

Formulação e análise de desempenho de UHPC reforçado com fibras não metálicas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Construção Urbana

Autor

André Filipe Duarte Almeida

Orientador

Pro. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não estaria completa sem o agradecimento a todos os que a tornaram possível, direta ou indiretamente.

Ao Professor Hugo Costa, que desde início deste trabalho, e apesar das numerosas solicitações e responsabilidade a que está habitualmente sujeito, sempre demonstrou total disponibilidade e interesse pelo trabalho a desenvolver. Pela sua mestria, forma incomparável de transmitir e partilhar conhecimento técnico, entrega e valores humanos, um muito obrigado torna-se de facto redutor para poder retribuir tudo o que me permitiu atingir. A minha gratidão total pelo apoio e disponibilidade.

Ao Sr. António Amaral, Eliana Soldado e Cátia Lourenço, pela boa disposição e ajuda indispensável na realização deste trabalho. Ao Prof. Carlos Lemos pelo *input* positivo, no decorrer dos trabalhos laboratoriais.

Ao restante corpo docente do ciclo de estudos de mestrado, pela sua contribuição indispensável na minha formação académica, no decorrer deste ciclo de estudos.

A todos os meus colegas de curso pelo apoio no decorrer desta maratona. A todos vós, um brinde de muito sucesso.

A toda a equipa do Grupo AMOP, nomeadamente ao Eng.º Marco Saraiva, Sr. Fernando Marques e Sr. Lúcio Martins, pelo apoio e cedência dos materiais utilizados na realização deste trabalho.

Aos meus amigos que, mesmo que por vezes confundam betão com “o cimento”, sempre souberam dar o reforço necessário para ultrapassar esta meta.

Ao meu irmão pelo apoio e fundamentalmente aos meus pais, pelo apoio, incentivo incondicional, compreensão e transmissão de valores. A vós, minha profunda gratidão por me acompanharem ao longo da vida.

E por fim á minha mulher, Andreia, pelo apoio incondicional, paciência nos dias maus, pelo amor e inspiração. Sem ti era muito mais difícil.

A todos vós, um muito obrigado. Este trabalho é vosso.

RESUMO

A evolução dos betões, na procura de estruturas com um maior tempo de vida útil, melhor desempenho ou menores custos de manutenção, tem sido alvo de pesquisa por investigadores de todo o mundo.

Neste sentido, o desenvolvimento dos betões de ultra-elevado desempenho (UHPC – Ultra High Performance Concrete), permitiu, desde o seu desenvolvimento inicial, uma multiplicidade de aplicações quer a nível estrutural ou arquitetónico, aportando a estes elementos, vantagens características deste material de construção.

No entanto, e particularizando um dos seus constituintes, a aplicação tradicional de fibras metálicas na composição de UHPC, poderá originar alguns fenómenos indesejados de perda de durabilidade, nomeadamente por corrosão destas.

Por consequência, julga-se pertinente encontrar alternativas a este componente, de forma a que se obtenha um nível de desempenho semelhante, diminuindo o risco de ocorrência dos fenómenos anteriormente referidos.

Neste sentido, o estudo que aqui se apresenta, visa efetuar uma breve abordagem à aplicação de fibras em materiais alternativos tais como fibra de vidro ou fibra de polipropileno. Serão analisadas algumas propriedades em estado fresco e endurecido de várias misturas de betão, com diferentes aplicações de fibras, quer em tipo, quer em dosagem.

PALAVRAS CHAVE

- Betão de ultra-elevado desempenho;
- Resistência mecânica;
- Durabilidade;
- Fibras poliméricas.

ABSTRACT

The evolution of concrete, focused on structures with longer life, better performance or lower maintenance costs have been the target of several research groups around the world.

With this purpose, the development of UHPC – Ultra High Performance Concrete allowed, since his first days, multiple structural and architectural solutions, giving to these elements, all the characteristics that are common to this construction material.

However, if the attention is focused on one specific constituent of UHPC, the applications of metallic fibers can improve the possibility of undesired phenomenon of durability loss, such has corrosion of this component.

Consequently, it is important to find alternative materials that can substitute this component, with a similar performance level, lowering the appearance risk of the phenomenons mentioned on the last paragraphs.

On this matter, the presented study has on his purpose a brief approach on the application of alternative material fibers such as glass or polypropylene fibers.

Fresh and hardened concrete properties, from different types of concrete, with different ratios and types of fibers are analyzed.

KEYWORDS

- Ultra high performance concrete (UHPC);
- Strength;
- Durability;
- Polymeric Fibers.

ÍNDICE

| | |
|-----------------------------|-----|
| AGRADECIMENTOS | iii |
|-----------------------------|-----|

| | |
|---------------------|---|
| RESUMO | v |
|---------------------|---|

| | |
|-----------------------|-----|
| ABSTRACT | vii |
|-----------------------|-----|

| | |
|-------------------------|----|
| SIMBOLOGIA | xv |
|-------------------------|----|

| | |
|---------------------------|-----|
| ABREVIATURAS | xvi |
|---------------------------|-----|

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

| | |
|-------------------------------------|---|
| 1.1. Enquadramento do tema | 1 |
| 1.2. Objectivos e Metodologia | 1 |
| 1.3. Organização do trabalho | 2 |

CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE

| | |
|---|----|
| 2.1. Introdução | 3 |
| 2.2. Aplicações | 3 |
| 2.3. Propriedades Físicas e Mecânicas | 7 |
| 2.4.1. Resistencia á compressão | 7 |
| 2.4.2. Resistecia á flexão | 8 |
| 2.4.4. Ataque Quimico | 10 |
| 2.4.5. Retração e Fluencia | 11 |

CAPÍTULO 3 - PROCEDIMENTO LABORATORIAL

| | |
|---------------------------------|----|
| 3.1. Introdução | 14 |
| 3.2. Seleção de Materiais | 14 |
| 3.2.1. Cimento | 14 |
| 3.2.2. Agregados | 15 |
| 3.2.3. Adjuvantes | 17 |

| | |
|--|----|
| 3.2.4. Água de amassadura | 18 |
| 3.2.5. Adições | 19 |
| 3.2.5.1. Filler Cálcareo | 19 |
| 3.2.5.2. Silica de Fumo | 19 |
| 3.2.5.3. Fibras | 20 |
| 3.3. Formulação | 21 |
| 3.3.1. Análise e seleção de misturas | 21 |
| 3.3.2. Folha de Calculo | 24 |
| 3.4. Caracterização Prévia | 25 |
| 3.4.1. Procedimento | 25 |
| 3.4.2. Correção de misturas | 26 |
| 3.5. Amassaduras | 27 |
| 3.5.1. Procedimento | 27 |
| 3.5.2. Moldagem | 28 |
| 3.6. Ensaios | 28 |
| 3.6.1. Ensaios no estado fresco | 28 |
| 3.6.1.1. Medição de espalhamento em cone de argamassas | 28 |
| 3.6.1.2. Massa Volúmica Aparente | 29 |
| 3.6.1.3. Teor de ar | 30 |
| 3.6.2. Ensaios no estado endurecido | 30 |
| 3.6.2.1. Resistência mecânica á flexão | 31 |
| 3.6.2.2. Resistência mecânica á compressão | 33 |
| 3.6.2.3. Resistência á tração por compressão diametral | 34 |
| 3.6.2.4. Retração Total | 35 |
| 3.6.2.5. Módulo de Elasticidade | 36 |
| 3.6.2.6. Determinação do coeficiente de fluência | 38 |

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

| | |
|--|----|
| 4.1. Introdução | 41 |
| 4.2. Resultados em estado fresco | 42 |
| 4.3. Resultados em estado endurecido | 43 |
| 4.3.1. Resistência mecânica á flexão | 44 |
| 4.3.1.1. Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras | 44 |
| 4.3.1.2. Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras | 47 |
| 4.3.2. Resistência mecânica á compressão | 50 |
| 4.3.2.1. Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras | 50 |
| 4.3.2.2. Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras | 57 |
| 4.3.3. Resistência mecânica á tração por compressão diametral | 59 |
| 4.3.3.1. Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras | 60 |
| 4.3.3.2. Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras | 61 |
| 4.3.4. Módulo de Elasticidade | 63 |
| 4.3.4.1. Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras | 62 |
| 4.3.4.2. Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras | 63 |
| 4.3.5. Retração Total | 63 |
| 4.3.5.1. Resultados em provetes 40x40x160 - Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras | 64 |

| | |
|--|----|
| 4.3.5.2. Resultados em provetes 40x40x160 - Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras..... | 67 |
| 4.3.5.3. Resultados em provetes 100x100x500 fibras | 69 |
| 4.3.6. Coeficiente de Fluência | 70 |

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

| | |
|--|----|
| 5.1. Conclusões | 73 |
| 5.2. Contribuições do desenvolvimento efetuado | 75 |
| 5.3. Trabalhos futuros | 76 |

| | |
|---|-----------|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 77 |
|---|-----------|

ANEXOS

1. Folha de cálculo – Mistura M1
2. Folha de cálculo – Mistura M2
3. Folha de cálculo – Mistura M3
4. Folha de cálculo – Mistura M4
5. Folha de cálculo – Mistura M5
6. Folha de cálculo – Mistura M6
7. Folha de cálculo – Mistura M8
8. Folha de cálculo – Mistura M9
9. Folha de cálculo – Mistura M10
10. Folha de cálculo – Mistura M11
11. Folha de cálculo – Mistura M12

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. Secções de UHPC (i), aço (ii) e betões correntes (iii e iv) com igual capacidade resistente | 4 |
| Figura 2.2. Construção do Tabuleiro da ponte Sakata Miari no Japão | 4 |
| Figura 2.3. Construção da ponte Washington, Estados Unidos | 5 |
| Figura 2.4. Estrutura pré-fabricada da torre de refrigeração da estação elétrica de Cattenom, Lorraine, França | 5 |
| Figura 2.5. Reforço estrutural com UHPC da torre marítima de Cabon, França | 6 |
| Figura 2.6. Desmoldagem de elemento das palas da estação de Shawnessy, Canadá | 6 |
| Figura 2.7. Palas da estação de Shawnessy, Canadá em fase de construção..... | 7 |
| Figura 2.8. Relação Tensão-Abertura de fendas para UHPC..... | 9 |
| Figura 2.9. Comportamento em flexão do UHPC..... | 10 |
| Figura 2.10. Auto-reparação de microfissura no grão de clinker em espécimen de UHPC..... | 11 |
| Figura 2.11. Fenómeno de Fluência do UHPC segundo Graybeal B. e Davis M. | 12 |

