimentos permitirão concluir, para o BAC requerido, a percentagem de superplastificante ideal, a percentagem de adição mineral ideal, a relação entre agregados miúdos e graúdo ideal e por fim, o teor de pasta ideal. Portanto, os subcapítulos seguintes apresentarão, em detalhes, como foi possível chegar a estes parâmetros.

3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento utilizado foi o CEM I 42,5R (cimento com menos de 5% de adições e de alta resistência inicial) da marca SECIL, com percentagem de clínquer variando de 95 a 100%, e de massa volúmica aparente (ρ_c) de $1,2 \text{ g/cm}^3$, conforme a Tabela 10, obtida através do fabricante.

Tabela 10 – Informações acerca do cimento CEM I 42,5R.

	Massa volúmica aparente	$1,20 \text{ g/cm}^3$
Características físicas	Superfície Blaine	$4360 \text{ cm}^2/\text{g}$
	Início de presa	124 min
	Fim de presa	159min
	Expansibilidade	0,6mm
Características mecânicas	Resistência à compressão aos 2 dias	$\geq 20 \text{ MPa}$
	Resistência à compressão aos 28 dias	entre 42,5 MPa e 62,5 MPa

Fonte – Adaptado de SECIL (2018).

De maneira a complementar às informações acima, conforme Battagin (2011), o CEM I 42,5R equivale no Brasil, ao cimento de alta resistência inicial (CP V – ARI). Ele possui percentagem de clínquer de 95 a 100% e é obtido através da adição de sulfato de cálcio, numa proporção de no máximo 5%.

O agregado miúdo utilizado foi uma areia proveniente da região noroeste da Espanha (popularmente chamada de "Areia de Espanha"), enquanto que o agregado graúdo foi uma

brita de xisto, também chamada em Portugal como "brita Morais", extraída da freguesia de Morais, Portugal. Os ensaios de determinação da massa volúmica e índice de absorção de água nestes agregados foram realizados conforme a NP EN 1097-6 (2016) e a análise granulométrica conforme a NP EN 933-1 (2014).

Quanto aos resultados da análise granulométrica, obteve-se os valores da dimensão máxima (d_{max}), do módulo de finura, do teor de finos e das relações d/D e D/d . Assim, a brita (agregado grosso) foi classificada como categoria de $G_c90/15$ e a areia (agregado miúdo) categoria G_F85 , conforme a Tabela 9.

Além disso, as curvas granulométricas da areia e da brita Morais foram obtidas e estão apresentadas na Figura 7. Deste modo, conclui-se que ambos os agregados estão em conformidade com a NP EN 12620+A1 (2010), sendo os resultados obtidos em laboratório apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Caracterização dos agregados miúdos e graúdo.

Propriedades	Agregado	
	Areia	Brita
Massa volúmica aparente (g/cm^3)	2,62	2,68
d_{max} (mm)	2,00	16,00
Índice de absorção de água (%)	3,17	6,30
Módulo de finura	2,16	9,27
Teor de finos (%)	24,17	4,58
d/D	0,03	0,39
D/d	31,75	2,54

Fonte – Autoria própria (2021).

A adição mineral utilizada é a sílica de fumo, também chamada de sílica ativa, com 97% de quartzo e turmalina, de massa volúmica (ρ_{sf}) $2,66 g/cm^3$, dimensão máxima característica de 0,25mm e com absorção de água inferior a 0,8%. Todas as informações deste material foram fornecidas pelo fabricante AREIPOR - Areias Portuguesas.

Por fim, o adjuvante utilizado é o Sika ViscoCrete Tempo 653 PT que é um superplastificante redutor de água polivalente, à base de polímeros carboxílicos, de massa volúmica (ρ_{sp}) igual a $1,055 g/cm^3$, PH $4,0 \pm 1,0$ e teor em sólidos entre 27,6% e 30,4%. Todas as informações deste material foram fornecidas pelo fabricante Sika.

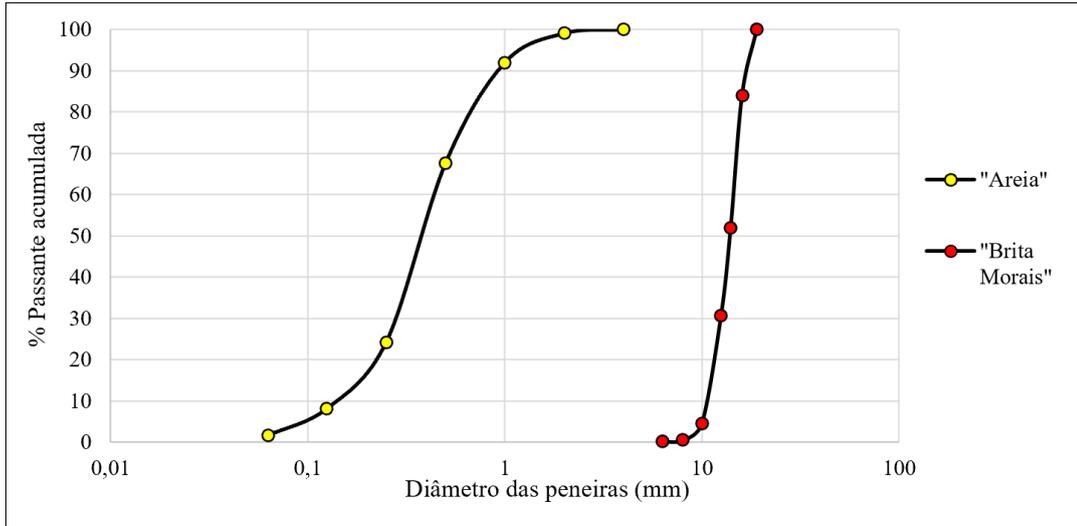


Figura 7 – Curva granulométrica da areia e brita utilizadas.

Fonte – Autoria própria (2021).

3.2 OTIMIZAÇÃO DA PASTA

Uma pasta de cimento é definida como uma mistura de cimento, adjuvante, adição mineral e água e, portanto, o primeiro passo para dosá-la é a determinação de uma relação água/cimento (a/c) a ser utilizada. Em betões com relação a/c elevada, a água excedente - não necessária para hidratação do cimento - forma poros após o endurecimento do betão e quanto maior a porosidade do material, menor será sua resistência mecânica (METHA; MONTEIRO, 2014).

Assim, para o presente estudo estipulou-se uma relação a/c igual a 0,40, levando consideração também que, de acordo com Gomes e Barros (2009), a faixa desta relação para betões de alto desempenho é em torno de 0,35. Tal valor está de acordo com a norma NP EN 206-1 (2010) que define 0,50 como o valor máximo de a/c para betões de classe de exposição ambiental XC4 (classe em que a cidade de Bragança está inserida, conforme apresentado no Anexo A).

Já a norma brasileira define como 0,55 o valor máximo de a/c para betões pré-esforçados de classe de exposição ambiental II, classe em que a cidade de Bragança está inserida, conforme apresentado no Anexo B. Portanto, a relação a/c definida também está de acordo com esta normativa.

Posteriormente, definiu-se um intervalo de percentagens para a sílica utilizada em forma de substituição parcial ao cimento. Optou-se pela substituição e não pela adição, pois o objetivo deste trabalho é a produção de betões com baixo consumo de cimento, além do fato de que a maior parte das literaturas encontradas, quando utilizam pozolanas são na forma de

substituição parcial ao cimento. Ainda, conforme Gomes e Barros (2009), tanto em situações de adição como em substituição, a quantidade de sílica utilizada varia, geralmente, de 5% a 15% da massa do cimento e portanto, definiu-se três percentagens para o estudo: 5%, 10% e 15%.

Quanto ao consumo de superplastificante, definiu-se a percentagem inicial de 0,1% de adjuvante em relação a massa de cimento (sp/c) e nas misturas subsequentes adicionou-se mais 0,05%, até o valor de 0,5% de modo a obter o ponto de saturação da pasta, ou seja, o teor de superplastificante ideal. Para tal, foi preciso, inicialmente, definir a massa (kg) de cimento conforme equação abaixo, visto que todos os outros materiais da pasta possuem sua quantidade em relação ao cimento (sp/c, sf/c e a/c).

$$C = \frac{V_p}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a/c}{\rho_a} + \frac{sf/c}{\rho_{sf}} + \frac{sp/c * 100}{T_{sp} * \rho_{sp}} - \frac{sp/c * (100/T_{sp} - 1)}{\rho_a}} \quad (3.1)$$

Onde,

C é a massa de cimento (kg);

V_p é o volume de pasta (m^3);

ρ_c é a massa volúmica do cimento;

ρ_a é a massa volúmica da água;

ρ_{sf} é a massa volúmica da sílica de fumo;

T_{sp} é o teor de sólidos do superplastificante;

ρ_{sp} é a massa volúmica do superplastificante;

As massas volúmicas (ρ) foram apresentadas no subcapítulo 3.1. Quanto ao teor de sólidos (T_{sp}), o fabricante Sika apresentou um intervalo de percentagens, entre 27,6 e 30,4%, optando-se por utilizar a média do intervalo que é de 29%.

A relação água cimento (a/c) foi definida anteriormente, assim como o intervalo de percentuais de sílica (sf/c) e o intervalo de percentuais de adjuvante (sp/c). O único valor ainda não determinado é o volume de pasta (V_p), o qual foi definido - a fim de evitar desperdícios de material - como o volume mínimo requerido pelo ensaio do cone de Marsh, equivalente a 3,2 litros. Deste modo, todas as misturas foram calculadas, conforme apresentado na Tabela 27 contida no Apêndice A.

Com as misturas calculadas foi possível produzi-las, seguindo sempre uma mesma metodologia, conforme o item 5.2.1 da NBR 16541 (2016). Inicialmente, eram misturados todos

os materiais secos em um recipiente umedecido e logo em seguida, adicionado 2/3 da quantidade de água durante 10 s. Após misturar por 90 s, um pouco de água (< 50 mL) era adicionada junto com o superplastificante durante 10 s.

Assim, a pasta era misturada por mais 60 s e uma pausa era feita a fim de raspar todo o material grudado no recipiente. Por fim, o restante da água era adicionado durante 10 s e tudo era misturado por 120 s. Portanto, o tempo toda da produção da pasta era de 6 min 20 s.

Com a mistura pronta, o ensaio do cone de Marsh era realizado (Figura 8), seguindo sempre a metodologia apresentada no item "3.2.2 Método do Cone" da NP EN 445 (2000). O procedimento consistia, basicamente, em introduzir a pasta no cone e medir o tempo (T) necessário para toda a pasta fluir pela abertura inferior do cone.



Figura 8 – Ensaio do cone de Marsh.
Fonte – Aatoria própria (2021).

É importante ressaltar, que foram realizadas três medições para cada pasta produzida (conforme exigido pela norma), sendo o tempo para fluir (T) obtido através da média da segunda e terceira medição, conforme define a NP EN 445 (2000). A Tabela 28, contida no Apêndice B, apresenta estes tempos, assim como o seus logaritmos decimais, os quais foram utilizados para gerar os gráficos de cada um dos grupos de sf/c (5%, 10% e 15%).

O logaritmo do tempo T é o parâmetro utilizado nesta análise, pois o tempo para fluir se apresenta como um parâmetro inverso da fluidez da pasta. Isso significa que variando a relação sp/c na pasta, obtém-se uma curva do logaritmo do tempo T em função da dosagem de

superplastificante (sp/c), conforme mostrado na Figura 9.

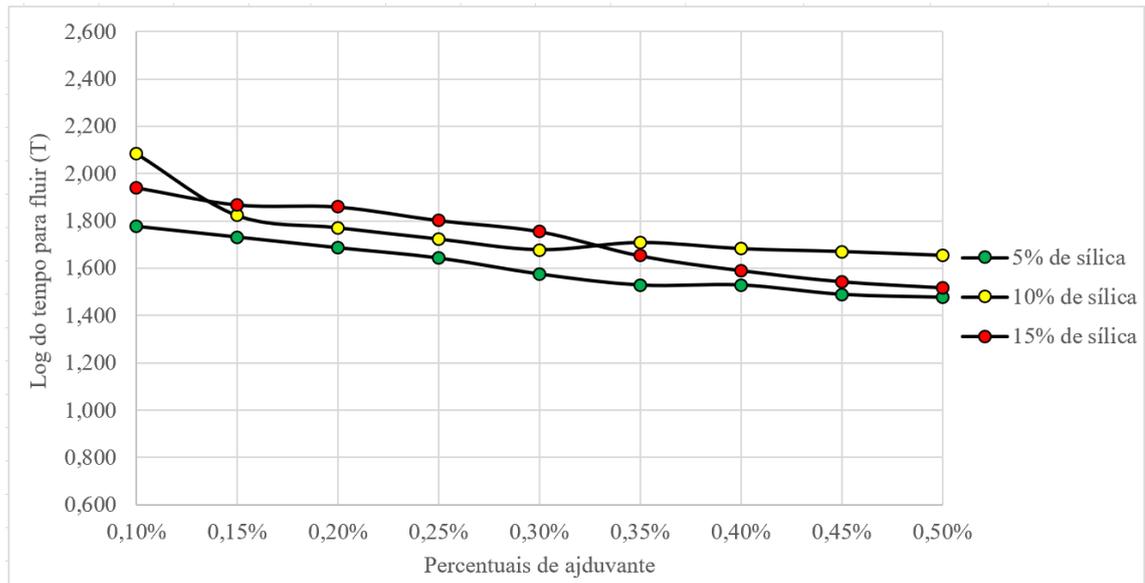


Figura 9 – Percentuais de adjuvante superplastificante em função do logaritmo decimal do tempo para fluir (T), na substituição parcial em 5%, 10% e 15% de sílica de fumo.

Fonte – Autoria própria (2021).

Através destes gráficos é possível identificar um possível ponto de saturação da dosagem de superplastificante de cada sf/c. Ele indica a mistura que atinge os melhores desempenhos, com a menor quantidade do adjuvante em questão. É obtido quando, ao acrescentar maiores teores de superplastificante à pasta, não há nem diminuição do tempo de escoamento nem aumento do diâmetro de espalhamento.

Deste modo, ao analisar o gráfico da Figura 9, foi possível concluir que o possível ponto de saturação da misturas com 5% de sílica está entre 0,40 e 0,45% sp/c. Já para as misturas com 10% e 15%, o possível ponto de saturação está entre 0,35 e 0,40% sp/c.

Assim, o ensaio do mini-slump (Figura 10) foi realizado a fim de verificar, para cada sf/c, qual dos dois pontos de saturação obtidos inicialmente resultam em um aumento significativo (≥ 3 cm) do diâmetro de espalhamento. Os valores de espalhamento encontrados para cada um deles estão contidos na Tabela 12, assim como o valor médio obtido - conforme exige a norma NBR 13276 (2016) utilizada no ensaio.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 12 e levando em conta que são aceitáveis apenas diferenças de espalhamento menores ou iguais a 3 cm, verificou-se que os pontos de saturação são 0,45% para a composição com 5% sf/c e 0,40% para as composições 10% sf/c e 15% sf/c. É importante destacar que estes ensaios podem não traduzir convenientemente o comportamento reológico dos betões, pois certas combinações de superplastificante com cimento podem apresentar um comportamento adequado em pastas e não atingir os desempenhos preten-

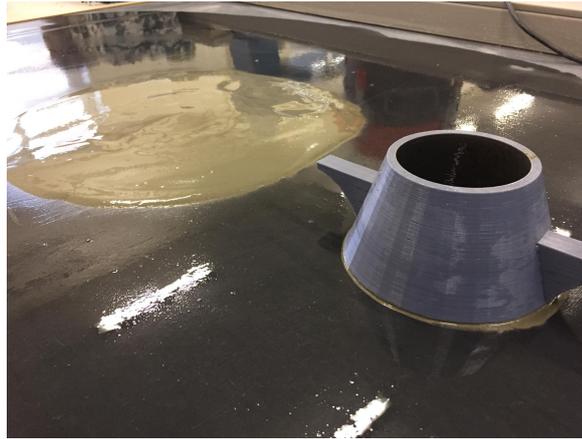


Figura 10 – Ensaio de mini-slump realizado.

Fonte – Autoria própria (2021).

Tabela 12 – Espalhamentos obtidos com o ensaios do mini-slump.

sf/c		5%					
sp/c		0,40%			0,45%		
Espalhamento (mm)		37,50	35,50	35,10	40,70	39,60	38,90
Valor médio (mm)		36,03			39,73		
sf/c		10%					
sp/c		0,35%			0,40%		
Espalhamento (mm)		36,00	35,50	35,20	38,9	38,70	38,40
Valor médio (mm)		35,57			38,67		
sf/c		15%					
sp/c		0,35%			0,40%		
Espalhamento (mm)		36,20	35,85	35,30	38,80	38,15	37,90
Valor médio (mm)		35,78			38,28		

Fonte – Autoria própria (2021).

didos em betões. Porém, conforme Vieira (2010) explica, nunca detectou-se uma combinação que apresentasse um comportamento deficiente em pastas e satisfatório em betões.

3.3 OTIMIZAÇÃO DO ESQUELETO GRANULAR

O esqueleto granular refere-se ao conjunto de todos os agregados miúdos e graúdos, e no caso deste estudo, areia e brita Morais. O objetivo desta análise é obter o chamado "esqueleto

granular ótimo" que é definido como aquele que resulta no menor índice de vazios, através de um ensaio de compactação.