CAPÍTULO 3

| | |
|---|----|
| Figura 3.1. Fluxograma de trabalhos | 14 |
| Figura 3.2. Curva granulométrica da areia..... | 16 |
| Figura 3.3. Areia selecionada | 17 |
| Figura 3.4. Realização de Ensaio Granulométrico..... | 17 |
| Figura 3.5. Campo de ação de diferentes bases químicas de adjuvantes | 18 |
| Figura 3.6. Fibras de PP e PE – F2 | 21 |
| Figura 3.7. Fibras de vidro – F3..... | 21 |
| Figura 3.8. Folha de cálculo utilizada na formulação das argamassas..... | 24 |
| Figura 3.9. Misturadora, cronómetro e espátula | 25 |
| Figura 3.10. Adição de água | 25 |
| Figura 3.11. Esquema da amassadura | 26 |
| Figura 3.12. Constituintes pesados e preparados | 27 |
| Figura 3.13. Execução de amassadura na misturadora de 20l..... | 27 |
| Figura 3.14. Moldes para execução de provetes para ensaios em estado endurecido | 28 |
| Figura 3.15. Preparação de ensaio | 29 |
| Figura 3.16. Medição do espalhamento | 29 |
| Figura 3.17. Determinação da massa volúmica aparente..... | 29 |
| Figura 3.18. Aerómetro em ensaio de medição de teor de ar..... | 30 |
| Figura 3.19. Esquema de ensaio de resistência á flexão | 32 |
| Figura 3.20. Ensaio de resistência á flexão | 32 |
| Figura 3.21. Esquema de ensaio de compressão | 33 |
| Figura 3.22. Ensaio de compressão | 33 |
| Figura 3.23. Procedimento de ensaio de compressão diametral, com d sendo o diâmetro do provete, b e h a secção das tiras de chapa ou material duro compreendido entre 15 ± 1 mm e $3,5\pm 0,5$ mm respetivamente | 34 |
| Figura 3.24. Ensaio de compressão diametral..... | 34 |
| Figura 3.25. Ensaio de compressão diametral (detalhe); | 34 |
| Figura 3.26. Leitura de retração total em provete livre..... | 35 |
| Figura 3.27. Linha de eixo de leitura | 36 |
| Figura 3.28. Aplicação dos apoios com bitola | 36 |
| Figura 3.29. Provede instrumentado | 36 |
| Figura 3.30. Ciclos de carga para determinação de módulo de elasticidade..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.31. Provetes em prensa de carga..... | 38 |
| Figura 3.32. Medição com extensômetro | 38 |
| Figura 3.33. Provetes instrumentado e preparado para aplicação de carga no pórtico de ensaio de fluência | 39 |
| Figura 3.34. Medição da extensão com aplicação de carga..... | 39 |

CAPÍTULO 4

| | |
|---|----|
| Figura 4.1. Análise de dosagem de superplastificante, teor de ar e espalhamento | 43 |
| Figura 4.2. Resistência á flexão M1-M2-M3..... | 45 |
| Figura 4.3. Resistência á flexão M1-M4-M5..... | 45 |
| Figura 4.4. Resistência á flexão M1-M6 | 45 |
| Figura 4.5. Resistência á flexão M1-M8-M11..... | 45 |
| Figura 4.6. Resistência á flexão M1-M9-M12..... | 46 |
| Figura 4.7. Resistência á flexão M1-M10 | 46 |
| Figura 4.8. Resistência á flexão - M1 e misturas com dosagem de 1% de fibras | 48 |
| Figura 4.9. Resistência á flexão - M1 e misturas com dosagem de 2% de fibras | 49 |
| Figura 4.10. Resistência á compressão M1-M2-M3..... | 51 |
| Figura 4.11. Resistência á compressão M1-M4-M5..... | 51 |
| Figura 4.12. Resistência á compressão M1-M6..... | 51 |
| Figura 4.13. Resistência á compressão M1-M8-M11 | 51 |
| Figura 4.14. Resistência á compressão M1-M9-M12..... | 52 |
| Figura 4.15. Resistência á compressão M1-M10..... | 52 |
| Figura 4.16. Resistência á compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M2-M3 | 54 |
| Figura 4.17. Resistência á compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M4-M5 | 54 |
| Figura 4.18. Resistência á compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M6..... | 55 |
| Figura 4.19. Resistência á compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M8-M11 | 55 |
| Figura 4.20. Resistência á compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M9-M12 | 56 |
| Figura 4.21. Resistência á compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M10..... | 56 |
| Figura 4.22. Resistência á compressão - M1 e misturas com dosagem de 1% de fibras | 57 |
| Figura 4.23. Resistência á compressão - M1 e misturas com dosagem de 2% de fibras | 58 |
| Figura 4.24. Resultados de resistência á tração por compressão diametral | 60 |
| Figura 4.25. Resultados de Modulo de Elasticidade aos 28 dias..... | 62 |
| Figura 4.26. Retração total para M1-M2-M3 em provetes 40x40x160 mm;..... | 64 |
| Figura 4.27. Retração total para M1-M4-M5 em provetes 40x40x160 mm;..... | 64 |
| Figura 4.28. Retração total para M1-M6 em provetes 40x40x160 mm..... | 65 |
| Figura 4.29. Retração total para M1-M8-M11 em provetes 40x40x160 mm..... | 65 |
| Figura 4.30. Retração total para M1-M9-M12 em provetes 40x40x160 mm..... | 66 |
| Figura 4.31. Retração total para M1-M10 em provetes 40x40x160 mm..... | 66 |
| Figura 4.32. Retração total para M1 e misturas com dosagem de 1% de fibras em provetes 40x40x160 mm | 68 |
| Figura 4.33. Retração total para M1 e misturas com dosagem de 2% de fibras em provetes 40x40x160 mm | 68 |
| Figura 4.34. Retração total para misturas M1-M3-M5-M12 e valor previsto pelo EC2 para a mistura de M1 (mistura EC2_M1) em provetes 100x100x500 mm | 69 |
| Figura 4.35. Coeficiente de fluência para misturas M1-M3-M5-M12 e valor previsto pelo EC2 para a mistura de M1 (mistura EC2_M1) em provetes 100x100x500 mm..... | 71 |

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 3

| | |
|---|----|
| Quadro 3.1. Principais grupos de tipos de cimento e respetiva percentagem de clínquer | 15 |
| Quadro 3.2. Análise granulométrica da Areia (% Passados) | 16 |
| Quadro 3.3. Misturas consideradas..... | 22 |
| Quadro 3.4. Composições finais das amassaduras | 27 |
| Quadro 3.5. Tabela de ensaios realizados..... | 31 |

CAPÍTULO 4

| | |
|--|----|
| Quadro 4.1. Misturas consideradas e alvo de ensaios de caracterização | 41 |
| Quadro 4.2. Resultados de ensaio de teor de ar e massa volúmica aparente | 42 |
| Quadro 4.3. Resultados de resistência á flexão | 44 |
| Quadro 4.4. Resultados de resistência á compressão..... | 50 |
| Quadro 4.5. Resultados de resistência á tração por compressão diametral..... | 59 |
| Quadro 4.6. Resultados de Modulo de Elasticidade aos 28 dias | 62 |

SIMBOLOGIA

$f_{\text{cube},200}$ – Resistência á compressão em cubos de 200 mm de aresta

$f_{\text{cyl } \emptyset 150 \times 300}$ – Resistência á compressão em cilindros de diâmetro 150 mm e 300 mm de altura

$f_{\text{cube},100}$ – Resistência á compressão em cubos de 100 mm de aresta e

$f_{\text{cyl } \emptyset 100 \times 200}$ – Resistência á compressão em cilindros de diâmetro 100 mm e 200 mm de altura

$\varepsilon_{cc}(t)$ – Extensão total de fluência

$\varepsilon_c(t)$ – Extensão total de fluência a uma determinada idade

$\varepsilon_{cs}(t)$ – Extensão de fluência a uma determinada idade

$\varepsilon_{ci}(t_0)$ – Extensão de fluência instantânea quando carregado

$\varepsilon_{cT}(t)$ – Extensão resultante do processo de cura se aplicável

W/C – Relação Água/Cimento

σ – Tensão de carga aplicada

E_i – Módulo de elasticidade

φ_{fl} – Coeficiente de fluência

$f_{(t-t_0)}$ – Coeficiente dependente das condições de cura térmica.

(d/D) – Dimensão menor/Dimensão maior do agregado

$V_{\text{betão}}$ – Volume de betão

$V_{\text{agregados}}$ – Volume de agregados

V_{ligante} – Volume, igual ao volume do cimento, ocupado pelo ligante

$V_{\text{água}}$ – Volume de água da argamassa

$V_{\text{adjuvante}}$ – Volume ocupado pelo adjuvante na argamassa

$V_{\text{adições}}$ – Volume de adições

V_v – Volume de vazios

μ – Massa volúmica real

M – Massa do constituinte

μ_a – Massa volúmica real da areia

μ_c – Massa volúmica real do cimento

μ_{adj} – Massa volúmica real do adjuvante

μ_{adi} – Massa volúmica real das adições

A – Massa da areia

C – Massa do cimento

Ag – Água de amassadura

Adj – Massa do adjuvante

Adj – Massa das adições

A/L – Relação Água Ligante

f_t – Tensão de rotura à tração por flexão

M_{max} – Momento máximo

W_f – Módulo de flexão

F_t – Força necessária à rotura do provete por tração por flexão

l – vão entre os eixos de apoio

f_c – Tensão de rotura à compressão.

F_c – Força necessária à rotura do provete por compressão.

$f_{c,j}$ – Resistência de rotura à compressão aos j dias.

$f_{ct,sp}$ – Resistência á tração por compressão diametral

F_c – Valor da força de rotura por compressão diametral

d – Diâmetro da secção

l – Comprimento do provete

f_{ct} – Resistência à tração por definição do EC2

$E_{c,j}$ – Modulo de elasticidade do betão aos j dias de idade

σ_a^m – tensão superior aplicada no ensaio de determinação de modulo de elasticidade

σ_p^m – Tensão de pré-carga aplicada no ensaio de determinação de modulo de elasticidade

$\varepsilon_{a,3}$ – Extensão verificada e correspondente á tensão superior aplicada no ensaio de determinação de modulo de elasticidade

$\varepsilon_{p,2}$ – Extensão verificada e correspondente á tensão de pré-carga aplicada no ensaio de determinação de modulo de elasticidade

$\varepsilon_t(t)$ – Extensão total do provete sob tensão num dado tempo t , contada a partir da primeira leitura feita no tempo $t = 0$;

$\varepsilon_s(t)$ – Extensão média na mesma idade dos provetes não carregados e conservados (provetes para medição de retração);

ε_i – Extensão instantânea medida logo apos a aplicação da carga máxima no ensaio de fluência;

$\Phi_{(t)}$ – Coeficiente de fluência aos t dias de idade;

ABREVIATURAS

UHPC – Ultra High Performance Concrete e

NP – Norma Portuguesa.

EN – European Norm.

CEN – Comité Européen de Normalisation

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

EC2 – EN 1992-1-1. (2010). Eurocódigo 2 : Projeto de estruturas de betão

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

A grande evolução dos betões nas últimas décadas, levou ao desenvolvimento dos betões de elevado desempenho e ultraelevado desempenho, comumente designados como, HPC-High Performance Concrete e UHPC-Ultra High Performance Concrete.

A utilização deste tipo de betões veio aportar às estruturas e elementos de construção, diversas vantagens não só intrínsecas e características deste material de construção, tais como elevadas resistências e grande durabilidade, mas também resultantes da sua utilização, tais como possibilidade de execução de estruturas mais esbeltas com evidente menor peso próprio estrutural, possibilitando desta forma obter estruturas e elementos arquitetonicamente mais apelativos.

O UHPC teve por isso, uma utilização crescente, tanto utilizado numa vertente de utilização *in-situ* mas também, e principalmente, em pré-fabricação, aleando ao maior controlo de execução e qualidade, uma maior rentabilização de recursos necessários à execução, instalação e utilização deste material.

Neste sentido, acrescenta-se ainda que, pese embora o custo direto de execução deste material seja muito mais elevado do que os betões correntemente utilizados, como por exemplo os betões auto compactáveis, em grande parte devido à quantidade de cimento utilizada, os custos indiretos são óbvia e manifestamente menores.

No entanto, e ainda que seja apenas analisada a durabilidade sob o ponto de vista estético, a utilização de fibras metálicas na composição do UHPC pode constituir um elemento dissuasor no emprego deste material, fruto da possibilidade de ocorrência de fenómenos de oxidação das fibras metálicas, nomeada e principalmente em elementos ou estruturas expostas aos agentes agressores característicos do meio ambiente onde sejam executadas ou aplicadas.

Assim sendo, o presente estudo procura, numa perspetiva individualizada e reduzida, caracterizar a utilização e emprego de outros tipos de fibras que não metálicas, na formulação de UHPC, eliminando a ocorrência dos efeitos mencionados no paragrafo anterior.

Deverá também ser tido em conta que, o presente estudo, é também elaborado no âmbito do desenvolvimento profissional do aluno, sendo que, foi considerada e admitida a inclusão de materiais cedidos pela entidade empregadora do mesmo, numa tentativa de posterior aproveitamento do desenvolvimento para produção industrial.

1.2. Objetivos e metodologia

O presente trabalho tem como principais objetivos a comparação do desempenho de várias formulações de UHPC, objetivando sempre uma manutenção das características deste em estado fresco, nomeadamente teor em ar, trabalhabilidade e consistência.

Para tal, foi definida uma matriz de ligante fixando-se a relação A/L, para o emprego de 3 tipos de fibras – metálicas para comparação base de desempenho, fibra de vidro e fibra de polipropileno - fazendo apenas variar a quantidade de agregado, água e adjuvante, numa tentativa de manter em resultado alvo, as características em estado fresco mencionadas anteriormente.

Na definição das formulações, foi planeado variar, em rácios volumétricos de 1% e 2% a quantidade fibra por formulação, bem como a execução de 3 misturas híbridas entre as fibras de polipropileno e a fibra de vidro, tendo-se neste último caso, feito variar a quantidade da mistura híbrida em proporções de 1/3 - 2/3 e 1/2 - 1/2, também em dosagens volumétricas de 1% e 2% na mistura.

A nível de análise de propriedades em estado fresco, objetivou-se controlar o teor em ar, a massa volúmica aparente e o espalhamento de cada mistura.

A fim de garantir uma boa análise de desempenho em estado endurecido, objetivou-se a caracterização das resistências à compressão e flexão aos 1, 7, 28 e 56 dias, do módulo de elasticidade e da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Foi também verificada a retração das misturas, bem como determinado o coeficiente de fluência das misturas com 2% de fibras.

1.3. Organização do trabalho

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos e anexos.

O primeiro capítulo engloba o enquadramento do tema, os objetivos delineados e a metodologia a seguir e a organização do trabalho.

O segundo capítulo reflete o estado da arte, sendo um capítulo onde se abordam todos os aspetos científicos e tecnológicos do tema, bem como a caracterização da evolução atual do UHPC.

No terceiro capítulo caracteriza-se o procedimento e trabalho laboratorial, sendo descritos e definidos os materiais usados, parâmetros, características a analisar e os ensaios laboratoriais.

A análise e o tratamento dos resultados, integram o quarto capítulo e, por fim, no quinto capítulo, apresenta-se uma conclusão geral da dissertação e possíveis desenvolvimentos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Introdução

A história tem demonstrado ao longo dos anos que existe uma relação paralela entre os novos materiais que se desenvolvem e as formas estruturais que se utilizam.

Da mesma forma, hoje em dia, os novos conceitos estruturais e arquitetônicos levantam questões de durabilidade e sustentabilidade, que tornam necessária a incorporação de novos materiais, com ultra elevadas resistência e durabilidade.

O UHPC – Ultra High Performance Concrete, é um betão de características especiais, com uma matriz ultra compacta, e com propriedades físicas e mecânicas de desempenho elevado, tais como: resistência à compressão na ordem (ou maior) que 150 MPa, resistência à flexão na ordem dos 20 MPa, baixa permeabilidade a água e gases, e por consequência da adição de fibras, ductilidade melhorada [1]. Os limites de resistência destes betões, dependem essencialmente da composição da matriz, condições de cura e quantidade, tipo e dispersão das fibras.

A nível de desenvolvimento e de estudos internacionais mais relevantes, salientam-se alguns *milestones* como os relatórios acerca do estado de arte do UHPC a nível global, publicado em 2004 na Alemanha e em 2004 [2] nos Estados Unidos em 2006 [3], este último já com enfoque na performance do material. Salientam-se também as recomendações da JSCE sobre as condições de mistura e transporte do UHPC [4], e as recomendações e princípios fundamentais expostos por Redaelli [5] para a otimização de composições de UHPC, tais como a eliminação de agregados de média/elevada dimensão, uso de frações finas reativas tais como farinhas de sílica ou de quartzo, reduções das relações água cimento, uso de superplastificantes, curvas granulométricas otimizadas, condições de cura térmica e adição de fibras metálicas.

2.2. Aplicações

As referidas propriedades mecânicas e físicas do UHPC têm um impacto direto nas aplicações deste material. Isto porque, devido ao seu desempenho e características, é possível, por exemplo, não só reduzir secções, diminuindo o consumo de materiais quer direta quer indiretamente, mas também, o peso próprio de estruturas, entre outros [6]. Tal, tem permitido a sua utilização em elementos arquitetónicos como painéis de fachada, ou em elementos estruturais como tabuleiros de pontes e em edifícios.

Na Figura 2.1 é possível verificar a diferença de consumo de materiais quando comparamos secções com igual capacidade resistente executadas em diferentes materiais.

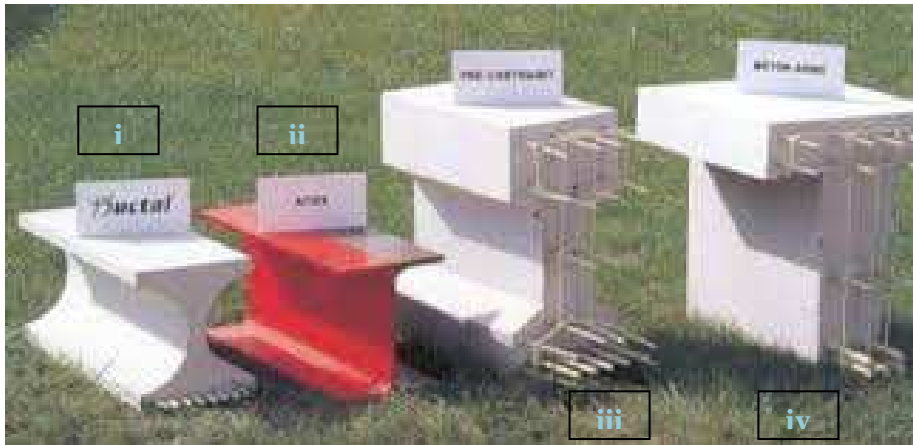


Figura 2.1 – Secções de UHPC (i), aço (ii) e betões correntes (iii e iv) com igual capacidade resistente [6];

Pese o seu custo direto inicial e a especificidade de aplicação serem ainda considerados fatores dissuasores para o seu emprego, as mais-valias atrás evidenciadas, bem como os baixos custos indiretos decorrentes da sua utilização/aplicação, poderão também aportar à aplicação, um cunho de sustentabilidade económica, quando comparando com betões correntes. A aplicação de UHPC em estruturas de pontes e viadutos é onde se tem verificado algum desenvolvimento de projetos onde este material assume o papel principal. As pontes pedestres Sakata Miari no Japão apresentado na Figura 2.2, com o seu arco, ou a ponte Washington nos Estados Unidos com as suas vigas π (Figura 2.3), são exemplos dessas aplicações em UHPC.



Figura 2.2 – Construção do Tabuleiro da ponte Sakata Miari no Japão [7];



Figura 2.3 – Construção da ponte Washington, Estados Unidos [6];

Outra das aplicações de UHPC é onde existem ambientes com elevada agressividade, onde a performance de durabilidade do material é um requisito imperativo. Podemos ter como exemplos a estrutura de uma torre de refrigeração (Figura 2.4) exposta a ataque químico, executada em UHPC, ou para reforço de estruturas marítimas (Figura 2.5) expostas a ataques de cloretos [6].