Sendo assim, o procedimento consistiu em juntar manualmente os agregados em um recipiente de volume conhecido sem nenhuma compactação e depois medir a altura interna no recipiente (h_{recip}). Como a área da seção transversal (A_{recip}) era conhecida ($1438,74 \text{ cm}^2$), conforme ia-se alterando as percentagens de agregados, media-se a altura (h_{recip}), de modo a obter o volume da mistura.

As percentagens de areia e brita eram alteradas, mantendo-se a relação de 2,0 kg constante para cada mistura e variando as proporções de 10 em 10%. Ou seja, inicialmente, foi adicionada uma amostra somente de brita (2 kg) brita e então, mediu-se a altura da mistura. Na sequência, o procedimento foi repetido para as amostras de 1,8 kg de brita e 0,2 kg de areia e assim por diante, até a amostra com areia apenas.

A Tabela 13 contém os valores obtidos neste ensaio, assim como o volume (V_{comb}) de cada combinação de agregados - obtido através da equação 3.2, a sua massa volúmica real (μ_{comb}), em g/cm^3 , obtida através da equação 3.3, a sua massa volúmica aparente (ρ_{comb}), em g/cm^3 , obtida através da equação 3.4 e o seu índice de vazios(e), em percentagem, obtido através da equação 3.5.

$$V_{comb} = A_{recip} * h_{recip} \quad (3.2)$$

$$\mu_{comb} = M_{amostra} / V_{comb} \quad (3.3)$$

$$\rho_{comb} = \frac{B * \rho_{brita} + A * \rho_{areia}}{100} \quad (3.4)$$

$$e = \frac{(\rho_{comb} - \mu_{comb}) * 100}{\rho_{comb}} \quad (3.5)$$

Onde,

$M_{amostra}$ é a massa (g) da amostra e neste caso, fixa em 2 kg;

B é a percentagem de brita na combinação de agregados;

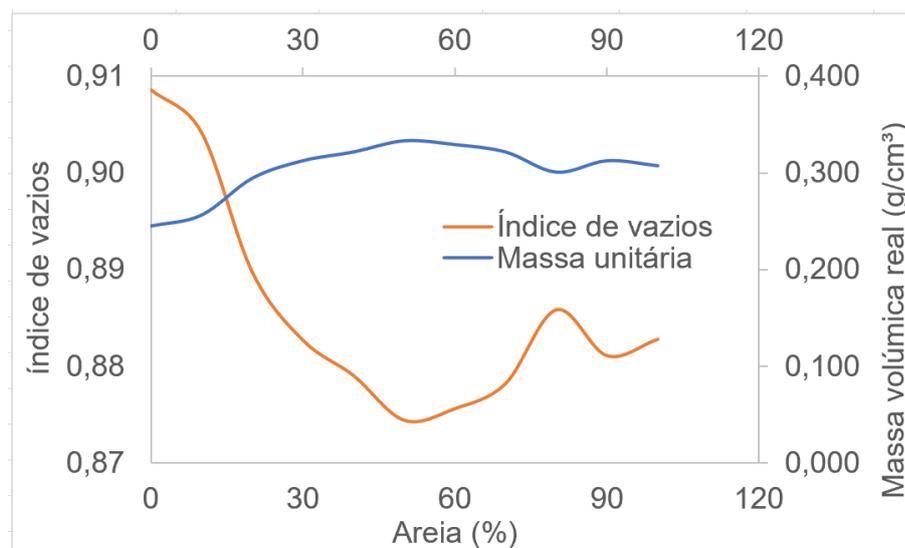
ρ_{brita} é a massa volúmica aparente da brita e neste caso, igual a $2,68 \text{ g/cm}^3$ conforme apresentado na Tabela 11;

A é a percentagem de areia na combinação de agregados;

Tabela 13 – Dados obtidos com análise do esqueleto granular.

B (%)	A (%)	h_{recip} (cm)	V_{comb} (cm ³)	μ_{comb} (g/cm ³)	ρ_{comb} (g/cm ³)	e (%)
100	0	5,675	8164,76	0,245	2,680	90,86
90	10	5,425	7805,08	0,256	2,674	90,42
80	20	4,725	6797,97	0,294	2,668	88,97
70	30	4,450	6402,32	0,312	2,662	88,26
60	40	4,325	6222,48	0,321	2,656	87,90
50	50	4,175	6006,67	0,333	2,650	87,44
40	60	4,225	6078,61	0,329	2,644	87,56
30	70	4,325	6222,48	0,321	2,638	87,82
20	80	4,625	6654,10	0,301	2,632	88,58
10	90	4,450	6402,32	0,312	2,626	88,10
0	100	4,525	6510,23	0,307	2,620	88,27

Fonte – Autoria própria (2021).

**Figura 11 – Gráfico obtido da análise do esqueleto granular.**

Fonte – Autoria própria (2021).

ρ_{areia} é a massa volúmica aparente da areia e neste caso, igual a 2,62 g/cm³ conforme apresentado na Tabela 11.

Através da Figura 11 - a qual apresenta os dados referentes a uma média de duas medições, a fim de minimizar a possibilidade de erros - percebe-se que a massa unitária (μ_{comb}) e o índice de vazios (e) possuem melhores comportamentos em valores centrais. Ou seja, conforme os percentuais de agregados vão se aproximando, obtém-se uma massa unitária maior e um índice de vazios menor.

Assim, para a escolha da combinação ideal de agregados buscou-se aquela que

possuísse a maior massa unitária (μ_{comb}) com o menor teor de vazios (e) e portanto, a composição com 50% brita e 50% areia foi a que apresentou os melhores resultados. Porém, de acordo com GOMES, GETTU e AGULLÓ (2003), deve-se sempre buscar a mistura que possui a maior quantidade possível de agregados maiores, desde que esta apresente um índice de vazios (e) de no máximo 5% maior que a inicialmente ideal.

Tal recomendação é importante, pois um maior teor de agregados graúdos resulta em uma mistura que demanda menos água e que apresenta um menor teor de argamassa, aumentando as resistências mecânicas e a durabilidade. Portanto, a combinação de 60% brita e 40% areia foi escolhida como a ideal, tendo em vista que ela possui maior teor de agregados graúdos (B) e índice de vazios (e) de apenas 0,53% maior que a combinação 50% - 50%.

3.4 CÁLCULO E EXECUÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE BETÃO

Com todos os parâmetros definidos, foi possível montar a Tabela 14, restando então o último passo da dosagem do BAC: a determinação do teor de pasta. Este teor é proporcional a quantidade de cimento utilizada, ou seja, quanto menor o teor de pasta, menor o consumo de cimento - elemento chave para a redução de custo do BAC (SARTORTI; SOUSA; BARBOZA, 2019).

Tabela 14 – Parâmetros definidos para as composições de betão

Parâmetros	Composição 1	Composição 2	Composição 3
Água (a/c)	0,40	0,40	0,40
Superplastificante (sp/c)	0,45%	0,40%	0,40%
Sílica de fumo (sf/c)	5%	10%	15%
Areia (a/M)	0,40	0,40	0,40
Brita (p/M)	0,60	0,60	0,60

Fonte – Autoria própria (2021).

Sendo assim, optou-se por teores de pasta que resultassem em um baixo consumo de cimento, desde que o mínimo consumo estabelecido pela norma NP EN 206-1 (2010) fosse respeitado. Este valor mínimo depende da classe de exposição do betão, conforme apresentado na Tabela 33 do Anexo A, e para o caso da cidade de Bragança, cuja classe de exposição é a XC4, o consumo mínimo é de 300 kg/m³.

Entretanto, o item 5.2.5.2.3 da NP EN 206-1 (2010) afirma que a quantidade de cimento utilizada pode ser reduzida em até, no máximo 30 kg/m³ abaixo do teor exigido pela

classe de exposição vigente. Ou seja, para o presente estudo foram definidos teores de pasta que resultassem em um consumo de cimento de até 270 kg/m^3 .

Assim, para cada um das três composições foram definidos três percentuais de teor de pasta (TP), conforme apresentado na Tabela 15. Além disso, a fim de comparação, o consumo de cimento (CC) em kg/m^3 , o teor de argamassa seca (α) em percentagem e a relação água/materiais secos (H), em percentagem, foram calculados conforme as equações 3.6, 3.7 e 3.8.

$$CC = C/V_b \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{\left(1 + \frac{\text{areia}}{C}\right) * 100}{1 + \frac{\text{areia} + \text{brita}}{C}} \quad (3.7)$$

$$\rho_{comb} = \frac{B * \rho_{brita} + A * \rho_{areia}}{100} \quad (3.8)$$

Onde,

C é a massa de cimento (kg) necessária;

V_b é o volume de betão necessário a todos os ensaios;

areia e *brita* são a massa de areia (kg) e brita (kg) necessárias;

Tabela 15 – Parâmetros calculados para as composições de betão

Parâmetros	Composição 1			Composição 2			Composição 3		
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
TP (%)	33,00	34,00	36,00	33,50	34,50	35,50	33,00	34,00	35,00
CC (kg/m^3)	271,79	280,03	296,50	281,40	289,80	298,20	282,53	291,09	299,66
α (%)	57,32	57,87	59,00	57,84	58,40	58,97	57,80	58,36	58,93
H (%)	11,37	11,73	12,46	11,52	11,87	12,22	11,29	11,63	11,97

Fonte – Autoria própria (2021).

Além dos parâmetros acima, a norma NP EN 206-1 (2010) exige outros dois parâmetros para caracterização do uso da sílica de fumo: a relação K e a relação sílica/cimento, calculados através das equações 3.9 e 3.10, respectivamente. A primeira relação serve de instrumento para a comparação do desempenho de durabilidade entre um betão de referência com cimento "A" e um outro betão em que parte do cimento "A" é substituída por uma adição. Ou seja, o valor k permite que adições do tipo II, como a sílica, sejam levadas em consideração. Quanto a segunda relação, ela apresenta um requisito que a quantidade de sílica utilizada deve atender.

$$\frac{w}{C + k * sf} \quad (3.9)$$

$$\frac{sf}{C} \leq 0,11 \quad (3.10)$$

Onde,

w é a massa de água (kg) utilizada;

sf é a massa de sílica (kg) utilizada;

k parâmetro igual a 2,0, conforme item 5.2.5.2.3 da NP EN 206-1 (2010).

Os valores obtidos para cada grupo de composição são os mesmos, visto que a alteração entre o trio de cada uma dessas composições é referente a percentagem de pasta. Portanto, na tabela abaixo são apresentados valores únicos da relação k e da relação sílica/cimento para as composições 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 16 – Parâmetros exigidos pelo Eurocódigo

Parâmetros	Composição 1	Composição 2	Composição 3
Relação k	0,36	0,33	0,30
Sílica / C	0,05	0,10	0,15

Fonte – Autoria própria (2021).

Conforme apresentado pela Tabela 16, a única composição que desrespeita o limite estabelecido pelo Eurocódigo para a relação sílica/cimento ($\leq 0,11$) é a composição 3. Porém, como o presente objetivo é avaliar diferentes composições com 3 percentuais de sílica, a composição foi produzida com ressalvas nas conclusões. Além disso, é importante frisar que a norma brasileira não cita, em nenhum momento, qualquer limite para esta relação e portanto, de acordo com ela, todas as três composições estão dentro dos padrões brasileiros exigidos para o BAC.

Após os parâmetros necessários terem sido calculados, foi possível iniciar a fase de produção dos betões auto-compactáveis, a qual se buscou padronizar o processo da mistura dos materiais seguindo-se as etapas adotadas por Carneiro (2018) como mostra a Tabela 17. O único processo realizado não descrito na tabela refere-se a uma pequena mistura de água e cimento utilizada na betoneira no início dos ensaios, evitando que a primeira rodada de betão perca sua água de amassamento para o equipamento (conhecido no Brasil como "imprimação" da betoneira).

Tabela 17 – Procedimento de mistura para o BAC

Etapa	Procedimento	Duração (segundos)
1	Adição do agregado graúdo com 80% da água	10
2	Mistura	30
3	Parada para adição do cimento	10
4	Mistura	30
5	Parada para adição da sílica	5
6	Mistura	30
7	Parada para adição da areia	10
8	Mistura	180
9	Parada para raspagem das pás e superfície	60
10	Adição do superplastificante com o restante da água	10
11	Mistura	420

Fonte – Adaptado de Carneiro (2018).

Assim, com o BAC produzido, foi possível partir para a fase dos ensaios no estado fresco, sendo neste trabalho realizados o Slump Flow Test, o Slump Flow T500, o Funil-V e a Caixa-L, todos apresentados detalhadamente na seção seguinte. Após a realização destes ensaios, os provetes foram moldados para a realização dos ensaios no estado endurecido, nomeadamente ensaios para obtenção do módulo de elasticidade, resistência à compressão axial e resistência à compressão diametral, apresentados detalhadamente na seção 3.6.

3.5 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Todos os ensaios apresentados foram realizados em conformidade com as normas europeias (conforme a Tabela 6 do Capítulo 2), sendo as diferenças entre as normas brasileira e os Eurocódigos apontadas no final de cada subseção a seguir.

3.5.1 Slump Flow Test e Slump Flow T500

O Slump Flow Test e o Slump Flow T500 apesar de serem executados de forma distinta, utilizam os mesmos equipamentos e avaliam a capacidade de preenchimento do betão. O equipamento utilizado consiste de um cone de Abrams (Figura 12) que é mantido firmemente apoiado sobre uma placa metálica não-absorvente (de, no mínimo 900 mm x 900 mm riscada, a partir do centro, com círculos de 210 ± 1 mm de diâmetro e 500 ± 1 mm de diâmetro) por meio do posicionamento do operador sobre os apoios laterais fixados ao molde metálico.

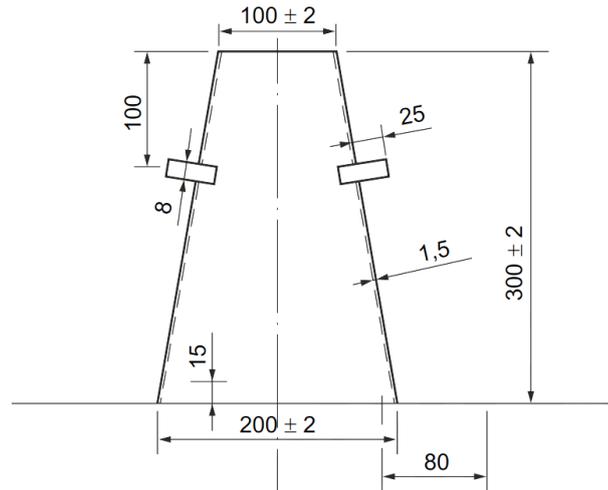


Figura 12 – Cone de Abrams.

Fonte – Autoria própria (2021).

Em ambos os ensaios o procedimento inicial é o mesmo: em preencher o cone de Abrams - umedecido previamente - de betão sem adensamento, e, em seguida, erguê-lo em tempo entre 1s e 3s permitindo que o betão se acomode na placa metálica não absorvente que deve estar plana. A diferença entre os ensaios está na forma de analisar o passo seguinte.

Enquanto que o Slump Flow Test avalia o diâmetro do espalhamento o Slump Flow T500 avalia o tempo que o betão leva para atingir 500mm. O tempo T500 deve ser cronometrado em 0,1s entre o momento que o betão toca a placa metálica até o instante em que ele toca a marcação de 500mm da placa metálica. Este intervalo de tempo é uma medida da velocidade do fluxo e uma indicação da viscosidade relativa do BAC.

Assim que o betão repousa (Figura 13), mede-se o maior diâmetro do fluxo espalhado e registrado como d1. Perpendicular a d1, mede-se outro diâmetro registrado como d2. Porém, se a diferença entre d1 e d2 for superior a 50 mm, deve ser colhida outra amostra e o procedimento repetido. Caso o procedimento seja repetido e novamente a diferença entre d1 e d2 for maior que 50 mm, isso significará que o BAC não possui a fluidez necessária para que o teste de vazão seja adequado.

Por fim, o espalhamento (Slump Flow) é obtido a partir da média das duas medidas perpendiculares (d1 e d2) em milímetros e o tempo T500 é obtido sem a necessidade de cálculo algum, como apresentado anteriormente. Quanto a norma brasileira para este ensaio, a NBR 15823-2 (2017) apresenta pequenas variações:

- a) Não há nenhuma recomendação para o caso da diferença entre d1 e d2 ser maior que 50 mm;
- b) Há a determinação de um Índice de estabilidade visual (IEV) que classifica



Figura 13 – Ensaio de Slump Flow Test.

Fonte – Autoria própria (2021).

a amostra em altamente estável (IEV 0), estável (IEV 1), instável (IEV 2) e altamente instável (IEV 3) com base na análise visual da evidência de segregação ou exsudação. Apesar da norma europeia não realizar esta classificação, ela requer que qualquer sinal de segregação seja reportado de forma qualitativa: sem indicação de segregação ou forte indicação de segregação.

3.5.2 Funil V

O ensaio do Funil V consiste na determinação da viscosidade do BAC, pela medida do tempo de escoamento de um volume de betão de no mínimo 12L, através de um funil metálico em formato de V. As dimensões do funil estão indicadas pela Figura 14.

Com o funil limpo, umedecido e com sua comporta fechada, a amostra de BAC deve ser despejada sem agitação até preencher todo o espaço. O excesso na superfície deve ser retirado e um recipiente metálico deve ser posicionado previamente abaixo do funil (Figura 15).