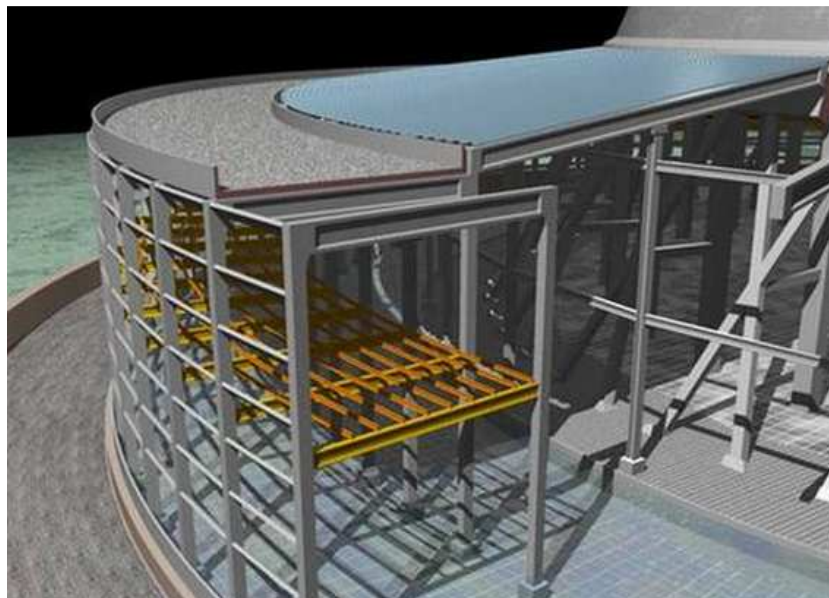


Figura 2.4 – Estrutura pré-fabricada da torre de refrigeração da estação elétrica de Cattenom, Lorraine, França [6];



Figura 2.5 – Reforço estrutural com UHPC da torre marítima de Cabon, França [8];

Conforme já referido, a utilização de UHPC em elementos arquitetónicos ganha uma maior expressão pois a trabalhabilidade e a resistência do material permitem obter formas e elementos com elevada atratividade, fazendo com que se privilegie este material quando se pretende executar obras com distinção arquitetónica. São exemplo disto, as palas da estação de Shawnessy, [9], no Canadá, apresentadas nas Figuras 2.6 e 2.7.



Figura 2.6 – Desmoldagem de elemento das palas da estação de Shawnessy, Canadá [9];



Figura 2.7 – Palas da estação de Shawnessy, Canadá, em fase de construção [9];

2.3. Propriedade Físicas e Mecânicas

As propriedades mecânicas e físicas do UHPC são melhoradas através do emprego de fibras metálicas na sua composição. Uma proporção de cerca de 2% de fibras, é comumente aceita como sendo a relação ideal para obtenção do melhor desempenho [10] de determinada composição.

A resistência última à flexão é, em betões correntes, normalmente o dobro da tensão no momento de ocorrência da primeira fissura. No caso de UHPC, esta relação pode ir até 10 vezes, o que permite eliminar parcialmente tanto a armadura longitudinal como a transversal [11].

2.4.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão do UHPC é o principal critério de avaliação e definição do desempenho do betão. Um betão corrente pode resistir até 60% do seu valor característico sem fendilhar. A partir deste nível, podem verificar-se micro fissuras em áreas isoladas, e aparecem normalmente na interface da matriz ligante e dos agregados [9].

A resistência à compressão do UHPC é fortemente influenciada pela caracterização da sua matriz de ligante e agregados, sofrendo no entanto pouca influência pela adição contínua de

fibras. Estudos realizados concluem mesmo que para a resistência à compressão, não sofre influência, para adição de fibras superiores a 2% [12].

O formato do provete de ensaio pode também influenciar a resistência à compressão. Neste sentido podem ser estabelecidas as seguintes relações [13, 14]:

$$f_{cube,200} = 1.10 f_{cyl \varnothing 150 \times 300} \quad (2.1)$$

$$f_{cube,100} = 1.15 f_{cyl \varnothing 100 \times 200} \quad (2.2)$$

Onde $f_{cube,200}$ é a resistência à compressão em cubos de 200 mm de aresta, $f_{cyl \varnothing 150 \times 300}$ é a resistência à compressão em cilindros de diâmetro 150 mm e 300 mm de altura, $f_{cube,100}$ é a resistência à compressão em cubos de 100 mm de aresta e $f_{cyl \varnothing 100 \times 200}$ é a resistência à compressão em cilindros de diâmetro 100 mm e 200 mm de altura.

A utilização de métodos de termo-cura do UHPC beneficiam o desenvolvimento de elevadas resistências, baixa retração e alta durabilidade.

2.4.2. Resistência à flexão

O comportamento do UHPC reforçado com fibras metálicas na resistência à flexão, pode ser analisado, com base na curva de tensão-extensão típica do material. Contrariamente ao UHPC sem adição de fibras, a fase pós-elástica é mais prolongada, o que comprova o aumento de ductilidade. Esta curva pode ser caracterizada por 3 zonas de comportamento: elástico, de consolidação e de deformação plástica, conforme verificado na Figura 2.8 [15]. Todo o processo é baseado na ligação entre a fibra metálica e a matriz ligante. Quando a ligação é perdida sem que ocorra deslizamento da fibra, então a rotura é frágil [16]. A quantidade adequada de fibras é extremamente importante de forma a que exista um deslizamento das fibra, gerando um comportamento dúctil na rotura.

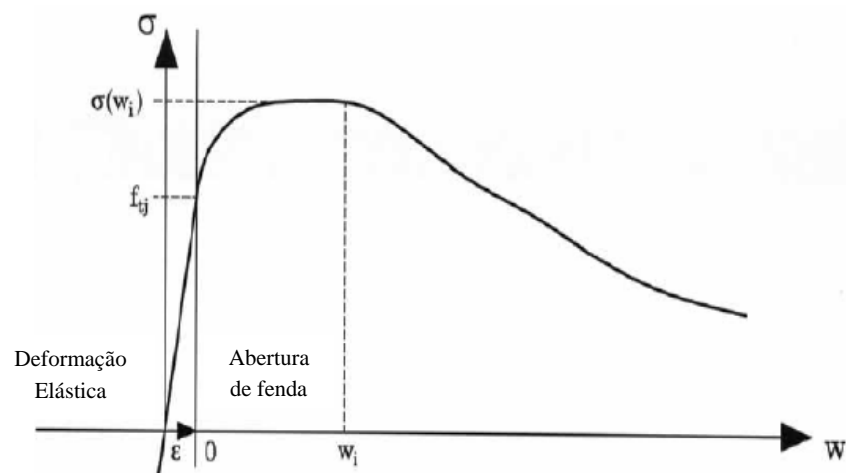


Figura 2.8 – Relação tensão-abertura de fendas para UHPC [10];

O comportamento pós-elástico deve ser tido em conta para as características de ductilidade dos elementos, sendo que o mesmo é influenciado pela orientação das fibras [15]

É sabido que aparecem microfissuras após ser atingida a resistência à flexão do betão. Com base neste facto, foi desenvolvido um modelo tendo em consideração o comportamento do UHPC [17], sob esforço direto de flexão, definido por 4 estados (Figura 2.9). O primeiro estado é caracterizado pelo aparecimento de microfissuras na matriz ligante, sendo que no segundo estado ocorre o desenvolvimento destas. Num terceiro e quarto estados, estas microfissuras tornam-se com maior dimensão e o esforço é suportado essencialmente pelas fibras.

A aderência entre as fibras e a matriz asseguram uma rotura dúctil do elemento, o que significa, por consequente, que as extensões aumentam sob carga constante.

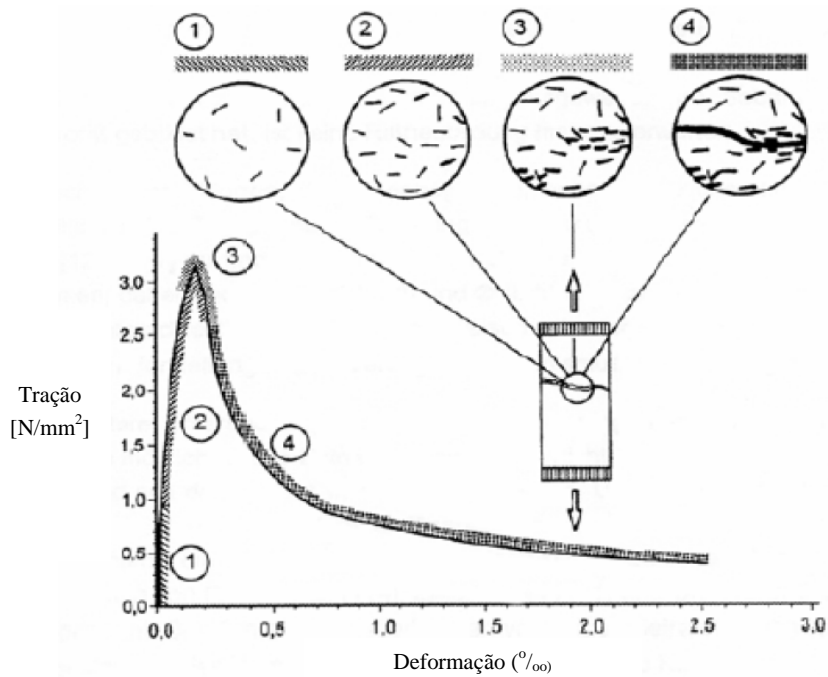


Figura 2.9 – Comportamento em flexão do UHPC [17];

2.4.3. Ataque químico

O UHPC reforçado com fibras metálicas, tem uma maior resistência aos ataques ácidos, quando comparado com o betão corrente ou mesmo betões de elevada resistência.

Foram executados testes, em Espanha, onde se sujeitaram vários provetes ao ataque de sulfato de cálcio, sulfato de amónia, ácido acético, nitrato e água do mar [18]. Os resultados foram muito satisfatórios, sem perda de peso ou resistência dos elementos. Foram também levados a cabo alguns testes em provetes sob ataque de gás, nomeadamente CO_2 , CH_4 e S_2H a 120°C , sob uma pressão de 7 MPa. Foi detetado durante estes ensaios um novo fenómeno, denominado autorreparação (*self-healing*) do betão. Verificou-se que varias microfissuras se fecharam devido à hidratação das partículas de cimento que permaneceram não hidratadas no processo de endurecimento, Figura 2.10 [18].

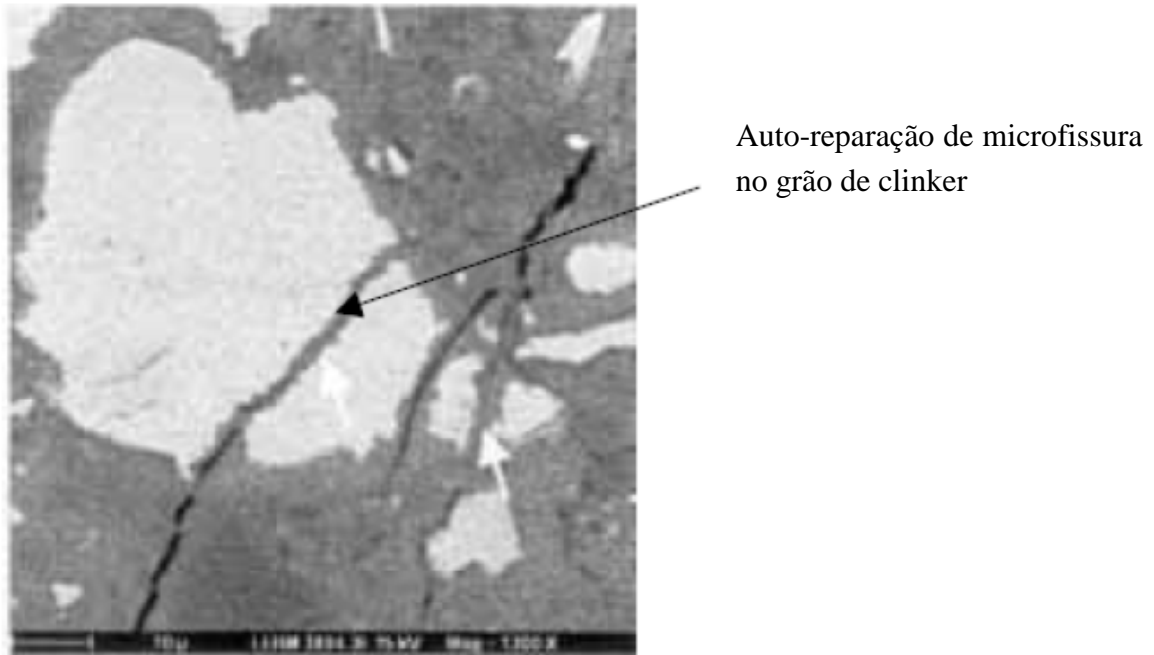


Figura 2.10 – Auto-reparação de microfissura no grão de clinker em provete de UHPC [18];

2.4.3. Retração e Fluência

A fluência define-se como uma deformação, ocorrida num determinado espaço de tempo sob ação de uma carga constante. Esta propriedade tem duas componentes: a fluência base e a fluência de secagem. A fluência base é a fluência caracterizada em elementos selados, ao passo que a fluência de secagem ocorre em elementos expostos [19].

Graybeal e Davis [20] propuseram um diagrama que define o fenómeno de fluência do UHPC (Figura 2.11). O diagrama foi obtido através de provetes cilíndricos ($\phi 150 \times 300$ mm) sujeitos a compressão e provetes prismáticos ($60 \times 30 \times 300$ mm) sujeitos à flexão. Os resultados demonstraram que a fluência obtida por compressão é igual à fluência obtida por flexão.

$$\varepsilon_l(t_0) = \frac{\sigma}{E_i} [1 + \varphi_{fl} f_{(t-t_0)}] \quad (2.4)$$

Onde σ é a tensão aplicada, E_i é o módulo de elasticidade, φ_{fl} é o coeficiente de fluência e $f_{(t-t_0)}$ é um coeficiente dependente das condições de cura térmica.

A retração é definida como sendo a diminuição do volume de betão ao longo do tempo. De acordo com François T. [22] esta diminuição é devida à variação do volume de água no elemento de betão e também a modificações físicas e químicas que ocorrem sem influência de cargas externas. As componentes de retração mais relevantes são a retração de secagem e a retração autógena, e ainda a retração de carbonatação. A relação que permite estimar a retração no UHPC é:

$$(\varepsilon_{sh})_t = \frac{t^a}{f+t^a} (\varepsilon_{sh})_u \quad (5)$$

Onde f é a idade do betão em dias, $(\varepsilon_{sh})_u$ é a deformação de retração, t é o tempo de tratamento térmico e a é um coeficiente de forma do provete.

De acordo com os estudos existentes, pode ser dito que, de uma forma geral, quando comparado com betões correntes, o UHPC não possui praticamente retração ou fluência [23, 24].

3. PROCEDIMENTO LABORATORIAL

3.1. Introdução

O presente capítulo engloba toda a experiência realizada no laboratório no âmbito do trabalho: a caracterização dos constituintes, a formulação, caracterização inicial e execução das amassaduras e, por fim, os ensaios realizados nos estados fresco e endurecido, conforme indicado na Figura 3.1. Deverá ser tido em conta que, os constituintes empregues neste estudo, foram considerados mediante disponibilidade, uma vez que foram gentilmente cedidos por terceiros. Abaixo apresenta-se fluxograma com o procedimento adotado para o estudo.

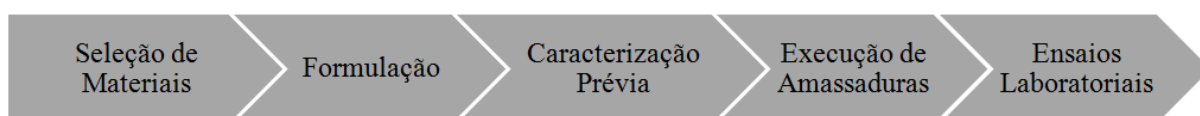


Figura 3.1 – Fluxograma de trabalhos;

3.2. Seleção de Materiais

3.2.1. Cimento

O cimento é um ligante hidráulico, ou seja, um material inorgânico obtido do clínquer e finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido a um conjunto de reações de hidratação. Depois do endurecimento completo, conserva a resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água [25].

Todos os cimentos provêm do clínquer, responsável pela função ligante, graças ao qual pastas, argamassas e betões passarão de um estado inicial fluido e moldável a um estado final sólido e mecanicamente resistente. O clínquer é constituído por silicatos e aluminatos de cálcio, sendo os primeiros responsáveis pelo desenvolvimento das capacidades resistentes [26].

A norma europeia NP EN 197-1 [27] prevê 27 tipos de cimento diferentes divididos em 5 grupos indicados no Quadro 1.

| | Tipo de cimento | % de clínquer |
|---------|---------------------------|----------------------|
| CEM I | Cimento Portland | 95-100 |
| CEM II | Cimento Portland composto | 65-94 |
| CEM III | Cimento de alto-forno | 5-64 |
| CEM IV | Cimento pozolânico | 45-89 |
| CEM V | Cimento composto | 20-64 |

Quadro 3.1 - Principais tipos de cimento e respetivo intervalo em percentagem de clínquer (adaptado de [27]);

Os vários tipos de cimento podem conter, para além do clínquer, outros constituintes. As escórias granuladas de alto-forno, sílicas de fumo, pozolanas naturais, cinzas volantes, xistos calcinados e calcários são os principais [28].

Relativamente à resistência, os cimentos podem ser classificados, com valores mínimos de rotura à compressão em argamassa normalizada, aos 28 dias 32,5, 42,5 ou 52,5 N/mm². Para cada uma destas classes, ainda se consideram duas subclasses, no que respeita ao endurecimento inicial: *N* se o endurecimento é normal, *R* se há resistências iniciais elevadas.

Utilizou-se, nos ensaios laboratoriais, o cimento branco Portland de calcário CEM I 52,5 N, da marca Secil, com uma massa volúmica real de 3,02 kg/dm³, confirmada em ensaio laboratorial. Este cimento tem, na sua composição, no mínimo, 95% de clínquer, até 5% de calcário e uma reduzida percentagem de sulfato de cálcio regulador de presa. Em termos de limites de tensões de rotura, tem como valor de resistência mínima, de referência á compressão, aos 28 dias de 52,5MPa. Além disso, deverá ter, pelo menos, 20 MPa de resistência à compressão, aos 2 dias.

3.2.2. Agregados

A resistência do agregado no betão é um fator importante para elevar a resistência mecânica. Por este motivo uma escolha inadequada poderá diminuir a capacidade resistente do betão quando sujeito a carregamentos elevados, podendo tornar-se no ponto frágil de desencadeamento da rutura.

Para o estudo em questão, apesar de se ponderarem diversos agregados em fase preliminar, foi apenas considerada a utilização de uma areia quartzosa de extração em pedra e dimensão de agregado (d/D) de 0/2, da marca Sorgila (Figura 3.3).

Para efeitos de caracterização e confirmação de valores declarados pelo fabricante, foi efetuada uma análise granulométrica, bem como a análise da sua massa volúmica.

A análise granulométrica foi obtida por peneiração, fazendo o agregado atravessar peneiros com malhas quadradas de diferentes aberturas (Figura 3.4), pesando o material retido em cada um dos peneiros. O resultado foi expresso em curva granulométrica, traduzindo a percentagem de passados em função da dimensão dos peneiros.

As principais características dos agregados em análise estão expressas no Quadro 3.2 e a respetiva análise granulométrica infra (Figura 3.2), executada segundo a NP EN 933-1 [29].

| | | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|
| Peneiro (mm) | 4,000 | 2,000 | 1,000 | 0,500 | 0,250 | 0,125 | 0,063 |
| Passados (%) | 100 | 100 | 98,72 | 62,37 | 9,44 | 0,97 | 0,30 |
| Módulo de Finura - 2,29 | | | | Massa Volúmica - 2,62 Mg/m ³ | | | |

Quadro 3.2 – Análise granulométrica da areia (% Passados);

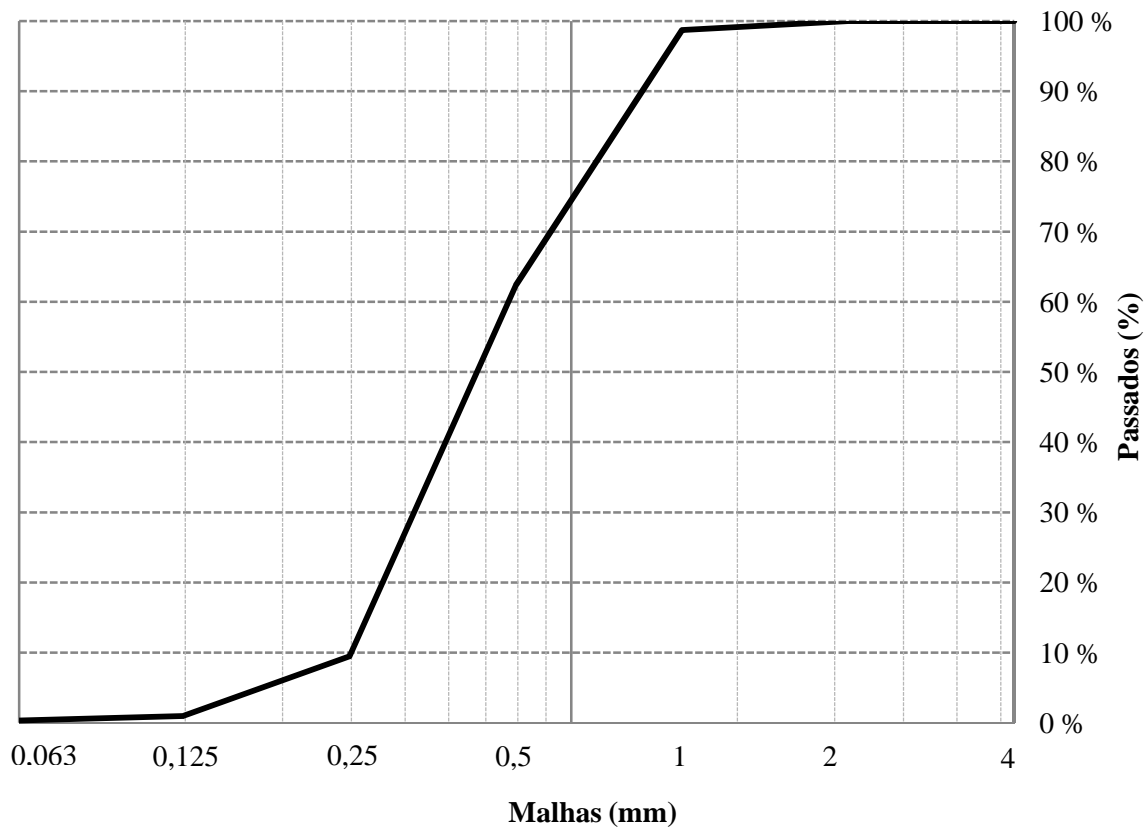


Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia selecionada;



Figura 3.3 – Areia selecionada;



Figura 3.4 – Realização de ensaio granulométrico;

3.2.3. Adjuvantes

Os adjuvantes são normalmente materiais adicionados à composição do betão, durante o processo de mistura, em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, de forma a modificar as propriedades do betão fresco e/ou endurecido. Estes, e especificamente os plastificantes e superplastificantes (Figura 3.5), ao permitirem a diminuição da dosagem de água, têm como efeito fundamental direto o aumento da trabalhabilidade e da compacidade, resultando no aumento da tensão de rotura [30,31].