Após o preenchimento, a abertura da comporta deve ser feita em, no máximo, $10s \pm 2s$. O cronômetro deve ser acionado simultaneamente à abertura da comporta e parado quando for possível visualizar, através do funil, o recipiente metálico posicionado sob ele.

Este intervalo de tempo representa o escoamento completo do betão através do funil

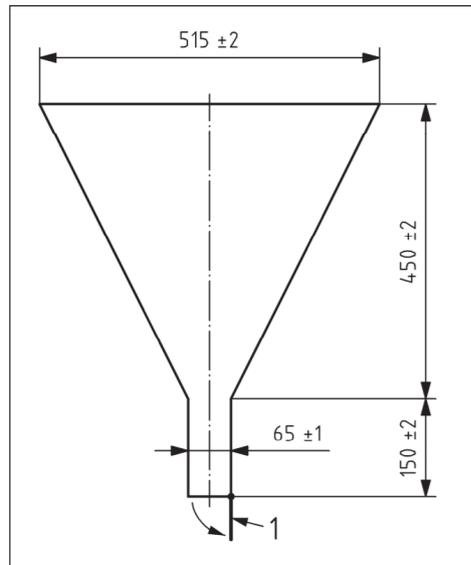


Figura 14 – Funil V com medidas em milímetros.

Fonte – NP EN 12350-9 (2010).



Figura 15 – Ensaio do Funil V.

Fonte – Autoria própria (2021).

e deve ser registrado como (t_v). Se ocorrer um bloqueio, o teste deve ser repetido e, se ocorrer um segundo bloqueio, isso significa que o betão não possui a viscosidade e a capacidade de preenchimento necessárias para o BAC.

Quanto a norma brasileira para este ensaio, a NBR 15823-5 (2017) não apresenta variações quanto a execução deste ensaio em relação a norma europeia, apenas acrescenta um outro intervalo de tempo (T_{5min}) que deve ser medido somente em casos especiais, com solicitação expressa, no qual a medida do tempo de escoamento do betão é realizada após 5 min do preenchimento do funil V.

3.5.3 Caixa L

O ensaio da caixa L é utilizado para avaliar a habilidade de passagem do BAC através de pequenas aberturas, incluindo espaços entre armaduras, sem segregação ou bloqueio. Esta é uma propriedade essencial para o preenchimento de formas de elementos pré-moldados e pré-esforçados.

Este ensaio possui duas variações: utilizar uma caixa com duas barras ou com três barras. A simular uma densidade maior de armadura, caso de estruturas pré-esforçadas, decidiu-se por realizar o ensaio com três barras.

O equipamento utilizado consiste de uma caixa metálica em formato "L" plana e rígida com as dimensões indicadas na Figura 16, com três barras de aço lisas de $(12 \pm 0,2)$ mm de diâmetro a permitir um espaço livre de (41 ± 1) mm entre elas.

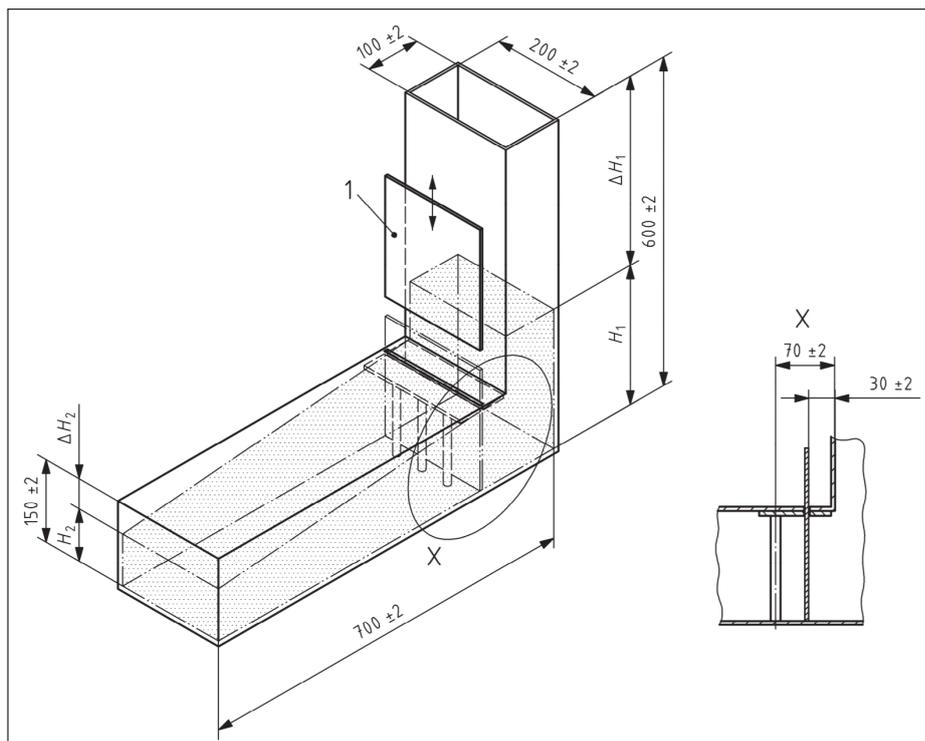


Figura 16 – Caixa L com medidas em milímetros.

Fonte – NP EN 12350-10 (2010).

Em uma superfície plana e com a caixa limpa, úmida e de comporta fechada, a amostra de BAC deve ser despejada sem agitação e o excesso de material na superfície deve ser retirado. É importante verificar sinais de segregação neste momento.

Após (60 ± 10) s do final do preenchimento da câmara vertical, deve ser efetuada a abertura da comporta de forma uniforme e suave, permitindo o escoamento do betão para a câmara horizontal. Assim que o movimento cessa (Figura 17), devem ser medidas três vezes,

em milímetros, as alturas ΔH_1 e ΔH_2 , como indicado na Figura 16. Assim, obtém-se H_1 e H_2 através da equação geral 3.11, em que $\Delta 1, \Delta 2$ e $\Delta 3$ são as três medições (mm) que devem ser feitas tanto para H_1 quanto para H_2 .

$$H = 600 - \frac{\Delta 1 + \Delta 2 + \Delta 3}{3} \quad (3.11)$$



Figura 17 – Betão em repouso na caixa L.

Fonte – Autoria própria (2021).

O parâmetro H_1 representa a altura da superfície do betão, medida a partir do fundo, na extremidade da câmara horizontal junto à câmara vertical da caixa. Já H_2 é a altura da superfície do betão, medida a partir do fundo, na extremidade da câmara horizontal junto à face oposta da câmara vertical da caixa. Por fim, a habilidade de passagem é calculada a partir da relação entre H_2 e H_1 .

A única diferença que a norma brasileira NBR 15823-4 (2017) apresenta para este ensaio, é o fato de não utilizar os termos ΔH_1 e ΔH_2 e consequentemente, não exigir três medições para os mesmos. É necessário apenas medir H_1 e H_2 e então realizar a média entre eles para obter a habilidade de passagem.

3.6 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Após os ensaios do estado fresco, foram moldados oito provetes cilíndricos de 15x30cm para cada mistura, sendo três para o ensaio de resistência à compressão diametral e cinco para o ensaio de módulo de elasticidade e resistência à compressão axial. Em todos os

moldes foi aplicado o descofrante - também chamado de desmoldante no Brasil - solúvel em água Muldol 169-B da marca SilveroiL, destinado a aplicação de moldes metálicas.

Além disso, os provetes foram desmoldados após 24h da betonagem e permaneceram em câmara úmida (com temperatura em torno de 20°C e umidade entre 95 e 100%) até o dia da realização dos ensaios. Para serem ensaiados foi preciso retificá-los, processo no qual foi utilizado o fluido de corte solúvel MAFCOOL 51 da marca BALIS (Figura 18). Tanto a execução dos projetos quanto a cura foram realizados com base na NP EN 12390-2 (2019).



Figura 18 – Retificação de provete

Fonte – Aatoria própria (2021).

Após a retificação, os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, resistência à flexão de provetes e módulo de elasticidade foram realizados. É importante frisar que a execução de todos eles foi feita em conformidade com as normas europeias (apresentadas detalhadamente na Tabela 7 do Capítulo 2), sendo as diferenças entre estas e as normas brasileiras apontadas no final de cada subseção a seguir.

3.6.1 Resistência à tração

O conhecimento da resistência à tração permite estimar a carga para a qual ocorre a fissuração e, desse modo, prever a durabilidade do betão. Assim, dentre as três possibilidades de ensaio da resistência à tração, apresentados no subcapítulo 2.6, optou-se pela compressão diametral, por conta da disponibilidade de equipamento. O ensaio consistiu em aplicar uma

carga de compressão nos provetes, com o auxílio de duas chapas, de forma que o plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas, que devem receber o carregamento, coincidisse com eixo de aplicação de carga, conforme verifica-se na Figura 19.

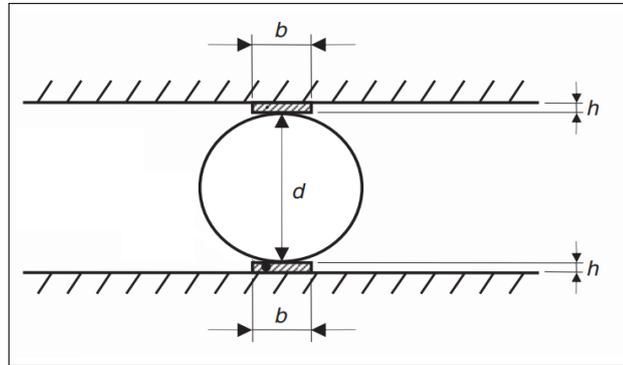


Figura 19 – Disposição do provete no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Fonte – Adaptado de NBR 7222 (2011).

De acordo com Conterato (2011), as chapas são inseridas para impedir que haja pontos de elevadas tensões de compressão nos extremos do diâmetro vertical do corpo de prova, impedindo assim que ocorra puncionamento (ruína devido ao esforço cortante). Para o ensaio foram rompidos três provetes para cada composição aos 28 dias, como estabelece a norma NP EN 12390-6 (2011) que não apresentou discrepância em relação a norma e a brasileira, NBR 7222 (2011).

Quanto ao resultado do ensaio, o mesmo é expresso como a tensão de rotura por compressão diametral ($f_{ct,sp}$), valor que não serve como parâmetro de análise, visto que há outras formas de realizar o ensaio para obtenção da resistência à tração. Assim, conforme a NP EN 1992-1-1 (2010), o resultado deve ser expresso como a resistência média do betão à tração (f_{ctm}) e a resistência característica à tração inferior do betão ($f_{ctk,inf}$). Para tal, as equações necessária estão apresentadas abaixo.

$$f_{ct} = 0,9f_{ct,sp} \quad (3.12)$$

$$f_{ctm} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n f_{ct} \quad (3.13)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7f_{ctm} \quad (3.14)$$

3.6.2 Resistência à compressão

A resistência característica à compressão do betão aos 28 dias (f_{ck}) é um dado importante, básico e fundamental para qualquer tipo de projeto estrutural, sendo requisito essencial para a aplicação do betão em estruturas pré-esforçadas. Esse valor foi obtido para cada composição através de ensaios de resistência à compressão axial, utilizando-se corpos de prova cilíndricos de 15x30 cm submetidos a uma carga de compressão axial (Figura 20).



Figura 20 – Ensaio de resistência à compressão axial em provete da composição 1.

Fonte – Autoria própria (2021).

Além disso, também foi observado, no final dos ensaios, se a rotura dos provetes era condizente com aquelas classificadas como satisfatórias pela NP EN 12390-3 (2019), como apresenta a Figura 21. No total, foram analisados 5 provetes para cada composição e devido a problema logísticos em decorrência da doença Sars-CoV-2 (Covid-19), somente os provetes da composição 1 foram ensaiados aos 28 dias, sendo aqueles da composição 2 ensaiados aos 27 dias e da composição 3 aos 26 dias.

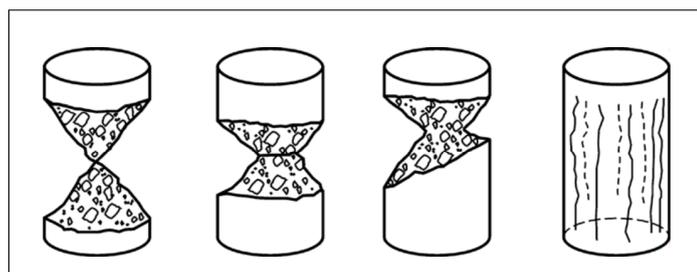


Figura 21 – Roturas satisfatórias de provetes cilíndricos.

Fonte – NP EN 12390-3 (2019).

Sendo assim, é preciso aplicar coeficientes de majoração nas resistências obtidas para os 28 dias, conforme recomendação da NP EN 1992-1-1 (2010), através das equações abaixo.

$$f_c(t) = F_{max}/A \quad (3.15)$$

$$f_{cm}(t) = \frac{1}{n} * \sum_{n=1}^n f_{c,j} \quad (3.16)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp^{s*1-\sqrt{28/t}} \quad (3.17)$$

$$f_{cm} = f_{cm}(t)/\beta_{cc}(t) \quad (3.18)$$

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 * S_d \quad (3.19)$$

Onde,

$f_c(t)$ é a resistência à compressão à idade de t dias (MPa);

F_{max} é a força máxima medida em ensaio (N);

A é a área da seção transversal (mm^2);

$f_{cm}(t)$ é a tensão média de rotura na idade t do betão (MPa);

n é o número de amostras ensaiadas;

$\beta_{cc}(t)$ é o coeficiente que depende da idade t do betão;

s é o coeficiente que depende do tipo de cimento;

f_{cm} é a tensão média de rotura aos 28 dias de idade (MPa);

S_d é o desvio padrão (MPa);

Em relação as normas, a brasileira e a portuguesa não apresentaram qualquer diferença entre si para este ensaio.

3.6.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma das propriedades mecânicas do betão que merecem atenção especial ao se projetar estruturas. Tal importância se dá pelo fato de que este relaciona a deformação sofrida pelo betão sob ação das tensões. Assim, com base na LNEC E 397 (1993),

determinou-se o módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) através de um ensaio estático, em que foram utilizados 5 provetes de 15x30 cm.

Para a realização do ensaio, foi preciso, inicialmente, ensaiar dois provete da mesma betonagem à resistência à compressão axial, de modo a se obter a força máxima média (F_c). Os demais provetes foram posicionados no centro da prensa e submetidos ao processo de cinco carregamentos e descarregamentos sucessivos, com velocidade constante de 0,06 kN/s, até o limite de 30% da Força F_c , conforme apresenta Figura 22. Os valores máximos e mínimos da carga aplicada foram determinados a partir dos ensaios preliminares de compressão uniaxial.

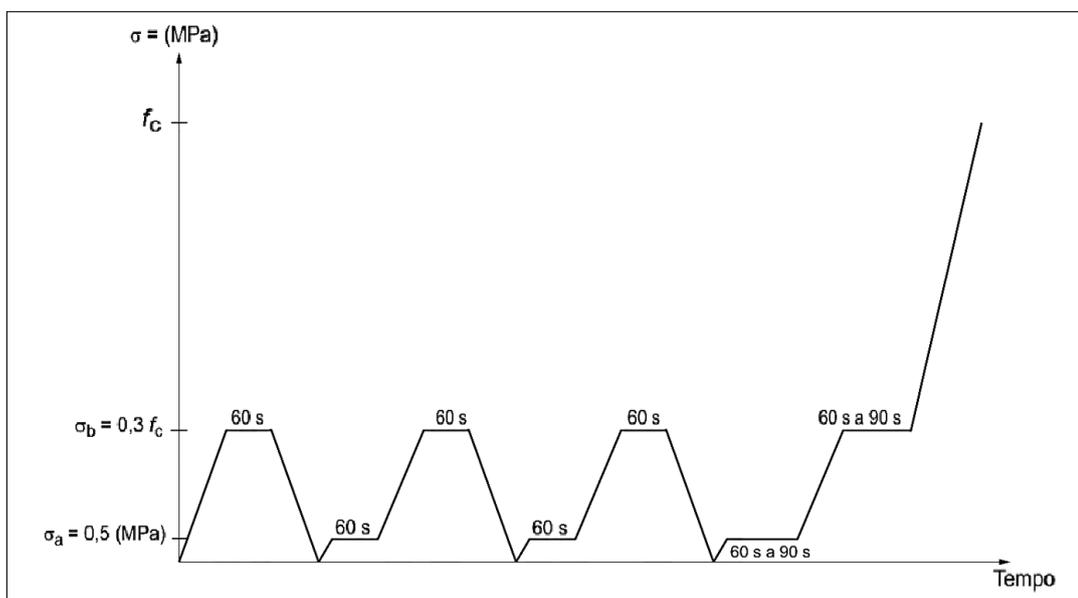


Figura 22 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade.

Fonte – Adaptado de NBR 8522 (2017).

Atingido o limite de 30% da Força F_c , os provetes foram mantidos sob a ação da carga durante 60 segundos, período após o qual se iniciou a descarga. Neste processo, a deformação axial foi medida a partir de três transdutores de deslocamentos (LVDT, do inglês *linear variable differential transformers*) equidistantes (distanciados a 120°), montados em anéis fixos aos provetes e espaçados em 100 mm (Figura 23).