Para o estudo em causa foi selecionado um superplastificante, forte redutor de água, à base de polímeros de éter-policarboxílico, da marca BASF, referencia Glenium SKY 526, uma vez que este tipo de base química, permite obter consistência e resistências iniciais elevadas.

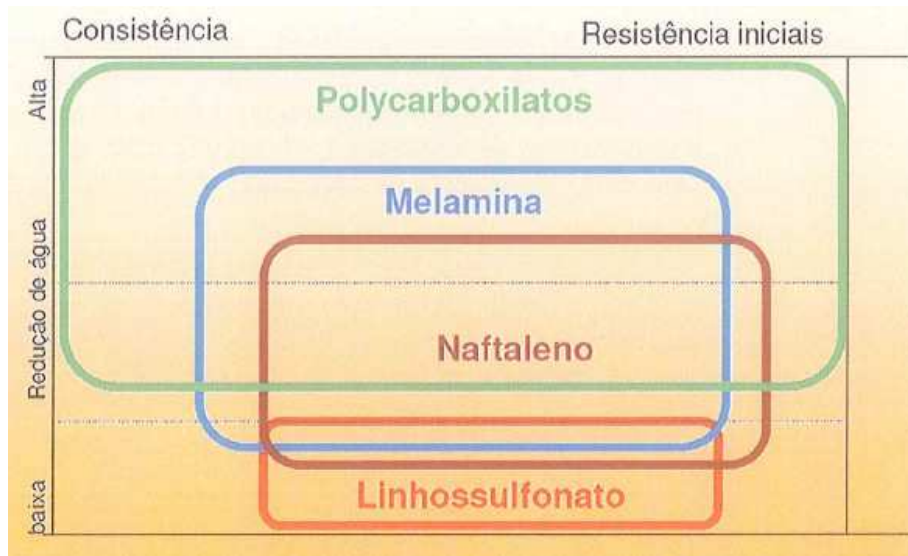


Figura 3.5 – Campo de ação de diferentes bases químicas de adjuvantes plastificantes [28];

Tal adjuvante foi selecionado com base em desempenhos de utilizações anteriores, sendo o mesmo de aspeto líquido turvo acastanhado, de densidade relativa de aproximadamente 1,04 kg/dm³. Disponibiliza-se no Anexo IV a ficha técnica do adjuvante.

O adjuvante foi adicionado às misturas numa base inicial de 1% a 2% em relação à massa do cimento, sendo corrigido em fase de caracterização das misturas de modo a enquadrar o espalhamento em cone de argamassa e teor de ar aos valores alvo pretendidos.

3.2.4. Água de amassadura

A água de amassadura desempenha dois papéis fundamentais no estado fresco e na fase de endurecimento do betão. No betão fresco, a água confere juntamente com o adjuvante a trabalhabilidade adequada para permitir correta colocação e eventual compactação. Na fase de endurecimento, a água participa nas reações de hidratação do cimento que permitem desenvolver a resistência mecânica do betão. Em parceria com a utilização de adjuvantes, é possível diminuir a quantidade de água a utilizar sem prejudicar a trabalhabilidade do betão. Não deve ainda conter impurezas prejudiciais às propriedades das misturas, tais como matérias orgânicas, alcalis e sulfatos [26] ou qualquer outro poluente.

Segundo a norma NP EN 1008 [32], devem ser distinguidos diferentes tipos de água de acordo com a sua proveniência: potável, recuperada nos processos da indústria de betão, subterrânea, superficial natural/residual industrial, do mar/salobra e proveniente de esgotos domésticos. No caso de não ser possível utilizar a água potável, os restantes tipos de água devem ser sujeitos a análises.

A água proveniente de esgotos domésticos não é adequada na constituição de argamassas e betões. Nos ensaios laboratoriais e realização de amassaduras, utilizou-se a água potável da rede de abastecimento.

3.2.5. Adições

As adições são normalmente materiais utilizados no fabrico do betão, com a finalidade de melhoria de certas propriedades, quer seja em estado fresco, quer em endurecido. Para além disto, o seu uso é hoje em dia muito suportado por razões ambientais, para além das económicas, uma vez que a sua utilização, não só constitui um reaproveitamento de resíduos de outras indústrias, como permite a utilização em substituição parcial de cimento, permitindo uma certa redução de emissões de CO₂. Apesar da habitual adição de farinhas de sílica e de quartzo, neste estudo optou-se por considerar apenas adição de sílica de fumo e de fíler calcário que, juntamente com o cimento, constituem a totalidade do pó na pasta ligante [33].

3.5.1.1. Fíler Calcário

O fíler calcário é constituído por partículas (carbonato de cálcio) finamente moídas, com dimensões semelhantes ao cimento. Este, sendo uma adição quase inerte, confere à mistura de betão uma maior coesão e trabalhabilidade, diminuindo a percentagem de vazios sem aumento da dosagem de cimento, conferindo por consequência uma maior compacidade da mistura, bem como maiores impermeabilidade e densidade no estado endurecido [34].

Para o presente estudo foi utilizado um fíler calcário com partículas de dimensão inferior a 63µm, e massa volúmica de 2,70 kg/dm³, da marca Omya Comital.

3.5.1.2. Sílica de Fumo

A sílica de fumo é um subproduto da preparação do silício ou de ligas de silício, especialmente ferro-silício, em fornos elétricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão a altas temperaturas. A sílica de fumo é constituída fundamentalmente por dióxido de silício, cuja percentagem é superior a 90% no caso da produção do silício, e por pequenas percentagens de óxidos de alumínio, cálcio e magnésio, entre outros. O diâmetro das partículas ultra-finas varia entre 0,01 e 0,5 µm, com um valor medio, próximo de 0,1 µm. [35]

A introdução da sílica de fumo na mistura permite reduzir a ocorrência de efeitos de exsudação, para além de funcionar como um adição pozolânica e ainda com efeito de fíler, beneficiando das características inerentes à utilização deste material [36].

Para o presente estudo foi utilizada sílica de fumo com partículas de dimensão média inferior a $0,1\mu\text{m}$, e massa volúmica de $2,20\text{ kg/dm}^3$, da marca MAPEI, referência Mapeplast SF. A ficha técnica deste constituinte pode ser consultada no Anexo VI.

3.5.1.3. Fibras

A utilização de fibras vem-se tornando uma opção comum nos betões de elevado desempenho, permitindo a dispensa parcial ou mesmo total das armaduras passivas e incrementando resistência à tração do betão.

Correntemente, são maioritariamente utilizadas no fabrico de UHPC, fibras metálicas, com dimensões na ordem de 4-16 mm de comprimento e 0,15-0,50 mm de diâmetro [37].

A utilização das fibras permite que, ao ocorrer fissuração, se efetue a transferência da tensão existente na matriz de betão na zona da fenda. Caso as fibras consigam suportar a carga adicional proveniente da fissuração existente, previnem a fendilhação gerada, caso contrário a rotura dar-se-á de forma dúctil.

A introdução de fibras no betão aumenta a necessidade de água, evitando-se esse acréscimo pela compensação com a utilização ou aumento do superplastificante [30, 38]. Não obstante, as fibras estarem com maior proteção devido à menor porosidade dos UHPC quando comparadas com as armaduras passivas, estas podem sofrer degradação, caso ocorram fissurações que possam expor as fibras ao meio ambiente, especialmente ao oxigénio e aos raios ultravioleta, no caso das fibras à base de polímeros.

Tendo em conta o âmbito deste estudo foram selecionadas 3 tipos de fibras, de diferente constituição e dimensão, de forma a poder abranger um leque de resultados não só interrelacionais mas também de desempenho individualizado. Dessa forma foram utilizadas as seguintes fibras:

- Fibras metálicas de 0,20 mm de diâmetro e 13 mm de comprimento, com massa volúmica de $7,85\text{ kg/dm}^3$ – referenciada como F1;
- Fibras de mistura de polipropileno e polietileno de 0,50 mm de diâmetro e 25 mm de comprimento, com massa volúmica de $0,92\text{ kg/dm}^3$ – referenciada como F2, em Figura 3.6;
- Fibras de vidro alcali-resistente de $0,14\mu\text{m}$ de diâmetro e 12 mm de comprimento, com massa volúmica de $2,68\text{ kg/dm}^3$ – referenciada como F3, em Figura 3.7;



Figura 3.6 – Fibras de PP e PE – F2;



Figura 3.7 - Fibras de vidro – F3;

3.3. Formulação

3.3.1. Análise e seleção de misturas

Com base nos materiais disponíveis, foi determinada a execução de uma mistura de referência, sem fibras, seis misturas com os três tipos de fibra disponíveis, com variação entre 1% e 2 % em volume na mistura, e seis misturas de fibras não metálicas de composição híbrida à proporção de 1/3-2/3, 1/2-1/2 e 2/3-1/3, também com variação em volume de 1% e 2%. As referidas composições estão refletidas no Quadro 3.3.