Para a obtenção do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) foi aplicada a Equação 3.20, através da qual obteve-se a média dos valores pela Equação 3.21. Porém, como comentado na seção anterior, os provetes das composições 2 e 3 foram ensaiados aos 27 e 26 dias, respectivamente, e devem ser majorados para os 28 dias, conforme a Equação 3.22. Para realizar tal operação, é preciso considerar, conforme a norma NP EN 1992-1-1 (2010), que o módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) é igual a 1,05 do módulo de elasticidade secante



Figura 23 – Ensaio da determinação do módulo de elasticidade do betão.

Fonte – Autoria própria (2021).

(E_{cm}), como apresenta a Equação 3.23.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} * 10^{-3} \quad (3.20)$$

$$E_{ci}(t) = \frac{1}{n} * \sum_{n=1}^n E_{ci} \quad (3.21)$$

$$E_{cm} = \frac{E_{cm}(t)}{(f_{cm}(t)/f_{cm})^{0,3}} \quad (3.22)$$

$$E_{cm}(t) = E_{ci}(t)/1,05 \quad (3.23)$$

Onde,

E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente inicial;

σ_b Tensão igual a 30% da Força F_c ;

σ_a Tensão igual a 0,5 MPa;

ε_b Deformação referente a 30% da Força F_c ;

ε_a Deformação referente a a 0,5 MPa;

n é o número de amostras ensaiadas;

$f_{cm}(t)$ é a tensão média de rotura na idade t do betão (MPa);

f_{cm} é a tensão média de rotura aos 28 dias de idade (MPa);

E_{cm} é o módulo de elasticidade secante aos 28 dias de idade;

$E_{cm}(t)$ é o módulo de elasticidade secante à idade t em dias.

Além disso, é importante salientar que diferentemente do Eurocódigo, a norma brasileira NBR 8522 (2017) define que os provetes devem ser mantidos, ao final da descarga, sob a ação de 0,5 MPa durante 60 segundos (Figura 22). Assim, a chamada tensão σ_a do Eurocódigo é sempre 0,5 MPa para a análise brasileira. Isso significa que o valor mínimo de aplicação não depende dos ensaios preliminares de compressão uniaxial, mas é um valor fixo.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises acerca dos ensaios do estado fresco (Slump Flow Test, Slump Flow T500, Funil V e Caixa L) e do estado endurecido (resistência à compressão axial, à tração e módulo de elasticidade), definidos detalhadamente no programa experimental do capítulo 3. Além disso, também serão apresentados as análises dos impactos econômicos e ambientais das composições de BAC produzidas, com base na literatura existente.

4.1 RESULTADOS COM O BETÃO FRESCO

Assim como mencionado em capítulos anteriores, foram calculadas três composições com três percentuais de pasta diferentes em cada uma, totalizando em nove misturas. Porém, na prática, somente três misturas foram ensaiadas no estado endurecido, pois as demais apresentaram valores incompatíveis com os requisitos mínimos das normas europeias para os ensaios do estado fresco.

O ensaio decisivo para a escolha das composições foi o Slump Flow Test, cujo requisito mínimo é um espalhamento de 550mm, conforme a norma NP EN 206-1 (2010). Caso uma mistura apresentasse um valor de espalhamento inferior a 550mm, a mesma era descartada e partia-se para a produção da composição seguinte. Caso contrário, seguia-se com a presente composição para a realização dos demais ensaios do estado fresco e posterior moldagem dos provetes necessários aos ensaios no estado endurecido.

É importante ressaltar que a existência de composições com espalhamento inferior ao exigido não traduz um mal dimensionamento das composições de BAC. Tal fato pode ser explicado por Vieira (2010), que afirma que ensaios bem sucedidos em pastas de cimento podem não apresentar, necessariamente, um comportamento satisfatório em betões. Porém, nunca foi registrado um comportamento satisfatório em betões e ineficiente em pastas.

Este procedimento de exclusão foi adotado, pois os requisitos estabelecidos ao BAC para a determinação do seu volume de pasta são aqueles que atendem, obrigatoriamente, às seguintes propriedades: capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre armaduras e estabilidade ou ausência de segregação. Isso significa que caso a propriedade de preenchimento avaliada pelo Slump Flow Test não fosse atendida, não havia razões para seguir com os demais ensaios.

Portanto, através da Tabela 18 percebe-se que as composições 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 e

3.1 não atingiram o espalhamento mínimo de 550mm exigido ao Slump Flow Test e por não poderem ser consideradas como um betão auto compactável, foram descartadas. Já no caso da mistura 3.3, como a anterior (3.2) já havia atendido ao requisito do espalhamento e como o objetivo deste trabalho é a produção de um betão auto-compactável com o menor consumo de cimento possível, a mesma não foi produzida.

Tabela 18 – Resultados obtidos nos ensaios do estado fresco

Ensaio	Descrição	Composição 1			Composição 2			Composição 3		
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
Slump Flow Test	Espalhamento (mm)	< 550	< 550	629,0	< 550	< 550	612,8	< 550	604,5	-
Slump Flow T500	Tempo T500 (segundos)	-	-	4,19	-	-	5,71	-	5,09	-
Funil V	Tempo t_v (segundos)	-	-	8,30	-	-	11,32	-	10,40	-
Caixa L	Habilidade passante	-	-	0,925	-	-	0,887	-	0,831	-

Fonte – Autoria própria (2021).

Isso demonstra que das nove composições calculadas, oito foram executadas, sendo apenas três com a habilidade de preenchimento necessária ao BAC. Nas subseções seguintes, os resultados serão analisados individualmente e entre si, de modo a comparar os valores limites estabelecidos pelas normas portuguesa e brasileira. De forma a facilitar essa análise, a tabela abaixo resume os principais parâmetros variáveis das misturas validadas.

Tabela 19 – Parâmetros das misturas resultantes

Parâmetros	Mistura 1.3	Mistura 2.3	Mistura 3.2
Superplastificante (sp/c)	0,45%	0,40%	0,40%
Sílica de fumo (sf/c)	5%	10%	15%
Teor de pasta	36,0%	35,5%	34,0%
Consumo de cimento (kg/m^3)	296,5	298,2	291,1

Fonte – Autoria própria (2021).

4.1.1 Habilidade de preenchimento

Essa habilidade foi analisada pelo Slump Flow test através do espalhamento. De acordo com a NBR 15823-1 (2017) e a com NP EN 206-1 (2010), o fato do espalhamento estar entre 550 mm e 650 mm, classifica-o como classe SF1, o que implica que os betões analisados

são melhor aplicados para estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, ou então, para estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal de BAC, como sapatas e elementos de fundação profunda.

Apesar do mínimo ser 550mm, a NBR 15823-1 (2017) sugere que um espalhamento entre 660 mm a 750 mm (classe SF2) é adequado para a maioria das aplicações correntes (vigas, pilares, painéis de fechamento, etc). Já para uma estrutura com alta densidade de armadura ou com forma geométrica complexa, o ideal é que o espalhamento seja entre 760 mm e 850 mm (classe SF3), em que se obtém melhor qualidade de acabamento da superfície. Porém, um betão com maior espalhamento torna-se mais difícil de controlar sua resistência à segregação, se comparado com outro com menor espalhamento.

Além disso, houve um decréscimo de 2,8% e 4,2% no espalhamento das misturas 2.3 e 3.2 se comparadas com a mistura 1.3, que possui o maior espalhamento (629,0 mm). Os resultados são coerentes, já que a mistura 1.3 é que possui maior teor de superplastificante (cujo princípio básico de funcionamento é por dispersão de partículas de cimento, o que provoca um aumento significativo de espalhamento) e entre a 2.3 e a 3.2, que apesar de compartilharem do mesmo teor de superplastificante, possuem diferentes teores de sílica - que é um agente de aumento de coesão (ADIL; KEVERN; MANN, 2020).

Assim, com base nos resultados obtidos, percebe-se que o teor de sílica foi determinante para a obtenção do maior valor de espalhamento, conforme apresentado na Figura 24. Neste ensaio também foi possível observar a ocorrência ou não de exsudação e segregação das misturas. Nota-se na Figura 25 que não houve exsudação e também não ocorreu a separação dos agregados da pasta.

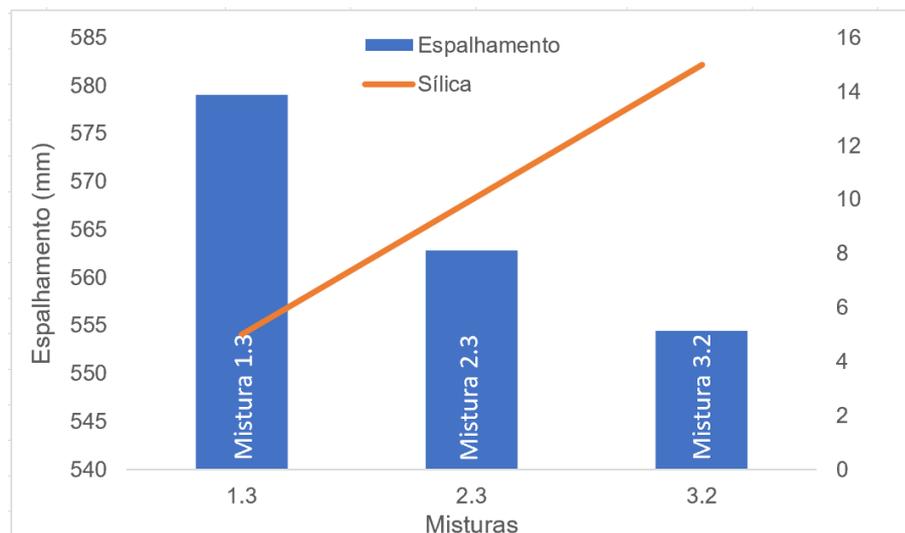


Figura 24 – Gráfico do espalhamento das misturas em função do teor de sílica

Fonte – Autoria própria (2021).



Figura 25 – Pormenor do espalhamento da mistura 2.3
Fonte – Autoria própria (2021).

4.1.2 Fluidez

A determinação da fluidez, inverso da viscosidade, é importante quando for requerido um bom acabamento superficial ou quando a densidade de armadura for expressiva. Um BAC com baixa viscosidade apresenta um rápido espalhamento, porém de curta duração, enquanto que um BAC com alta viscosidade pode continuar a se mover de forma lenta e progressiva por um tempo maior. Essa propriedade foi avaliada pelo Slump Flow T500 e pelo ensaio do funil V.

De acordo com a NBR 15823-1 (2017) e a com NP EN 206-1 (2010), o resultado destes dois ensaios devem ser coerentes entre si. Misturas com tempo T500 menor ou igual a 2 segundos (classe VS1), devem possuir tempo t_v menor ou igual a 8 segundos (VF1). Já misturas com tempo T500 maiores que 2 segundos (VS2), devem possuir tempo t_v entre 9 e 25 segundos (VF2). A Figura 26 apresenta este comportamento.

Assim, as três misturas são classificadas como VS2 e VF2, o que implica que os betões analisados são adequados para a maior parte das aplicações correntes (vigas, lajes, etc), com exceção da indústria de pré-moldados e aplicações de betão aparente, em que o ideal são as classes VS1 e VF1. Essa presente classificação significa ainda que os betões apresentam melhor resistência à segregação, mas podem acarretar efeitos negativos na superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.

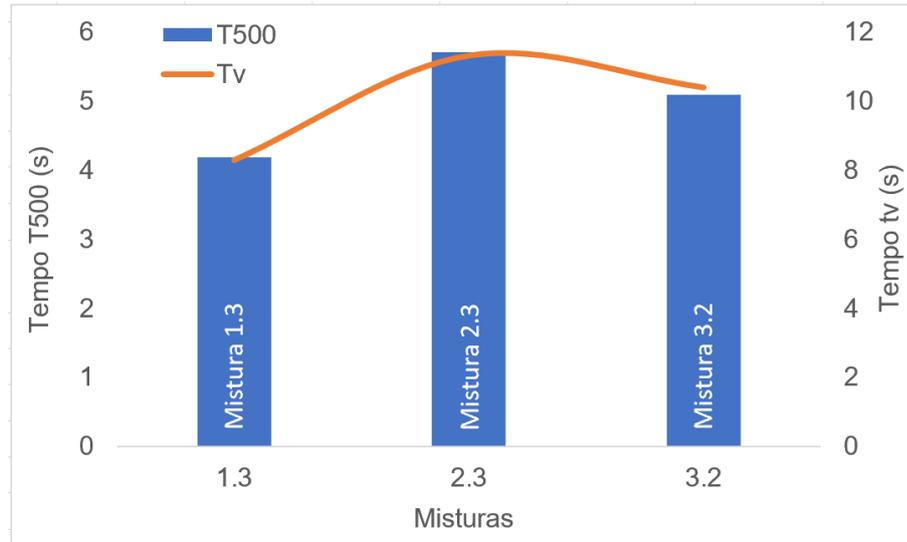


Figura 26 – Gráfico do tempo T500 das misturas em função do tempo tv

Fonte – Autoria própria (2021).

Além disso, é importante ressaltar que houve um acréscimo de 36,3% e 21,5% no tempo T500 das misturas 2.3 (5,71s) e 3.2 (5,09s) se comparadas com a mistura 1.3, que possui o menor tempo (4,19 segundos). Já no tempo t_v , o menor tempo é da mistura 1.3 (8,3s), sendo os resultados das misturas 2.3 e 3.2, 36,4% e 25,3% maiores, respectivamente.

Sabe-se que quanto maior o teor de sílica, maior a tendência da viscosidade aumentar e portanto, o comportamento deveria ser uniforme. Porém, nestas misturas, além do teor de sílica, o teor de pasta e superplastificante também são variáveis, o que impossibilita de se obter um comportamento uniforme. Ou seja, o resultado da mistura 1.3 ser o melhor pode ser explicado pelo fato da mesma possuir o maior teor de superplastificante combinado com o menor teor de sílica. Já os resultados das misturas 2.3 e 3.2, apesar de parecerem incoerentes inicialmente, estão dentro do esperado. A terceira mistura é a que possui o maior teor de sílica e portanto, deveria apresentar tempos T500 e t_v menores que a segunda mistura.

Porém, isso não ocorre e tal comportamento pode ser explicado pelo fato da mistura 3.2 possuir um teor de pasta 4,5% maior que a 2.3, conforme apresenta a Figura 27. Dentre as forças atuantes no agregado submerso na pasta de cimento, a força de arrasto é aquela exercida pela pasta de cimento. Quanto mais pasta houver, maior será essa força que é diretamente proporcional à tensão de escoamento - como mostra a Equação 4.1. Essa tensão é inversamente proporcional a viscosidade, conforme apresentado pela Equação 4.2.

$$F_{drag} = \tau_0 * A_p \quad (4.1)$$

$$\eta * \gamma = \tau - \tau_0 \quad (4.2)$$

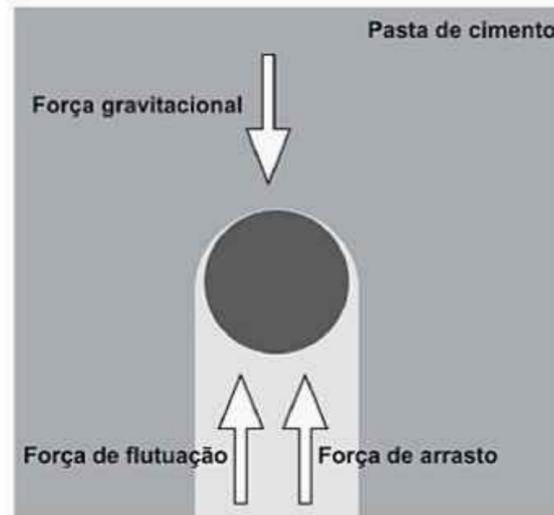


Figura 27 – Representação do agregado suspenso na pasta cimento.
 Fonte – Adaptado de Saak, Jennings e Shah (2001).

Onde,

F_{drag} é a força de arrasto (kN);

τ_0 é a tensão de escoamento (kN/m^2);

A_p é a área da seção transversal da partícula submersa na pasta de cimento (m^2);

η é a viscosidade plástica (Pa.s);

γ é a taxa de corte (s^{-1});

τ tensão de cisalhamento (Pa);

Portanto, quanto maior a tensão de escoamento, menor será a viscosidade e consequentemente, maior será a velocidade com que o fluido se movimentará, conforme apresenta na Figura 27. Isso significa que, além de estarem em conformidade com as normas portuguesa e brasileira, os resultados obtidos são coerentes.

4.1.3 Habilidade passante

A habilidade passante informa sobre a capacidade de o betão fresco fluir, sem perder sua uniformidade ou causar bloqueio, através de espaços confinados e descontinuidades geométricas, como áreas de alta densidade de armadura e embutidos. Esta característica foi avaliada pelo ensaio da Caixa L, sendo o resultado classificado como PL2 para todas as misturas (maior ou igual a 0,8 para caixas com três barras de aço).

Esta classificação implica que os betões analisados são adequados para a maioria das aplicações correntes (vigas, pilares, tirantes, elementos pré-fabricados, etc). Além disso, podem ser aplicados em elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm.

Quanto aos resultados, as composições 2 e 3 apresentaram uma redução na habilidade

passante de 4,1 e 10,2%, respectivamente, em relação a composição 1. Esta diferença pode ser compreendida através de dois quesitos: a relação agregado miúdo/agregado graúdo da mistura e o teor de sílica. O primeiro deve ser baixo, de modo que as partículas individuais do agregado graúdo sejam completamente revestidas por uma camada de argamassa. Isso reduz o contato entre as partículas de agregado e e aumenta a habilidade de passagem por obstáculos do BAC. No caso das três misturas analisadas, esta relação manteve-se constante e igual a 0,7.

Já o segundo quesito, como já apresentado anteriormente, o teor de sílica possui um grande impacto na fluidez do betão. Carneiro (2018), Adil, Kevern e Mann (2020), Mustapha, Sulaiman A. Mohamed e Umara (2020) afirmam que a utilização de sílica (adição mineral de alta superfície específica), se comparada com outras adições - como o micro fíler, por exemplo - resultam em betões com maior viscosidade (menor fluidez), produzindo perda na mobilidade do betão.

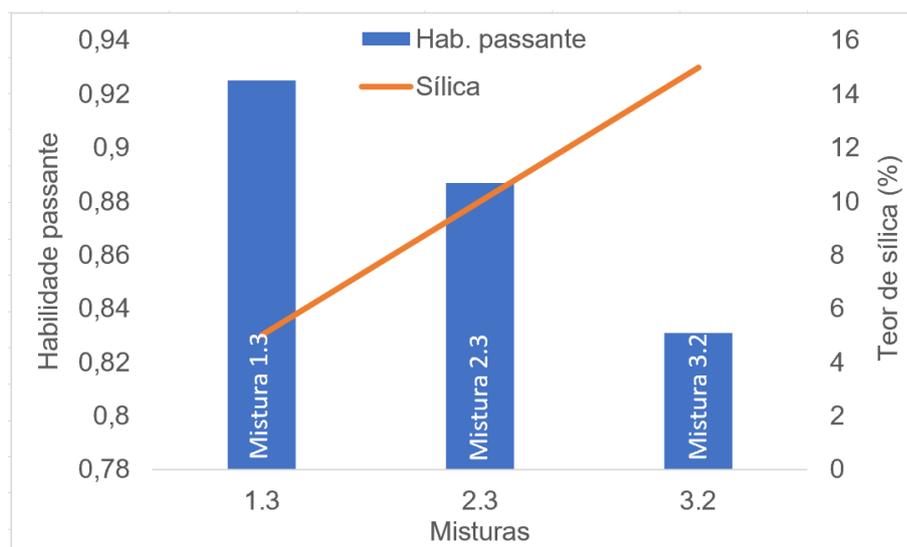


Figura 28 – Gráfico da habilidade passante das misturas em função do teor de sílica

Fonte – Autoria própria (2021).

Portanto, como apresentado na Figura 28, o teor de sílica foi crucial na determinação da habilidade passante o que resultou num comportamento uniforme, em que a mistura com menor teor, foi a mais hábil. Ainda, é importante frisar que segundo a EFNARC (2005), para lajes de pequena espessura, nas quais o espaçamento entre as armaduras é maior que 80 mm, e outras estruturas em que o espaçamento é maior que 100 mm, não é exigida especificação da habilidade de passagem.

4.2 RESULTADOS COM O BETÃO ENDURECIDO

Para os ensaios no estado endurecido foram ensaiados somente as composições que obtiveram resultados satisfatórios no estado fresco, são elas: a 1.3, a 2.3 e a 3.2, como apresentado anteriormente. Com os provetes moldados, foi possível verificar a massa volúmica (também chamada no Brasil, de massa específica) de cada composição, além de calcular o volume total (m^3), o rendimento (m^3), o índice de ar e o teor de ar incorporado no betão (%), conforme as equações abaixo. Os resultados estão apresentados na tabela 20.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V}100 \quad (4.3)$$

$$V_t = \sum_{n=1}^n \frac{m_n}{\rho_n} \quad (4.4)$$

$$R = \frac{m_n}{\rho_{ap}} \quad (4.5)$$

$$I_a = \frac{R}{V_t} \quad (4.6)$$

$$A_i = \left(1 - \frac{1}{I_a}\right) * 100 \quad (4.7)$$

Onde,

ρ_{ap} é a massa volúmica aparente do betão (kg/m^3);

m é a massa do provete de betão (kg);

V é o volume do provete de betão (m^3);

V_t é o volume total dos componentes da mistura (m^3);

m_n é a massa dos diversos (n) materiais que compõem o betão (kg);

ρ_n é a massa volúmica dos diversos (n) materiais que compõem o betão (kg/m^3);

R é o rendimento do betão (m^3);

I_a é o índice de ar presente na betão;

A_i é o teor de ar incorporado ao betão (%);

Este parâmetro serve como um indicador da utilização, pois determinadas obras especificam o betão a ser empregado como leve, normal ou pesado. De acordo com a NP EN

Tabela 20 – Massas volúmicas das composições analisadas

Parâmetro	Composição 1	Composição 2	Composição 3
Número de amostras	8	8	8
Massa média (kg)	12,06	12,10	12,13
Volume total (m^3)	57,61	58,57	58,89
Altura média (cm)	29,48	29,55	29,55
Massa volúmica (kg/m^3)	2315,85	2317,16	2321,94
Rendimento (m^3)	0,044	0,045	0,046
Índice de ar (%)	0,076	0,077	0,078
Teor de ar incorporado (%)	12,10	12,03	11,86

Fonte – Autoria própria (2021).

206-1 (2010), betões com massa volúmica entre 2000 e 3000 kg/m^3 são considerados normais, sendo abaixo e acima considerados betões leves e pesados, respectivamente.

Assim, para o caso em questão, todas as composições podem ser classificadas como normais quanto a massa volúmica. Já em relação aos ensaios realizados, de forma resumida, a Tabela 21 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Nas subseções seguintes, estes valores serão analisados individualmente e entre si, de modo a comparar os valores limites estabelecidos pelas normas portuguesa e brasileira.

Tabela 21 – Resultados obtidos nos ensaios do estado endurecido

Ensaio	Parâmetro	Composição 1	Composição 2	Composição 3
Resistência à compressão axial	f_{ck} (MPa)	50,68	52,20	54,12
Resistência à tração por compressão diametral	f_{ctm} (MPa)	4,03	3,62	3,81
	$f_{ctk,inf}$ (MPa)	2,82	2,54	2,66
Módulo de elasticidade	E_{cm} (GPa)	30,03	30,49	31,57

Fonte – Autoria própria (2021).

4.2.1 Resistência a compressão axial

Como citado na seção 3.6.2, os provetes foram ensaiados à compressão axial com diferentes idades: 28 dias para a composição 1, 27 para a composição 2 e 26 para a composição 3. Sendo assim, foi preciso majorar os valores para 28 dias, conforme recomendação da NP EN 1992-1-1 (2010). As equações utilizadas para tal estão apresentadas na seção 3.6.2 e os resultados

individuais de cada cálculo apresentados na tabela 29 do Apêndice C

Através da Tabela 21, apresentada anteriormente, em que a resistência à compressão já encontra-se majorada para os 28 dias, percebe-se um sutil aumento da resistência com o aumento do teor de sílica: cerca de 3,0 e 6,8% de ganho de resistência nas composições 2 e 3, respectivamente, se comparadas com a primeira. É importante destacar que a diferença de resistência entre as composições deveria ser mais discrepante, como encontrado na literatura, em que o aumento do teor de sílica proporciona maiores resistências (ELEMAM *et al.*, 2020; MUSTAPHA; SULAIMAN A. MOHAMED; UMARA, 2020; ADIL; KEVERN; MANN, 2020).

Porém, tal comportamento pode ser atrelado a redução do consumo de cimento, resultando em valores de resistência próximos. Nesse sentido, a Figura 29 apresenta o comportamento da resistência à compressão em função do teor de sílica, que varia de 5 a 15%, e do consumo de cimento que varia de 291,1 a 296,5 kg/m^3 (sendo as composições 1.3 e 2.3 com consumos 1,9 e 2,4% maiores que a 3.2).

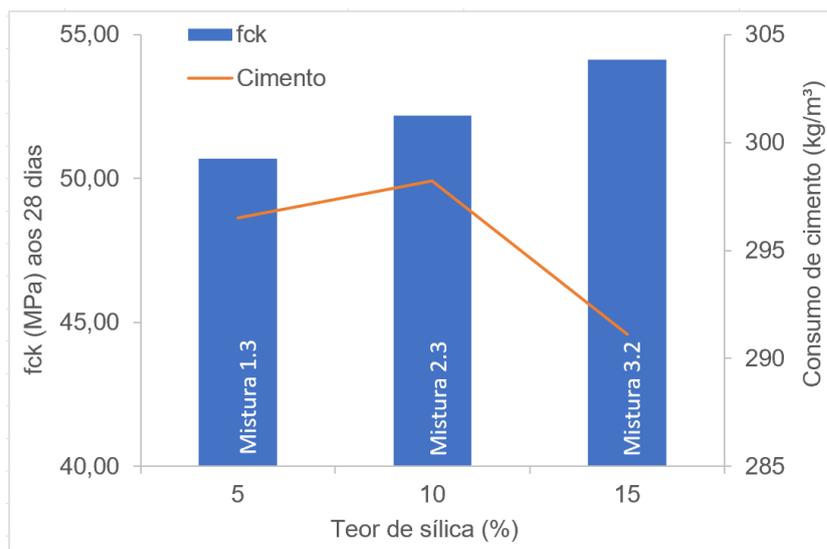


Figura 29 – Gráfico da resistência à compressão axial em função do teor de sílica e consumo de cimento

Fonte – Autoria própria (2021).

Através do gráfico, nota-se que a mistura 3 apresenta a maior resistência, o maior teor de sílica, porém o menor consumo de cimento. Tal resultado demonstra que mesmo um baixo consumo do aglomerante pode resultar em bons valores de resistência, desde que dosado com um teor de adição mineral correto.

Quanto ao f_{ck} , conforme o NP EN 206-1 (2010), o betão nas composições 1 e 2 pode ser classificado como da classe C50/60 e na composição 3, C55/67. Tal classificação significa que eles podem ser utilizados para qualquer classe de exposição ambiental da NP EN 206-1 (2010), pois a mais extrema - a XC4 - exige classe de resistência mínima igual a C35/45,

conforme exposto no Anexo A. De mesmo modo, com base na norma brasileira NBR 6118 (2014), os betões em questão podem ser utilizados para qualquer classe de exposição ambiental, inclusive em estruturas pré-esforçadas, pois a mais exigente é de 40 MPa para provetes cilíndricos, conforme exposto no Anexo B.

Além disso, é preciso analisar a resistência à compressão axial para o caso de estruturas pré-esforçadas com aderência inicial (pré-tensão). Isto porque, em geral, estes elementos são pré-tensionados em indústrias de pré-fabricação que visam agilidade no processo produtivo. Assim, uma estratégia utilizada é a descofragem no terceiro após a betonagem e portanto, deve-se verificar a resistência em função da característica à compressão aos 28 dias (f_{ck}).

De acordo com Veríssimo e César (1998), aos 3 dias de idade, o betão produzido com cimento de alta resistência inicial deve apresentar no mínimo 55% do f_{ck} . Assim, a Tabela 22 apresenta os valores encontrados, a partir dos quais verifica-se a condição nas três composições.

Tabela 22 – Resistência à compressão axial aos 3 dias de idade

Parâmetro	Composições		
	1	2	3
Idade t (dias)	3	3	3
f_{cm} (MPa)	53,76	55,71	59,33
$f_{cm,t}$ (MPa)	35,64	36,93	39,33
$f_{ck}(t)$ (MPa)	27,64	28,93	31,33
$f_{ck}(t)/f_{ck}$	0,55	0,55	0,58

Fonte – Autoria própria (2021).

Por fim, deve-se analisar se a rotura dos provetes atende alguma das quatro possibilidades que a NP EN 12390-6 (2011) estabelece, conforme apresentado na seção 3.6.2. Assim, através da Figura 30 percebe-se que todos os provetes rompidos à compressão apresentaram rotura satisfatória para o Eurocódigo e também para a NBR 5739 (2018).

Além disso, é importante destacar que inicialmente, optou-se por verificar o deslocamento dos provetes até a rotura à compressão axial, tendo como objetivo o registo do diagrama completo tensão deformação do betão. Porém, ao ensaiar o primeiro provete, o mesmo apresentou um comportamento frágil (Figura 31) e como a análise não estava focada nesse comportamento, optou-se por obter os diagramas somente até o limiar do patamar elástico.



Figura 30 – Rotura dos provetes à compressão

Fonte – Autoria própria (2021).

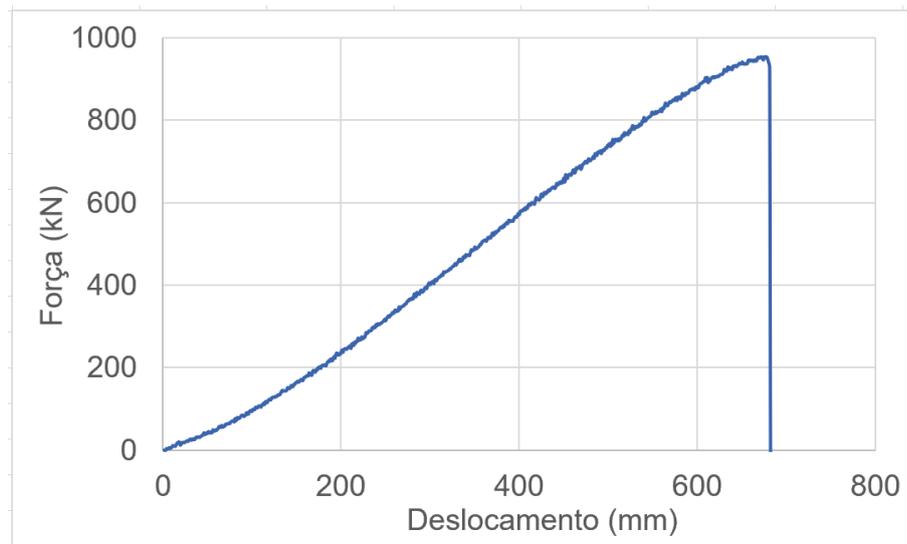


Figura 31 – Força aplicada ao provete em função do seu deslocamento

Fonte – Autoria própria (2021).

4.2.2 Módulo de elasticidade tangente inicial

Conforme explicado no Capítulo 3.6.3, o carregamento do ensaio foi aplicado de forma cíclica, como apresenta a Figura 32 referente a um provete da mistura 3.2. É importante destacar que como foi optado por obter os deslocamentos somente até o limiar do patamar elástico, a Figura 32 contém somente os carregamentos até 30% da força F_c .

Os provetes das composições 2 e 3 não foram ensaiados aos 28 dias e por este motivo, devem ser majorados. A NP EN 1992-1-1 (2010) especifica a majoração apenas para o módulo de elasticidade secante (E_{cm}) e portanto, foi preciso transformar o valor do ensaio, o módulo de

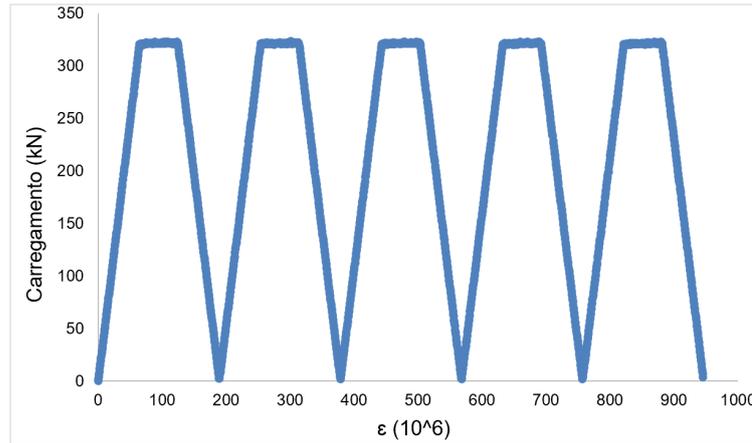


Figura 32 – Deformação dos provetes em função do seu carregamento (kN)

Fonte – Autoria própria (2021).

elasticidade tangente inicial na idade t dias ($E_{ci}(t)$), no módulo de elasticidade secante (E_{cm}). As equações necessárias para tal transformação foram apresentadas no subcapítulo 3.6.3, de modo que a Tabela 23 contém os resultados dos cálculos.

Tabela 23 – Valores do módulo de elasticidade tangente inicial e secante

Parâmetro	Composição 1	Composição 2	Composição 3
$E_{ci}(t)$	31,54 GPa	31,98 GPa	33,07 GPa
$E_{cm}(t)$	30,03 GPa	30,46 GPa	31,50 GPa
E_{cm}	30,03 GPa	30,49 GPa	31,57 GPa

Fonte – Autoria própria (2021).

Quanto aos resultados em si, as composições 2 e 3 apresentaram módulo de elasticidade (ME) 2,1 e 5,2% maiores que a composição 1. Portanto, percebe-se uma tendência de aumento de ME com o aumento do teor em sílica (Figura 33). Sabe-se que quanto maior for este módulo, mais rígido será o material e menor será a deformação elástica resultante de uma tensão. Portanto, é possível afirmar para o estudo em questão, que a utilização de sílica no betão confere rigidez, indo ao encontro de Metha e Monteiro (2014) e Carneiro (2018).