Relativamente à matriz cimentícia, foi considerado como base de estudo, uma mistura com dosagem de ligante de 1100 kg/m^3 , uma relação A/C de 0,30 e uma relação A/L de 0,22, uma vez que se consideraram adições. Foi considerada a utilização de sílica de fumo e filler calcário à razão de 6,5% e 20% respetivamente. Embora a relação habitual de A/C nos UHPC varie entre 0,2 a 0,3, no limite inferior são necessárias elevadas dosagens de superplastificante; tendo em conta que as fibras de vidro prejudicam fortemente a trabalhabilidade, obrigando ao aumento significativo do superplastificante; conjugando esses dois factores optou-se pela relação A/C referida, deixando margem para gerir o aumento da dosagem nas misturas com fibras de vidro. Conforme mencionado anteriormente foi considerada a utilização apenas de uma areia siliciosa de dimensão d/D de 0/2 mm.

Todas as misturas do trabalho laboratorial foram, como se poderá verificar detalhadamente no parágrafo seguinte, ajustadas a um espalhamento de 350 ± 20 mm, realizado com cone de argamassas [39], e um teor de ar de aproximadamente 1,5%. Estes parâmetros alvo são atingidos através da variação da dosagem de superplastificante, e respetivo acerto da composição a nível dos agregados, garantindo trabalhabilidade, compacidade e coesão das misturas, de forma a obtermos semelhante desempenho físico em estado fresco.

| Mistura | Tipo de Fibra | Proporção | Volume |
|---------|---------------------|-----------|--------|
| M1 | N/A | N/A | N/A |
| M2 | Aço – F1 | 1 | 1 % |
| M3 | Aço – F1 | 1 | 2 % |
| M4 | Polipropileno – F2 | 1 | 1 % |
| M5 | Polipropileno – F2 | 1 | 2 % |
| M6 | Fibra de Vidro – F3 | 1 | 1 % |
| M7 | Fibra de Vidro – F3 | 1 | 2 % |
| M8 | Polipropileno – F2 | 2/3 | 1 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 1/3 | |
| M9 | Polipropileno – F2 | 1/2 | 1 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 1/2 | |
| M10 | Polipropileno – F2 | 1/3 | 1 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 2/3 | |
| M11 | Polipropileno – F2 | 2/3 | 2 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 1/3 | |
| M12 | Polipropileno – F2 | 1/2 | 2 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 1/2 | |
| M13 | Polipropileno – F2 | 1/3 | 2 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 2/3 | |

Quadro 3.3 – Misturas consideradas;

A composição do betão, em volumes, segue a seguinte expressão dos volumes absolutos [26]:

$$V_{\text{betão}} = V_{\text{agregados}} + V_{\text{cimento}} + V_{\text{água}} + V_{\text{adjuvante}} + V_{\text{adições}} + V_{\text{ar}} \quad (3.6)$$

A massa volúmica real de um constituinte, traduzida pela expressão (3.7), relaciona a sua massa com o volume que ocupa na mistura:

$$\mu = \frac{M}{V} \quad (3.7)$$

sendo μ a massa volúmica real do constituinte, M a massa do mesmo, e V o correspondente volume que ocupa na argamassa.

Assim, conhecendo as relações mencionadas anteriormente e a massa volúmica real de cada constituinte, os seus volumes são conhecidos:

$$V_{\text{betão}} = \frac{A}{\mu_a} + \frac{C}{\mu_c} + \frac{Ag}{1,00} + \frac{Adj}{\mu_{adj}} + \frac{Adi}{\mu_{adi}} + \frac{V_v}{100} \times V_{\text{betão}} \quad (3.8)$$

Desenvolvendo a expressão anterior:

$$V_{\text{betão}} = \frac{A/\mu_a + C/\mu_c + Ag/1,00 + Adj/\mu_{adj} + Adi/\mu_{adi}}{1 - V_v/100} \quad (3.9)$$

em que A é a massa da areia, C a massa do cimento, Ag a massa de água, Adj a massa do adjuvante, Adi a massa das adições, V_v a percentagem de vazios em relação ao volume de betão, μ_a a massa volúmica real da areia, μ_c a massa volúmica real do cimento, μ_{adj} a massa volúmica do adjuvante e μ_{adi} a massa volúmica das adições. Recorde-se que a massa de água foi considerada anteriormente sob determinação direta da relação A/L. Deste modo, basta ajustar cada mistura pela percentagem de adjuvante adicionado. [38]

3.3.2. Folha de Calculo

A formulação das argamassas foi realizada e ajustada com o auxílio de uma folha de cálculo, como mostra a Figura 3.8.

A folha está estruturada em 2 secções principais, sendo as mesmas referentes a Pasta Ligante e Agregados, sendo a primeira dividida em 10 subsecções – cimento, adições (sílica de fumo e filler calcário), água, superplastificante, ar e fibras (fibra metálica, fibra polipropileno e fibra de vidro), tal como indicado na Figura 3.8.

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) | AMASSADURA M2 | | | | |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|-------------------------|--|--|--|--|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 1,18 | 1 % FIBRA METALICA (F1) | | | | |

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m ³) | Peso kg/m ³ | |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|------------------------|--------|
| Pasta | Cimento | CEM | CEM II A/L 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| | Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| | Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| | Superplastif. | SP | Glenium Sky 548 | 1,04 | - | - | 9,17 | 9,54 |
| | Ar | Ar | | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| | | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 1,0 | - | 10,00 | 78,50 |
| | | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 | |
| | Agregados | Agregado 1 | AG1 | Areia Fina 0/2 | 2,62 | | 0,82 | 342,18 |
| | | | | | | 1000,0 | 2326,5 | |

Figura 3.8 - Folha de cálculo utilizada na formulação das argamassas;

Seguem-se identificação e esclarecimentos relativos a cada um dos campos da folha de cálculo:

- i) Dosagem de ligante – conforme definido em 3.3.1;
- ii) Relação A/C – conforme definido em 3.3.1;
- iii) Relação A/L – conforme definido em 3.3.1;
- iv) Dosagem de superplastificante em função da dosagem de cimento – conforme definido em 3.3.1;
- v) Constituintes/Denominação/Tipo – divisão de constituintes em pasta ligante e agregados, conforme definido em 3.2;
- vi) Massa volúmica em kg/dm³ – Conforme definido em 3.2;
- vii) Proporção volumétrica de constituintes – nomeadamente para consideração de ar e fibras, conforme definido em 3.3;
- viii) Constituição do ligante – para consideração de cimento e adições, conforme definido em 3.3;
- ix) Volume de constituinte por m³ de amassadura;
- x) Peso de constituinte por m³ de amassadura;

3.4. Caracterização Prévia

3.4.1. Procedimento

Conforme mencionado anteriormente, e de forma a obtermos semelhante desempenho a nível de trabalhabilidade e teor de ar nas misturas definidas, todas são caracterizadas previamente.

O procedimento de caracterização prévia compreende a execução de 1,5 litros de amassadura em misturadora de argamassas com 3 velocidade (Figura 3.9) e posterior confirmação de massa volúmica, verificação do teor de ar e espalhamento em cone de argamassas.

Todas as misturas do trabalho laboratorial foram ajustadas a um espalhamento de 350 ± 20 mm e um teor de ar de aproximadamente 1,5%, definido em formulação, repetindo-se o processo por tentativas, para cada mistura, até se obter valores próximos aos estabelecidos.

Após pesagem dos vários constituintes, os mesmos são colocados na misturadora de acordo com o procedimento seguinte: (i) primeiramente são colocados na misturadora o cimento, filler e sílica de fumo e areia, iniciando imediatamente uma mistura de 30 segundos em fase seca; (ii) posteriormente são colocados o adjuvante e a água (Figura 3.10), permanecendo o aparelho, ligado; (iii) após este passo, a mistura desenvolve-se durante aproximadamente 60 segundos na velocidade mais baixa; (iv) as fibras são colocadas no final desta fase, lentamente em pequenas porções, misturando as mesmas por cerca de 30 segundos.



Figura 3.9 - Misturadora, cronómetro e espátula;



Figura 3.10 – Adição de água;

Posteriormente, após limpeza das paredes da cuba e haste de mistura, com o auxílio de uma espátula, a misturadora mantém-se durante aproximadamente 30 segundos na primeira velocidade.

O procedimento descrito anteriormente está esquematizado na Figura 3.11.

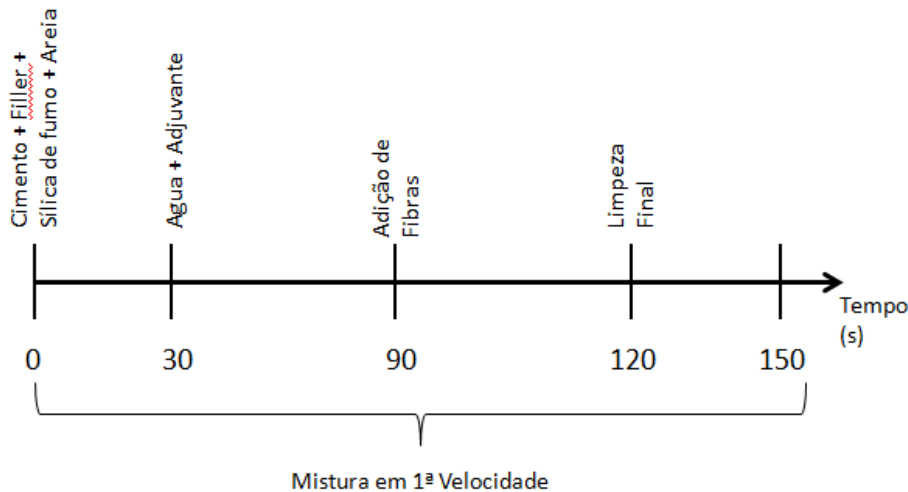


Figura 3.11 - Esquema da amassadura;

Após execução da mistura são, conforme indicado, realizados ensaios de espalhamento com cone de argamassas, verificação do teor de ar e verificação da massa volúmica.

Estes ensaios de caracterização, sendo repetidos em fase de execução das amassaduras finais, encontram-se descritos no parágrafo 3.6.1.

3.4.2. Correção de misturas

Em fase de caracterização das misturas realizaram-se vários ajustes na sua composição, nomeadamente na quantidade de superplastificante e agregados (por consequente), tendo em conta os princípios atrás mencionados.

Detetou-se nesta fase que a Mistura M7 e a Mistura M13 requeriam elevada dosagem de superplastificante para se manterem trabalháveis. Este facto levou à anulação da execução exaustiva destas duas misturas, mantendo as restantes. A causa desta baixa trabalhabilidade está relacionada com a dosagem de fibra F3, que devido à sua morfologia, requer elevadas dosagens de superplastificante para obtenção de mistura com trabalhabilidade adequada, apresentando mesmo assim falta de homogeneidade pela saturação de superplastificante.