Conforme Tutikian e Molin (2008) e Rebmann (2011), o módulo de elasticidade é fortemente influenciado, além do teor de sílica, pelas características elásticas dos agregados e como apresentado anteriormente, betões com baixo consumo de cimento apresentam maiores proporções de agregados. A mistura 3.2 é um exemplo desta situação: ela possui o maior teor de sílica e o menor consumo de cimento, resultando no maior ME das composições.

Porém, ao ensaiar o primeiro provete, o mesmo apresentou um comportamento frágil (Figura 31) e como a análise não estava focada nesse comportamento, optou-se por ensaiar os demais até o limiar do patamar elástico.

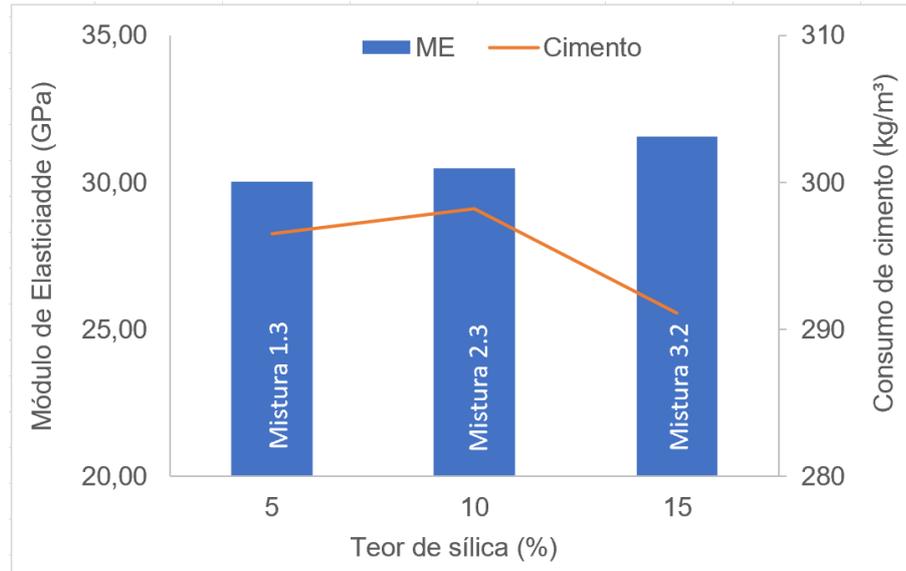


Figura 33 – Módulo de elasticidade secante em função do teor de sílica e consumo de cimento

Fonte – Autoria própria (2021).

4.2.3 Resistência à tração por compressão diametral

Como citado na seção 3.6.1, é preciso calcular a resistência média do betão à tração (f_{ctm}) e a resistência característica à tração inferior do betão ($f_{ctk,inf}$) de modo a utilizar esses valores para comparação com a literatura existente. As equações utilizadas pra tal estão apresentadas na seção 3.6.2 e os resultados individuais de cada cálculo apresentados na Tabela 24 abaixo.

Tabela 24 – Resultados do ensaio resistência à tração por compressão diametral do betão aos 28 dias

Parâmetro	Composição 1			Composição 2			Composição 3		
	1P1	1P2	1P3	2P1	2P2	2P3	3P1	3P2	3P3
Provetes	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Idade (dias)	28	28	28	28	28	28	28	28	28
F_{max} (kN)	324,47	329,09	296,61	293,99	281,27	275,33	293,94	299,89	307,97
$f_{ct,sp}$ (MPa)	4,59	4,66	4,20	4,19	3,99	3,90	4,16	4,20	4,33
f_{ct} (MPa)	4,13	4,19	3,78	3,77	3,59	3,51	3,74	3,78	3,90
f_{ctm} (MPa)	4,03			3,62			3,81		
$f_{ctk,inf}$ (MPa)	2,82			2,54			2,66		

Fonte – Autoria própria (2021).

Com base na Tabela 24, percebe-se uma certa incoerência no resultado da composição 2. Isso porque, conforme estudado por Adil, Kevern e Mann (2020) e Seelapureddy, Bommisetty e Seshagiri (2020), a maior resistência à tração é encontrada na composição de BAC com 5% de sílica e tende a reduzir de forma linear com o aumento da adição.

Através da Figura 34, apesar da composição 1 ter apresentado o maior valor, indo ao encontro dos autores, a composição 2 resultou em uma menor resistência que a 3. Houve cerca de 11,0 e 6,0% de redução da resistência nas composições 2 e 3, respectivamente, se comparadas com a primeira. Tal variabilidade pode ser explicada pelo índice de ar incorporado aos provetes da composição 2 ser maior que a da terceira mistura: cerca de 3%, justificando a pequena diferença entre resultados de resistência.

Em relação ao consumo de cimento, ainda na Figura 34, observa-se que os valores obtidos não foram influenciados na mesma intensidade que em relação ao teor de sílica, por exemplo. Tal fato vai ao encontro de Barboza, Almeida e Storch (2020), que afirma que em relação a resistência à tração os BACs com baixo consumo de cimento comportam-se da mesma forma que aqueles com consumo de cimento convencional. Isso significa que para esta propriedade, a redução do cimento não compromete a resistência, nem positiva nem negativamente.

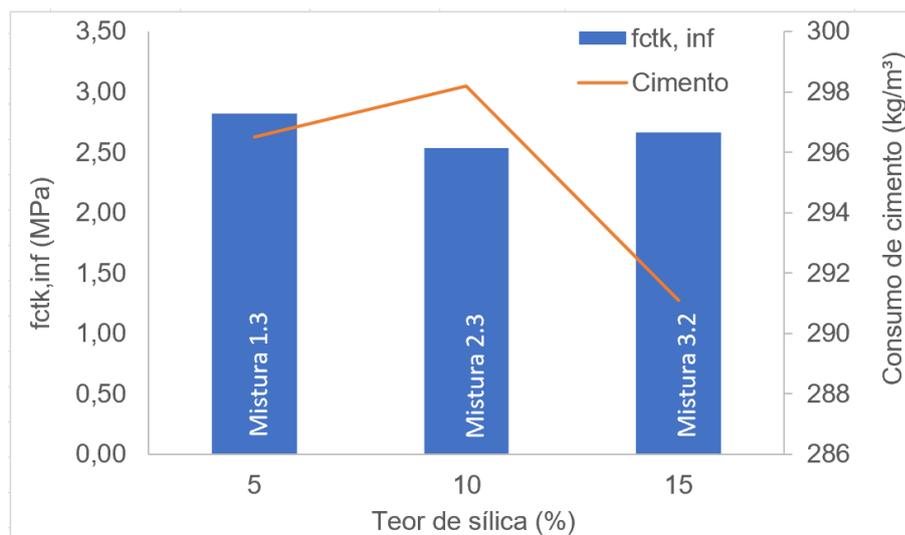


Figura 34 – Resistência à tração por compressão diametral em função do teor de sílica e cimento
Fonte – Autoria própria (2021).

4.3 ANÁLISE AMBIENTAL

Conforme apresentado em 2.2, uma forma eficiente de avaliar quão ecológico um betão é, em termos de emissão de dióxido de carbono, é através do índice de aglomerantes b_i ($kg/m^3/MPa$), que mede o consumo de aglomerantes de um betão (cimento e adições) para uma unidade de resistência à compressão. Assim, as composições 1, 2 e 3 apresentaram um b_i de 5,52, 5,35 e 4,91 $kg/m^3/MPa$, respectivamente, sendo as duas primeiras composições com índices cerca de 12,4 e 9,0% maiores que a terceira. A Figura 35 ilustra esse comportamento.

Apesar da composição 1 apresentar um consumo de cimento inferior a composição

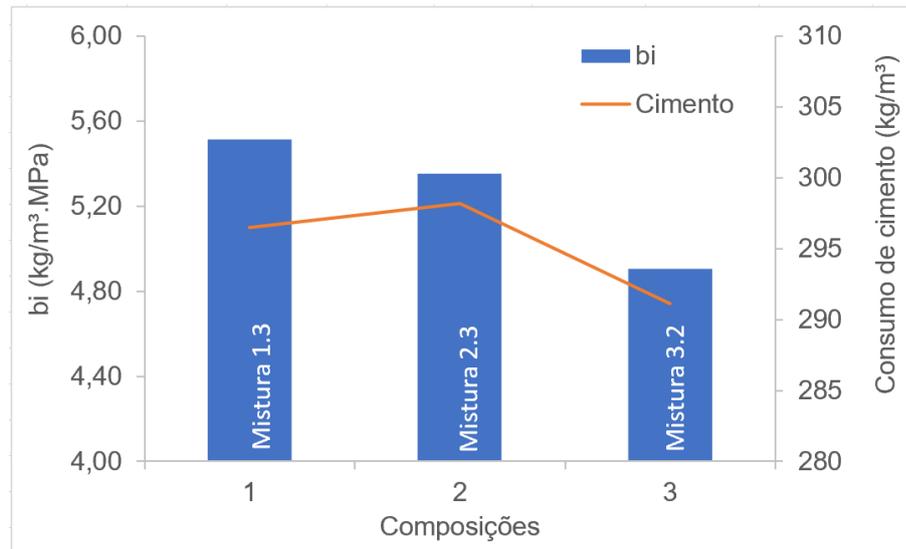


Figura 35 – Índice de aglomerantes das composições em função do consumo de cimento

Fonte – Autoria própria (2021).

2, o seu índice de aglomerantes é superior. Isso ocorre pois a resistência à compressão axial, utilizada para cálculo do índice b_i , não depende somente do consumo de cimento, mas de um conjunto de diversas variáveis como teor de adjuvante, teor de adição, proporção de agregados, etc.

Além disso, é importante que apesar da classificação de WALLEVIK (2006) considerar as três composições como ECO, devido ao consumo de cimento ser inferior a 315 kg/m^3 , para Matos, Sakata e Prudêncio (2019) apenas a composição 3 pode ser classificada como tal. Tal fato se dá, pois o autor considera que apenas composições com índices de até $5 \text{ kg/m}^3 / \text{MPa}$ são indicadores de betões ecoeficientes, enquanto que em betões convencionais, esse valor costuma estar entre 10 a $20 \text{ kg/m}^3 / \text{MPa}$.

Assim, em relação a redução das emissões de CO_2 , a composição 3 é mais eficiente, seguida da composição 2 e por fim, a 1, como ilustrado na Figura 35. Este comportamento vai ao encontro do aquele afirmado ao final da seção 2.2: um elevado consumo de cimento e adições não resulta, necessariamente, em um betão mais resistente, mas em um betão altamente poluente.

4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

Para verificar a viabilidade da elaboração dos betões auto-compactáveis propostos neste estudo, inclui-se uma breve avaliação de custos. Essa verificação se limita ao custo de materiais, visto que uma análise dos custos na mão de obra e equipamentos para produção necessita de uma pesquisa em campo.

Na Tabela 25 são apresentados os custos unitários (€/kg) dos diversos materiais

utilizados nas composições. Tratam-se dos valores para compra dos materiais em questão na região de Bragança, para o segundo semestre do ano de 2020. Ainda nesta mesma tabela estão calculados os custos por metro cúbico de cada uma das composições adquiridas.

Tabela 25 – Custos dos materiais e das composições finais

Material	Custo unitário (€/kg)	Custo (€/m ³)		
		Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3
Cimento	0,2000	59,30	59,64	58,22
Sílica	2,0250	31,52	66,42	101,68
Brita	0,0127	4,87	4,91	5,02
Areia	0,0129	3,45	3,47	3,55
Superplastificante	7,1469	9,54	7,46	8,32
Total (€/m³)		108,68	141,91	176,80
Custo relativo (€/m³.MPa)		2,14	2,72	3,27

Fonte – Autoria própria (2021).

Percebe-se, através da Tabela 25, que para a região de Bragança o preço unitário da sílica de fumo é muito superior ao do cimento, cerca de dez vezes maior, devido ao fato de Portugal não possuir indústrias de fabricação de silício e ligas de ferrossilício - as quais tem como subproduto a sílica. As composições 2 e 3 apresentaram cerca de 30,6 e 62,7% de aumento do custo, em relação a composição 1. Portanto, neste caso, uma maior substituição do material (acima de 5%) não é viável do ponto de vista econômico.

Além disso, o preço pode ser vinculado a resistência à compressão axial aos 28 dias (última linha da Tabela 25), tendo em vista que as duas primeiras composições classificam-se como C50/60 e a terceira como C55/67. A fim de comparar o valor encontrado com um betão convencional, obteve-se os valores de €132,01 e €148,82 para betões de classe C50/60 e C55/67, respectivamente, ambos com *Slump* classe S4 (até 220mm) e d_{max} de 16mm, fornecidos pela AICCOPN - Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas para maio de 2021.

Assim, percebe-se que o custo das composições 1, 2 e 3 ficaram, respectivamente, 21,5% abaixo, 7,5% acima e 18,8% acima dos valores do betão convencional de mesma classe de classe de resistência. Tal comparação apresenta que dificilmente as composições 2 e 3 seriam utilizadas no lugar de um BC, pois o maior custo inviabiliza a sua utilização em larga escala. Já a composição 1 apresenta grande vantagem em relação ao betão convencional, apresentando um valor consideravelmente inferior.

Porém, deve-se lembrar que os valores apresentados são apenas indicativos, podendo

as conclusões variar com base no custo de cada material nas diversas regiões de Portugal. Além disso, para que seja possível afirmar a viabilidade econômica do BAC é preciso uma análise mais aprofundada em relação ao custo, visto que ocorre significativa redução no número e no tempo dos trabalhadores envolvidos, devendo-se, ainda considerar a redução no prazo de entrega.

5 CONCLUSÕES

Este estudo possibilitou avaliar o comportamento do betão auto-compactável no estado fresco e endurecido quando da substituição de sílica de fumo ao cimento, entre 5 a 15%, visando a utilização desses betões em estruturas pré-esforçadas. Foram analisadas nove composições com o consumo de cimento reduzido, em que as relações água/cimento e agregados miúdo/grosso foram mantidas constantes (0,4 e 60/40, respectivamente), enquanto que o consumo de cimento variou entre 271,79 e 299,66 kg/m³ e a relação superplastificante/cimento variou entre 0,1 e 0,5%.

Os resultados dos ensaios no estado fresco indicaram que o uso da adição ao BAC apresenta tendência à reduzir as propriedades de fluidez e de sua habilidade passante à medida que se aumenta o teor de sílica, sendo que das nove composições, apenas três apresentaram bons resultados de espalhamento (propriedade imprescindível ao BAC). Já em relação as propriedades do estado endurecido, o comportamento verificado é o oposto: há uma tendência de aumento das resistências à medida que se aumenta o teor de sílica. Tais fatos se dão devido a zona de transição apresentar menor porosidade nestes betões e aumentar a coesão, indo ao encontro de diversos autores (FORMAGINI *et al.*, 2018; BARBOZA; ALMEIDA; STORCH, 2020; ELEMAM *et al.*, 2020; SMARZEWSKI, 2020; ADIL; KEVERN; MANN, 2020)

De modo a contribuir com a conclusão deste trabalho, a Tabela 26 apresenta todas as propriedades avaliadas com os valores mais eficientes de cada uma delas e com as diferenças, em percentuais, dos valores menos eficientes.

Tabela 26 – Resumo das propriedades avaliadas neste trabalho

Parâmetro	Comparação entre composições (%)		
	1	2	3
Habilidade de preenchimento	579,0 mm	- 2,8%	- 4,2%
Fluidez (t_v)	8,30 s	- 36,4%	- 25,3%
Habilidade passante	0,925	- 4,1%	- 10,2%
Massa volúmica	2315,85 kg/m ³	+ 0,1%	+ 0,3%
Resistência à compressão (f_{ck})	- 6,8%	- 3,0%	54,12 MPa
Resistência à tração (f_{ctm})	4,03 MPa	-10,2%	- 5,5%
Módulo de elasticidade (E_{cm})	- 4,9%	- 3,4%	31,57 GPa
Emissão de CO ₂ (b_i)	+ 12,4%	+ 9,0%	4,91 kg/m ³ /MPa
Custo	108,68 €/m ³	+ 30,6%	+ 62,7%

Fonte – Autoria própria (2021).

Através dos valores obtidos, percebe-se que a composição 1 foi a que apresentou melhores resultados: dentre as nove propriedades analisadas, ela foi a mais satisfatória em seis. Apesar de não ter atingido a maior resistência à compressão, o maior módulo de elasticidade e a menor emissão de CO_2 , a diferença encontrada entre essa composição e as demais não é muito ampla, como apresenta a Tabela 26.

Em relação a composição 3, é importante destacar que apesar de apresentar melhores características mecânicas, o seu custo está muito acima das demais, o que inviabiliza o seu uso. Além disso, é importante frisar que, como apresentado na Tabela 16 da seção 3.4, esta composição desrespeita o limite estabelecido pelo Eurocódigo para a relação sílica/cimento.

Já a composição 2 apresentou resultados medianos para todas as propriedades avaliadas, comportando-se como um meio termo entre as outras duas composições. Porém, é válido ressaltar que no ensaio de resistência à tração, esta mistura apresentou incoerência de resultado, devido ao provável maior índice de ar incorporado.

Constatou-se ainda que, por maior que seja a resistência à tração, isso não significa necessariamente um aumento do módulo de elasticidade, o que vai ao encontro de EL DEBS *et al.* (2008). Outra ressalva que deve ser feita é em relação ao espalhamento obtido, apesar de se encontrar dentro dos limites da norma, de acordo com Gomes e Barros (2009) este deveria atingir 600 mm de modo a resultar em uma habilidade de preenchimento adequada.

Além disso, para a utilização das composições em estruturas pré-esforçadas, concluiu-se que a resistência obtida aos 28 dias é compatível com o sistema proposto, de modo que pode ser aplicado tanto em estruturas pré-tensionadas quanto em pós-tensionadas. Especificamente em relação às pré-tensionadas, verificou-se uma resistência superior a 50% do f_{ck} aos 3 dias de idade, o que viabiliza o seu uso em indústrias de pré-fabricados.

Quanto à análise ambiental, a qual focou-se na redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE), apesar da composição 1 ser aquela que possui o maior índice de aglomerantes (b_i), $5,5 \text{ kg/m}^3/\text{MPa}$, ainda assim ela pode ser considerada como uma composição sustentável, tendo em vista que em betões convencionais este índice costuma variar entre 10 e $20 \text{ kg/m}^3/\text{MPa}$. É importante ressaltar que o menor índice já registrado é de $4,7 \text{ kg/m}^3/\text{MPa}$ nos trabalhos de Matos, Sakata e Prudêncio (2019) e Yazici (2008), ambos utilizando cinzas volantes (adição mineral cuja produção em Portugal está abolida devido ao fechamento das termoelétricas do país, conforme definido no acordo de Paris de 2015).

No que diz respeito ao custo do BAC, para uma análise mais conclusiva, seria preciso desenvolver estudos de campo para observar a viabilidade de produção, lançamento e aplicação

desse betão, a fim de obter dados mais completos de custos. Em relação ao custo da produção do betão em si, com exceção da composição 1, as outras duas apresentaram-se mais dispendiosas que um betão convencional, sendo a composição 3 muito além do BC.

Porém, apesar de Portugal não possuir nenhuma indústria que produza como sub-produto a sílica de fumo, o custo do BAC das composições 1 e 2 com tal adição apresentou-se razoável em relação ao BC, contrapondo o esperado. É importante salientar também que nestes valores não foram contabilizados os ganhos associados à execução mais rápida da estrutura e à maior durabilidade, o que levaria a uma possível aproximação entre os resultados do BAC e BC na composição 3, por exemplo.

Em relação ao cimento, os resultados com consumos abaixo de 300 kg/m^3 foram satisfatórios, demonstrando que é possível produzir um betão de alta resistência com pouco cimento e ainda com um custo muito próximo, senão inferior ao custo de um betão convencional. Tal conclusão só foi possível devido às escolhas adequadas de teor de superplastificante e de adição mineral feitas durante os ensaios em pasta.

Portanto, é importante destacar a eficiência da análise das pastas de cimento, pois permitiu um estudo mais direcionado em betões. Tais ensaios podem não traduzir convenientemente o comportamento reológico dos betões - situação esta que ocorreu neste trabalho, pois certas combinações de superplastificante com cimento podem apresentar um comportamento adequado em pastas e não atingir os desempenhos pretendidos em betões. Porém, conforme Vieira (2010) explica, nunca detectou-se uma combinação que apresentasse um comportamento deficiente em pastas e satisfatório em betões.

Nesse texto, a composição 1 - determinada como a mais eficiente de um modo geral - apresentou um consumo de $296,5 \text{ kg/m}^3$, classe de resistência C50/60, propriedades no estado fresco dentro dos limites impostos pela norma europeia, custo inferior ao seu correspondente betão convencional e emissões de CO_2 também inferiores ao BC.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, cabe fazer as seguintes sugestões para continuidade e complementação deste trabalho:

- Avaliação da durabilidade de estruturas com betão auto-compactável com sílica de fumo, em relação a permeabilidade, penetração de cloretos e resistência à sulfatos;

- Avaliação detalhada quanto ao custo do BAC com sílica em relação ao BC, considerando o transporte e a mão de obra, além do custo dos materiais;
- Aprofundamento na avaliação do BAC com diferentes adições em estruturas pré-esforçadas no que diz respeito a fluência e à tração;
- Avaliação das mesmas propriedades estudadas neste trabalho utilizando betões com fíler calcário, escória de alto-forno ou metacaulino, combinados a um baixo consumo de cimento;
- Teste de produção de BAC em condições reais de obras e análise da viabilidade;
- Avaliação das propriedades mecânicas, frescas e reológicas utilizando consumos de cimentos menores (abaixo do limite imposta pela norma) em BACs.

REFERÊNCIAS

- ADIL, G.; KEVERN, J. T.; MANN, D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 247, n. 118453, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118453>>.
- AGOSTINHO, F.; SICHE, R. Hidden costs of a typical embodied energy analysis: Brazilian sugarcane ethanol as a case study. **Biomass and Bioenergy**, v. 71, p. 69–83, 2014.
- ALCOFORADO, L. F. M. Viabilidade econômica do concreto auto-adensável na construção de prédios em Goiânia - GO. **Revista Especialize IPOG**, 2013.
- ALMEIDA, V. L.; EVARISTO, W. F. O. **Avaliação da influência do aditivo modificador de viscosidade nas propriedades do concreto autoadensável**. 85 p. Tese (Doutorado) — Trabalho de Conclusão de Curso de engenharia civil, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2017.
- APEB. **Betão autocompactável: guia para especificação, produção e utilização**. Portugal: Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto, 2007. 91 p.
- ARAÚJO, F. Q. **Betão auto-compactável eco-eficiente**. 140 p. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2011.
- ARAÚJO, J. M. **Estruturas de concreto : a resistência à tração e energia de fratura do concreto**. Rio Grande do Sul, Brasil: Editora DUNAS, 2001.
- BADOGIANNIS, E.; TSIVILIS, S.; PAPADAKIS, V.; CHANIOTAKIS, E. The effects of mk on concrete properties. **Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction.**, International Congress: Challenges of Concrete Construction, Dundee (UK), v. 31, p. 81–89, 2002.
- BARBOZA, L. S.; ALMEIDA, F. M. Concreto autoadensável com baixo consumo de cimento: Impacto da redução do consumo de cimento na resistência à compressão. **Revista Materia**, v. 23, n. 3, 2018. ISSN 15177076.
- BARBOZA, L. S.; ALMEIDA, F. M.; STORCH, I. S. Concreto autoadensável ecoeficiente com baixo consumo de cimento. **Ambiente Construído, Porto Alegre.**, v. 20, n. 2, p. 59–71, 2020.
- BATTAGIN, A. F. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. Brasil: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.
- BINGHAM, E. C. The new science of rheology. **Review of Scientific Instruments.**, v. 4, n. 9, p. 473–476, 1933.
- BRAGANÇA, L.; TAVARES, S. F. Índices de CO_2 para materiais de construção em edificações brasileiras. **SBE16 Brazil and Portugal - Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment**, 2016.
- CACHIM, P. B. **Estruturas de Betão - Pré-esforço**. 1a. ed. Porto, Portugal: Publindústria, Edições Técnicas, 2016. 178 p.
- CALADO, C. F. A.; CAMÕES, A.; JALALI, S.; BARKOKÉBAS, B. **Concreto auto-adensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC)**. Recife, Brasil: Editora DA Universidade de Pernambuco, 2015.

CARBALLO-PENELA, A.; DOMÉNECH, J. L. Managing the carbon footprint of products: the contribution of the method composed of financial statements (mc3). **Int J Life Cycle Assess**, v. 15, p. 962–969, 2010.

CARNEIRO, R. C. **Análise das propriedades do concreto autoadensável com fibras de aço no estado plástico e endurecido com sílica ativa e com fíler calcário**. Pato Branco: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018. 164 p.

CARVALHO, R. C. **Estruturas em Concreto Protendido – Pré-tração, Pós-tensão, Cálculo e Detalhamento**. 2a. ed. São Paulo, Brasil: Editora Pini Ltda., 2017. 431 p.

CASSAGNABERE, F.; MOURET, M.; ESCADEILLAS, G.; BROILLIARD, P.; BERTRAND, A. Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects. **Construction and Building Materials**., Elsevier Ltd, 2010.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil - revisão. 57 Congresso Brasileiro de Cerâmica., p. 63–75, 2011.

CELIK, K.; MERAL, C.; GURSEL A. P. MEHTA, P. K.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 59 – 72, 2015.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. **Concreto Protendido – Teoria e Prática**. 2a. ed. São Paulo, Brasil: Editora Pini Ltda., 2015. 345 p.

CONTERATO, L. **Rochas Basálticas: Obtenção de Parâmetros Elásticos pelo Ensaio de Tração Indireta**. 107 p. Tese (Doutorado) — Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2011.

COSTA, B. L. C. D. **Quantificação das emissões de CO2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil**. 208 p. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais), Universidade do Rio de Janeiro, 2012.

COUTINHO, B. S. **Propriedades e comportamento estrutural do concreto auto-adensável**. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

CUNHA, I. B. **Quantificação das emissões de CO2 na construção de unidades residenciais unifamiliares com diferentes materiais**. 136 p. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2016.

DACZKO, J. A. **Self-Consolidating Concrete - Applying what we know**. 1st edition. ed. England: CRC Press, 2019. 304 p. ISBN 9780367864927.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 555–562, 2010.

DING, G. K. C. **The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities**. 404 p. Tese (Doutorado) — Dissertação (Doutorado em Filosofia), Universidade de Teconologia de Sydney - Austrália, 2004.

DINIZ, H. A. A.; OLIVEIRA, J. N. de; SILVA, L. P.; MACÊDO, M. S.; SOUZA, M. M. Caracterização e avaliação das propriedades de concretos autoadensáveis com adições minerais e baixo consumo de cimento. **Holos Journal**, v. 5, p. 51–64, 2018. ISSN 1807-1600.

DUARTE, J. **O que muda com o fim das cinzas volantes**. [S.l.]: Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, 2019.

EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. Reino Unido: EFNARC, 2002. 32 p. ISBN 0-9539733-4-4.

EFNARC. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete**. Reino Unido: SCC European Project Group, 2005. 63 p. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>>.

EL DEBS, A. L. H. C.; ALMEIDA, F. . M.; BARRAGÁN, B. E.; CASAS, J. R. Variabilidade da aderência e das propriedades mecânicas do concreto auto-adensável. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 1, n. 1, p. 31–57, 2008.

ELEMAM, W. E.; ABDELRAHEEM, A. H.; MAHDY, M. G.; TAHWIA, A. M. Optimizing fresh properties and compressive strength of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 249, n. 118781, 2020. ISSN 09500618. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118781>>.

EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Atlas da Eficiência Energética do Brasil - Relatório de Indicadores**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, Governo Federal Brasileiro., 2020. 104 p.

FERRARIS, C. F. Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 5, n. 104, p. 461–478, 1999.

FERREIRA, R. M. S. **BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL: METODOLOGIA DE COMPOSIÇÃO**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Minho., 2001.

FIGUEIRAS, H. **Performance-based design of SCC to ensure durability of concrete structures**. 269 p. Tese (Doutorado) — Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Técnica de Lisboa, 2013.

FIGUEIRAS, H. I. M. **Estudo e desenvolvimento experimental de composições de betão auto-compactável**. Porto: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2006. 281 p.

FORMAGINI, S.; BARRETO, L. B. M.; SCHANOSKI, P. S.; RIVA, G. S. Concreto autoadensável: estudos de dosagem e validação de campo. In: **V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 425–434.

GHIO, V. A. **The rheology of fresh concrete and its effect on the shotcrete process**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA, 1993.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2009. 172 p.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência com aditivos minerais. **V SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO. São Paulo - Brasil, 2003.**

GONÇALVES, A.; VIEIRA, M. O betão pronto e o fim das cinzas volantes: mais um desafio para a construção. **Ordem dos Engenheiros da Região Sul**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2019.

GUETTI, P. D. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas do concreto autoadensável e do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço.** Belo Horizonte: Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 395 p. ISBN 8599956019.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; OZBAY, E. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1878 – 1887, 2010.

HACKLEY, V. A.; FERRARIS, C. F. Guide to rheological nomenclature: measurements in ceramic particle systems. **National Institute of Standards and Technology**, n. Special Publication 946, 2001.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo, Brasil: Editora Pini, 1992.

IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **2019 Global Status: Report for Buildings and Construction.** UE: United Nations Environment Programme., 2019. 41 p.

ISA, M. M.; CEA, A. A.; RENÓFIO, A. Aderência entre concreto auto-adensável de alta resistência e armadura. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 26, n. 2, p. 135–139, 2004. ISSN 1806-2563.

ISO 14040. **Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.** UE: International Organization for Standardization, 2006.

JALAL, M.; POULADKHAN, A.; HARANDI, O. F.; JAFARI, D. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 90 – 104, 2015.

JSCE, JAPANESE SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Recommendation for Construction of Self-Compacting Concrete.** Japão: JSCE Recommendations, 1998. 26 p.

KHAYAT, K. H.; SCHUTTER, G. D. **Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete.** V. 14. [S.l.]: Springer, 2014. ISBN 9783319032443.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável.** Londrina: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Londrina, 2008. 180 p. Disponível em: <<http://www.uel.br/pos/enges/dissertacoes/45.pdf>>.

KRAUS, Z. F. **Investigação de misturas de argamassas para dosagem do concreto autoadensável contendo ora fíler calcário, ora aditivo promotor de viscosidade em substituição ao fíler.** Florianópolis: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 154 p.

LIU, M. Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1245 – 1252, 2010.

LNEC 446. **Fíleres calcários para ligantes hidráulicos**. Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2005.

LNEC E 397. **Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão**. Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1993.

MATOS, P. R.; FOIATO, M.; PRUDÊNCIO, L. R. Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 282–293, 2019.

MATOS, P. R.; PRUDÊNCIO, L. R.; OLIVEIRA, A. L.; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 623–630, 2018.

MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; PRUDÊNCIO, L. R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 941–955, 2019.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcário**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Santa Catarina, Brasil, 2005.

MENDES, M.; BAUER, E.; SILVA, F. Avaliação dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia do concreto autoadensável. **Revista Matéria**, v. 22, n. 4, 2017.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 4. ed. Estados Unidos: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2014.

MORINI, A. A. **Pré-avaliação da energia incorporada e da pegada de carbono como requisitos para seleção de materiais nas fases iniciais do desenvolvimento de produto**. 189 p. Tese (Doutorado) — Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

MUSTAPHA, F. A.; SULAIMAN A. MOHAMED, R. N.; UMARA, S. A. The effect of fly ash and silica fume on self-compacting high-performance concrete. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier Ltda., v. 39, p. 965–969, 2020.

NANTHAGOPALAN, P.; SANTHANAM, M. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand. **Cement & Concrete Composites**, Elsevier Ltd, v. 33, n. 3, p. 353–358, 2011.

NAWA, T.; IZUMI, T.; EDAMATSU, Y. State of the art on materials and design of self-compacting concrete. **Concrete Engineering Series Journal - Japan**, n. 30, p. 160–190, 1998.

NBR 12653. **Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

NBR 12655. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

NBR 13956-1. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

NBR 13956-2. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2: Ensaios químicos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

NBR 13956-3. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 3: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

NBR 13956-4. Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 4: Determinação da finura por meio da peneira 45 μm . Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

NBR 15823-1. Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

NBR 15823-2. Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual — Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

NBR 15823-3. Concreto autoadensável. Parte 3: Determinação da habilidade passante — Método do anel J. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

NBR 15823-4. Concreto autoadensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante — Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

NBR 15823-5. Concreto autoadensável. Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

NBR 15823-6. Concreto autoadensável. Parte 6: Determinação da resistência à segregação — Métodos da coluna de segregação e da peneira. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

NBR 15894-1. Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

NBR 15894-2. Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2: Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

NBR 16541. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

NBR 5739. Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

NBR 7211. **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

NBR 7215. **Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

NBR 7222. **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

NBR 7681-2. **Calda de cimento para injeção. Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

NBR 8522. **Concreto — Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

NEPOMUCENO, M. C. S. **METODOLOGIA PARA A COMPOSIÇÃO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 409 p.

NP EN 1008. **Água de amassadura para betão. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão**. Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2003.

NP EN 1097-6. **Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água**. Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2016.

NP EN 12350-10. **Ensaio do betão fresco. Parte 10: Betão autocompactável. Ensaio de escoamento na caixa L**. Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2010.

NP EN 12350-11 + Errata 1. **Ensaio do betão fresco. Parte 11: Betão autocompactável. Ensaio de segregação no peneiro**. Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2012.

NP EN 12350-12. **Ensaio do betão fresco. Parte 12: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento no anel J**. Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2010.

NP EN 12350-8. **Ensaio do betão fresco. Parte 8: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento**. Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2019.

NP EN 12350-9. **Ensaio do betão fresco. Parte 9: Betão autocompactável. Ensaio de escoamento no funil V**. Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2010.

NP EN 12390-13. **Ensaio do betão endurecido; Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão**. Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2014.

NP EN 12390-2. **Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura de provetes para ensaios de resistência mecânica**. Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2019.

NP EN 12390-3. **Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2019.

NP EN 12390-6. **Ensaio do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2011.

NP EN 12620+A1. **Agregados para betão.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2010.

NP EN 13263-1 + A1. **Sílica de fumo para betão. Parte 1: Definições, requisitos e critérios de conformidade.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2009.

NP EN 13263-2 + A1. **Sílica de fumo para betão. Parte 2: Avaliação da conformidade.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2009.

NP EN 15167-1. **Escória granulada de alto-forno moída para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2008.

NP EN 15167-2. **Escória granulada de alto-forno moída para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Avaliação da conformidade.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2008.

NP EN 197-1. **Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2012.

NP EN 1992-1-1. **Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2010.

NP EN 206 + A1. **Betão. Especificação, desempenho, produção e conformidade.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2017.

NP EN 206-1. **Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2010.

NP EN 445. **Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2000.

NP EN 450-1. **Cinzas volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2012.

NP EN 450-2. **Cinzas volantes para betão. Parte 2: Avaliação da conformidade.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2006.

NP EN 933-1. **Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método da peneiração.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2014.

NP EN 934-1. **Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 1: Requisitos gerais.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2008.

NP EN 934-1:2009+A1. **Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. . Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem.** Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2012.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades.** Porto: [s.n.], 2001. 198 p.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.

PELISSER, F.; VIEIRA A. BERNARDIN, A. M. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 324 – 332, 2018.

POON, C.; LAM, I.; S.C., K.; WONG, Y.; WONG, R. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. **Cement and Concrete Research.**, Elsevier Ltd, v. 31, p. 1301–1306, 2001.

PROSKE, T.; HAINER, S.; REZVANI, M.; GRAUBNER, C. A. Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix design principles and application in practice. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 413 – 421, 2014.

REBMANN, M. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. São Carlos: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, 2011. 213 p.

REPETTE, L. W. Concretos de última geração: presente e futuro. **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ibracon, vol.2, n. No.BRPR-CT96-0366, p. 1509–1550, 2005.

REPETTE, W. L. Concreto autoadensável. **Concreto: Ciência e Tecnologia.**, v. 2, p. 1768 – 1806, 2011.

SAAK, W. A.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. R. New methodology for designing self-compacting concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 6, p. 429–439, 2001.

SAHMARAN, M.; YAMAN, I. O.; TOKYAY, M. Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 99 – 106, 2009.

SARTORTI, A. L.; SOUSA, M. C.; BARBOZA, L. S. Estudo da viabilidade econômica do concreto autoadensável com baixo consumo de cimento. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 4, p. 68–86, 2019.

SATO, V. Y. **Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias coma adição de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, 2015.

SEBAIBI, N.; BENZERZOUR, M.; SEBAIBI, Y.; ABRIAK, N. E. Composition of self compacting concrete (SCC) using the compressible packing model, the Chinese method and the European standard. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 382 – 388, 2013.

SEDRAN, T. Final Report of Task 5: Mix-design methods. **Brite EuRam Project**, vol.2, n. No.BRPR-CT96-0366, p. 81, 2000.

SEELAPUREDDY, J.; BOMMISSETTY, J.; SESHAGIRI, M. V. R. Effect of metakaolin and micro silica on strength characteristics of standard grades of self-compacting concrete. **Materials Today: Proceedings.**, Elsevier Ltd, 2020.

SIDDIQUE, R. **Waste materials and by-products in concrete**. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 413 p.

SILVA, P. M. S. R. **Materiais Constituintes do BAC**. [S.l.]: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

SILVEIRA, C. M. R. **Reologia de Betão Auto-Compactável com Agregados Finos Recicla- dos da Demolição de Estruturas de Betão**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2014.

SKARENDAHL, A.; PETERSSON, O. Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 174-SCC. **RILEM TC 174-SCC**, v. 023, p. 168, 2000.

SMARZEWSKI, P. Influence of silica fume on mechanical and fracture properties of high performance concrete. **ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity**, Elsevier Ltd, p. 5–12, 2020.

SUKUMAR, B.; NAGAMANI, K.; RAGHAVANB, R. S. Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1394 – 1401, 2008.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Porto Alegre: Dis- sertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. 149 p. ISBN 978-1-4613-5198-6.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. D. **Concreto Auto-Adensável**. 1a. ed. São Paulo, Brasil: Editora Pini Ltda., 2008. 148 p.

UYSAL, M.; M., S. Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 90 – 104, 2011.

VEJMELKOVA, E.; KEPPERT, M.; GRZESZCZYK, S.; SKALINSKI, B.; CERNY, R. Pro- perties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1325 – 1331, 2011.

VELOSA, A.; SIDDIQUE, R.; CACHIM, P.; SILVA, A. S.; CAMÕES, A.; COSTA, V. P. S.; RIBEIRO, T. J. T.; RAMIREZ, S. M.; VARELA, M. T. B.; REVILLA, C. F.; VEIGA, M. R. **Me- tacaolino em Portugal: Produção, Aplicação e Sustentabilidade**. Aveiro, Portugal: Instituto Português da Qualidade, 2013.

VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR, K. M. L. **Concreto Protendido. Fundamentos Básicos**. Brasil: Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 1998.

VIEIRA, J. P. **Interação cimento-superplastificante - Avaliação da estabilidade do compor- tamento**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Técnica de Lisboa., 2010.

WALLEVIK, J. E. Relationship between the bingham parameters and slump. **Cement Concrete Research**, v. 7, n. 36, p. 1214–1221, 2006.

WALLEVIK, O.; MUELLER, F.; HJARTARSON, B.; KUBENS, S. The green alternative of Self Compacting Concrete, ECO-SCC. **35th Conference on "Our World in Concrete and Structures"**, Singapura, 2010.

WCISLO, A.; KUNICZUK, K. Self-Compacting Concrete with low binder – the new beginning for Self-Compacting Concretes used in Poland. **7th International RILEM Conference on Self-Compacting Concret, Paris**, 2013.

WENDLING, A.; SADHASIVAM, K.; FLOYD, R. W. Creep and shrinkage of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members. **Construction and Building Materials**, n. 167, p. 205–215, 2018.

WIEDMANN, T.; MINX, J. A Definition of 'Carbon Footprint'. **C. C. Pertsova, EcologicalEconomics Research Trends: Chapter 1**, p. 1–11, 2008.

WILSON M. L. ANDA KOSMATKA, S. **Designand control of concrete mixtures**. 16. ed. Estados Unidos: Portland Cement Association, 2016. 520 p.

YAZICI, H. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 4, p. 456 – 462, 2008.

ZAMBRANA-VASQUEZ, D.; ARANDA-USÓN, A.; ZABALZA-BRIBIÁN, I.; JANEZ, A.; LLERA-SASTRESA, E.; HERNANDEZ, P.; ARRIZABALAGA, E. Environmental assessment of domestic solar hot water systems: a case study in residential and hotel buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 88, p. 29–42, 2015.

ZHAO, H.; SUN, W.; WU, X.; GAO, B. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 66 – 74, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Proporção dos materiais utilizados para a produção de pasta

Tabela 27 – Relação das massas (g) dos materiais constituintes da pasta.

Substituição parcial em 5% de sílica									
Materiais	Massas (g) em relação ao adjuvante (%)								
	0,1%	0,15%	0,20%	0,25%	0,30%	0,35%	0,40%	0,45%	0,50%
Cimento	1647,81	1645,59	1643,38	1641,17	1638,98	1636,78	1634,59	1632,41	1630,24
Sílica	86,51	86,39	86,28	86,16	86,05	85,93	85,82	85,70	85,59
Água	655,09	652,19	649,30	646,42	643,55	640,69	637,83	634,98	632,14
Adjuvante	1,65	2,47	3,29	4,10	4,92	5,73	6,54	7,35	8,15

Substituição parcial em 10% de sílica									
Materiais	Massas (g) em relação ao adjuvante (%)								
	0,1%	0,15%	0,20%	0,25%	0,30%	0,35%	0,40%	0,45%	0,50%
Cimento	1679,45	1677,15	1674,85	1672,56	1670,28	1668,00	1665,73	1663,46	1661,20
Sílica	184,74	184,49	184,23	183,98	183,73	183,48	183,23	182,98	182,73
Água	667,67	664,70	661,74	658,79	655,84	652,91	649,98	647,06	644,15
Adjuvante	1,68	2,52	3,35	4,18	5,01	5,84	6,66	7,49	8,31

Substituição parcial em 15% de sílica									
Materiais	Massas (g) em relação ao adjuvante (%)								
	0,1%	0,15%	0,20%	0,25%	0,30%	0,35%	0,40%	0,45%	0,50%
Cimento	1712,34	1709,94	1707,56	1705,18	1702,80	1700,43	1698,07	1695,72	1693,37
Sílica	295,38	294,97	294,55	294,14	293,73	293,32	292,92	292,51	292,11
Água	680,74	677,70	674,66	671,63	668,61	665,60	662,60	659,61	656,62
Adjuvante	1,71	2,56	3,42	4,26	5,11	5,95	6,79	7,63	8,47

Fonte – Autoria própria (2021).

APÊNDICE B – Resultados do ensaio do Cone de Marsh

Tabela 28 – Tempos obtidos no ensaio do cone de Marsh.

sf/c = 0,05	sp/c																	
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5									
Tempo para fluir (T)	58,5	61,2	53,0	54,8	48,1	49,0	44,8	43,0	37,7	37,4	31,9	32,5	33,4	34,1	30,8	30,8	30,0	29,8
Média de T	59,8	53,9	48,5	43,9	37,6	32,2	33,8	30,8	29,9									
Log T	1,78	1,73	1,69	1,64	1,57	1,51	1,49	1,48										
sf/c = 0,10	sp/c																	
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5									
Tempo para fluir (T)	117,0	126,0	65,0	68,0	58,0	60,0	53,6	52,2	47,9	47,5	51,2	51,1	48,2	48,1	46,9	46,8	45,3	44,9
Média de T	121,5	66,5	59,0	52,9	47,7	51,1	48,2	46,8	45,1									
Log T	2,08	1,82	1,77	1,72	1,68	1,71	1,68	1,67	1,65									
sf/c = 0,15	sp/c																	
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5									
Tempo para fluir (T)	87,8	88,0	73,9	74,0	73,1	72,2	63,1	64,1	57,9	56,4	44,5	45,8	38,8	39,0	34,9	35,1	33,2	33,1
Média de T	87,9	73,9	72,6	63,6	57,2	45,2	38,9	35,0	33,1									
Log T	1,94	1,87	1,86	1,80	1,76	1,65	1,59	1,54	1,52									

Fonte – Autoria própria (2021).

APÊNDICE C – Resultados detalhados do ensaio de resistência à compressão axial do betão aos 28 dias

Tabela 29 – Resultados do ensaio resistência à compressão axial do betão aos 28 dias

Parâmetro	Composição 1					Provetes - Composição 2				
	1P1	1P2	1P3	1P4	1P5	2P1	2P2	2P3	2P4	2P5
Provetes	1P1	1P2	1P3	1P4	1P5	2P1	2P2	2P3	2P4	2P5
Idade (dias)	28	28	28	28	28	27	27	27	27	27
Fmáx. (kN)	956,0	900,6	938,3	967,2	988,2	1031,4	944,2	1004,5	946,2	978,0
$f_{c,j}$ (MPa)	54,1	51,0	53,1	54,7	55,9	58,4	53,4	56,8	53,5	55,3
$f_{cm,j}$ (MPa)	53,76					55,51				
$\beta_{cc}(t)$	1,00					1,00				
f_{cm} (MPa)	53,76					55,71				
S_d (MPa)	1,87					2,13				
f_{ck} (MPa)	50,68					52,20				

Nota: $f_{c,j}$ refere-se a resistência a compressão na idade j; $f_{cm,j}$ a resistência a compressão média na idade j; $\beta_{cc}(t)$ ao coeficiente em função do tempo t / idade j; f_{cm} a resistência a compressão média aos 28 dias; S_d é o desvio padrão; e f_{ck} a resistência característica a compressão aos 28 dias.

Fonte – Autoria própria (2021).

Tabela 30 – Continuação da Tabela 29

Parâmetro	Composição 3				
	3P1	3P2	3P3	3P4	3P5
Provetes	3P1	3P2	3P3	3P4	3P5
Idade (dias)	26	26	26	26	26
Fmáx. (kN)	1109,4	1046,4	997,1	973,4	1076,1
$f_{c,j}$ (MPa)	62,8	59,2	56,4	55,1	60,9
$f_{cm,j}$ (MPa)	58,88				
$\beta_{cc}(t)$	0,99				
f_{cm} (MPa)	59,33				
S_d (MPa)	3,16				
f_{ck} (MPa)	54,12				

Fonte – Autoria própria (2021).

ANEXOS

ANEXO A – Recomendações do eurocódigo em relação ao betão

Tabela 31 – Classes de exposição ambiental do betão conforme o eurocódigo

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições que poderão ocorrer com o betão ou a estrutura
1 Nenhum risco de corrosão ou ataque		
X0	Para betão sem armadura ou elemento metálico em todos os ambientes, exceto se houver gelo/degelo, abrasão ou ataque químico; Para betão com armadura ou elemento metálico em ambiente muito seco	Betão no interior de edificações com umidade do ar muito baixa
2 Corrosão induzida por carbonatação		
Onde um betão com armadura ou elemento metálico é exposto ao ar e à umidade, a exposição deve ser classificada da seguinte forma:		
XC1	Seco ou permanentemente úmido	Betão no interior de edificações com umidade do ar baixa; Betão submerso permanentemente em água
XC2	Úmido / raramente seco	Superfícies de betão em contato prologado com água; Grande número de fundações
XC3	Umidade moderada	Betão no interior de edificações com umidade do ar moderada ou alta; Betão externo protegido de chuva
XC4	Alternadamente seco e úmido	Superfícies de betão em contato com água, não inclusas na classe de exposição XC2
3 Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar		
Onde um betão com armadura ou elemento metálico está em contato com água contendo cloretos, incluindo sais de degelo (não provenientes da água do mar), a exposição deve ser classificada da seguinte forma:		
XD1	Umidade moderada	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Úmido / raramente seco	Piscina; Betão exposto a água industrial contendo cloretos
XD3	Alternadamente seco e úmido	Elementos de pontes expostos a pulverizações contendo cloreto; Pavimentos, lajes de estacionamento
4 Corrosão induzida por cloretos provenientes da água do mar		
Onde um betão com armadura ou elemento metálico está em contato com água contendo cloretos provenientes da água do mar ou com uma massa de ar que carregue sais provenientes do mar, a exposição deve ser classificada da seguinte forma:		

Fonte – Adaptado da norma NP EN 206-1 (2010).

Tabela 32 – Continuação da Tabela 31

XS1	Exposto a sais transportados pelo mar, mas não em contato direto com o mar	Estruturas perto ou na costa do mar
XS2	Permanentemente submerso	Partes de estruturas marítimas
XS3	Zonas de maré, rebentação e pulverização	Partes de estruturas marítimas
5 Congelamento / Descongelamento com ou sem agentes de degelo		
Onde o betão é exposto a significativos processos cíclicos de gelo / degelo enquanto molhado, a exposição deve ser classificada da seguinte forma:		
XF1	Moderada saturação de água, sem agentes de degelo	Superfícies verticais de betão expostas a chuva e gelo
XF2	Moderada saturação de água, com agentes de degelo	Superfícies verticais de betão de estradas expostas ao gelo e agentes de degelo transportados pelo ar
XF3	Alta saturação de água, sem agentes de degelo	Superfícies horizontais de betão expostas a chuva e gelo
XF4	Alta saturação de água, com agentes de degelo ou água do mar	Estradas e tabuleiros de pontes expostas a agentes de degelo; Superfícies de betão expostas a efeitos de pulverização de agentes de gelo e degelo; Estruturas expostas ao gelo em zonas de rebentação
6 Ataques químicos		
Onde o betão é exposto a ataques químicos de terrenos naturais e águas subterrâneas, a exposição deve ser classificada da seguinte forma:		
XA1	Ambiente químico ligeiramente agressivo	Betão exposto a terrenos naturais e águas subterrâneas
XA2	Ambiente químico moderadamente agressivo	Betão exposto a terrenos naturais e águas subterrâneas
XA3	Ambiente químico altamente agressivo	Betão exposto a terrenos naturais e águas subterrâneas

Fonte – Adaptado da norma NP EN 206-1 (2010).

Tabela 33 – Limitações ao betão impostas pelo eurocódigo

Parâmetros	Classe de exposição ambiental			
	XC1	XC2	XC3	XC4
Máximo a/c	0,65	0,60	0,55	0,50
Mínima classe de resistência	C25/25	C25/30	C30/37	C30/37
Mínimo consumo de cimento (kg/m ³)	260	280	280	300

Fonte – Adaptado da norma NP EN 206-1 (2010).

ANEXO B – Recomendações da norma brasileira em relação ao betão

Tabela 34 – Classes de exposição ambiental do betão conforme a norma brasileira

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana (a)(b)	Pequeno
III	Forte	Marinha (a)	Grande
		Industrial (a)(b)	
IV	Muito Forte	Industrial (a)(c)	Elevado
		Respingos de maré	

(a) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas, áreas de serviço ou ambientes com betão revestido com argamassa e pintura).

(b) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em regiões de clima seco com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, em partes da estrutura protegidas de chuva de ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

(c) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte – Adaptado da norma NBR 6118 (2014).

Tabela 35 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do betão

Parâmetros	Tipo (a) (b)	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto			
		I	II	III	IV
Relação a/c	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe do betão	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento (kg/m^3)	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA - Componentes e elementos estruturais de betão armado.

CP - Componentes e elementos estruturais de betão pré-esforçado.

Fonte – Adaptado da norma NBR 12655 (2014).