Da caracterização prévia resultaram as seguintes composições para realização das amassaduras finais apresentadas no Quadro 4.

| lt/m ³ | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M8 | M9 | M10 | M11 | M12 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CEM | | | | | | 267,7 | | | | | |
| SF | | | | | | 32,5 | | | | | |
| FC | | | | | | 81,5 | | | | | |
| A | | | | | | 242,0 | | | | | |
| Ar | | | | | | 15,0 | | | | | |
| SP | 8,77 | 9,00 | 9,15 | 8,77 | 9,92 | 17,54 | 16,78 | 17,54 | 18,31 | 22,90 | 24,40 |
| F1 | - | 10,00 | 20,00 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| F2 | - | - | - | 10,00 | 20,00 | - | 6,67 | 5,00 | 3,33 | 13,33 | 10,00 |
| F3 | - | - | - | - | - | 10,00 | 3,33 | 5,00 | 6,67 | 6,67 | 10,00 |
| AG | 352,6 | 342,3 | 332,2 | 342,5 | 331,4 | 333,8 | 334,5 | 333,8 | 333,0 | 318,5 | 316,9 |

Quadro 3.4 – Composições finais das amassaduras;

3.5. Amassaduras

3.5.1. Procedimento

Para execução das amassaduras foi utilizada a uma misturadora de velocidade constante, com capacidade de cerca de 20 lt. Todos os constituintes foram devidamente pesados e preparados, e posteriormente colocados na misturadora, respeitando ordem e proporcionalidade dos tempos definidos na em fase de caracterização da mistura.



Figura 3.12 – Constituintes pesados e preparados;



Figura 3.13 – Execução de amassadura na misturadora de 20 lt.;

3.5.2. Moldagem

Posteriormente à execução da amassadura e respetivos ensaios em estado fresco (a ver em 3.6.1, seguidamente) foram betonados vários provetes, devidamente limpos e preparados, para execução posterior de ensaios em estado endurecido (ver em 3.6.2).



Figura 3.14 – Moldes para execução de provetes para ensaios em estado endurecido;

3.6. Ensaaios

3.6.1. Ensaaios no estado fresco

Conforme mencionado anteriormente, para caracterização das amassaduras, foram realizados ensaios em estado fresco, nomeadamente medição de espalhamento em cone de argamassas, medição de massa volúmica aparente e determinação do teor de ar.

3.6.1.1. Medição de espalhamento em cone de argamassas

Este ensaio realiza-se com o recurso a uma superfície lisa e de atrito reduzido (no caso em questão foi utilizado um vidro quadrado), um alvo de medição com graduação circular, fita métrica e molde troncocónico (molde/cone utilizado no *slump flow test* das argamassas fluidas). [39]

O molde troncocónico é limpo e humedecido. Posteriormente enche-se o mesmo até a rasar a superfície. Concluindo o enchimento, retira-se o molde e, sem qualquer auxílio, deixa-se que a amassadura flua na superfície lisa (Figura 3.15)

O diâmetro de espalhamento, que é uma medida da consistência, mede-se em duas direções perpendiculares e determina-se a média desses valores, em mm (Figura 3.16).



Figura 3.15 – Preparação de ensaio;

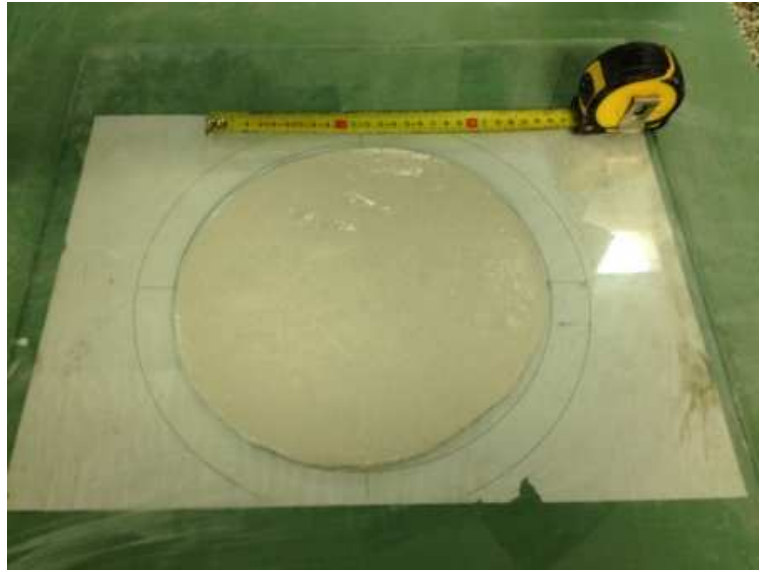


Figura 3.16 – Medição do espalhamento;

3.6.1.2. Massa volúmica aparente

A massa volúmica da argamassa determinou-se recorrendo ao recipiente inferior do aerómetro, utilizado no ensaio do teor de ar, uma vez que o mesmo tem a capacidade de um litro. Foi também utilizada uma balança decimal, adequada para o efeito. O procedimento segue o seguinte método. Depois de se tarar o recipiente, enche-se o mesmo sem necessidade de qualquer meio de compactação. Por fim, rasa-se a superfície e pesa-se (Figura 3.17).

Neste caso, o resultado da pesagem indica a massa volúmica aparente da argamassa no estado fresco, em kg/dm^3 .



Figura 3.17 - Determinação da massa volúmica aparente;

3.6.1.3. Teor de ar

Aproveitando o recipiente cheio com o betão da verificação da massa volúmica aparente, pode determinar-se o teor de ar, colocando-se a parte superior do aerómetro sobre a inferior e unindo-as hermeticamente.

Com o auxílio de uma seringa, injeta-se água nas duas válvulas laterais até preencher a parte acima da argamassa e fecham-se as válvulas.

Ajusta-se a agulha do manómetro no zero pressionando a bomba contida na parte superior do aparelho.

Abre-se a válvula de ligação entre a célula de ar comprimido e a parte inferior do recipiente. O manómetro dá-nos a imediata indicação do teor de ar (Figura 3.18). Este ensaio baseia-se na norma NP EN 12350-7 [40].



Figura 3.18 – Aerómetro em ensaio de medição de teor de ar;

3.6.2. Ensaio no estado endurecido

Para a caracterização em estado endurecido, das composições estudadas, foi determinada a execução dos seguintes ensaios apresentadas na Quadro 5.

| Ensaio | Provete | Quant. | Data de Ensaio |
|--|----------------|--------|-------------------------|
| Resistência mecânica à compressão | 40x40x40 mm | 6 | 1º, 7º 28º e 56º dia |
| | 100x100x100 mm | 3 | 28º dia |
| Resistência mecânica à flexão | 40x40x40 mm | 3 | 1º, 7º 28º e 56º dia |
| Resistência mecânica à tração por compressão diametral | 100x100x100 mm | 4 | 28º dia |
| Módulo de elasticidade | 100x100x400 mm | 1 | Carregamento ao 28º dia |
| Coeficiente de fluência | 100x100x400 mm | 1 | Carregamento ao 7º dia |
| Retração Total | 40x40x160 mm | 3 | 1º dia e subsequentes |
| | 100x100x500 mm | 2 | |

Quadro 3.5 – Tabela de ensaios realizados;

Notar que o coeficiente de fluência apenas foi determinado para as misturas M3, M5, M9, e M12, tendo ainda sido caracterizado na M7.

Todos os provetes foram mantidos em condições de cura adequadas de acordo com a norma NP 12390-2 [41], quer submersos em água (ensaios de resistência), quer em estufa com humidade e temperatura constante (módulo de elasticidade, fluência e retração).

Em seguida especificam-se a generalidade dos procedimentos adotados nos ensaios mencionados.

3.6.2.1. Resistência mecânica à flexão

O dispositivo colocado na prensa, para a realização deste ensaio, é dotada de três rótulas de aço: uma encontra-se a meio vão da superfície superior do provete; as outras duas situam-se na superfície inferior e distam entre si 2/3 do comprimento do provete, ou seja, 2/3x160mm, de acordo com a norma NP 12390-3 [42].

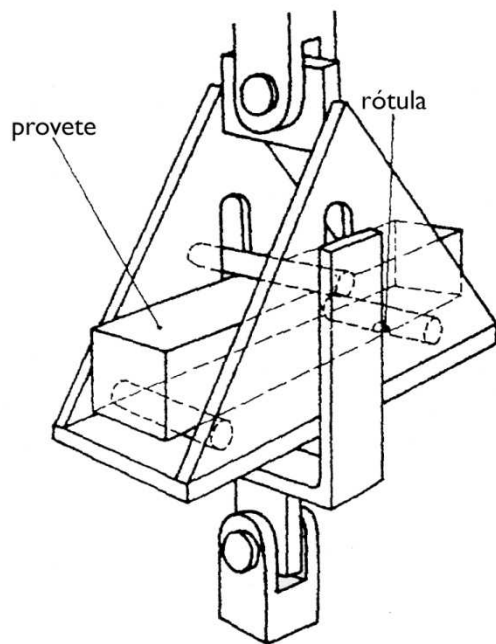


Figura 3.19 - Esquema de ensaio de resistência à flexão [26];



Figura 3.20 - Ensaio de resistência à flexão;

O dispositivo da prensa exibe a força necessária à rotura do provete e a tensão de rotura à por flexão, dada em N/mm^2 , é calculada pela expressão:

$$f_t = \frac{M_{\max}}{Wf} = \frac{[(F_t \times 1000) \times l/4]}{40^3/6} = \frac{3}{2} \times \frac{(F_t \times 1000) \times l}{40^3} \quad (3.10)$$

sendo f_t a tensão de rotura do provete à flexão, M_{\max} o momento máximo (em $\text{N}\cdot\text{mm}$) determinado através do valor da força (F_t , em kN), Wf o módulo de flexão (em mm^3), e l o vão entre os eixos de apoio (em mm).

Como o vão entre os eixos dos apoios é igual a $2/3$ do comprimento do provete (160mm), ou seja, a $106,7\text{mm}$, a tensão de rotura é dada pela seguinte expressão:

$$f_t = \frac{3}{2} \times \frac{(F_t \times 1000) \times 2/3 \times 160}{40^3} = 2,5 \times F_t \quad (3.11)$$

Os resultados são tratados e apresentados analítica e graficamente no capítulo 4. Análise e Discussão de Resultados.

3.6.2.2. Resistência mecânica à compressão

Os provetes utilizados para este ensaio são os resultantes do ensaio anterior.

Interpõe-se na prensa um dispositivo que tem na sua constituição, duas “bolachas de aço” com a forma quadrangular de 40mm de aresta. As “bolachas” comprimem as faces superior e inferior dos provetes até à rotura de acordo com a norma NP 12390-3 [43].

No monitor do computador aparece a força de rotura do provete, em kN, e depois calcula-se a respetiva tensão de rotura à compressão, em N/mm^2 , através expressão:

$$f_c = \frac{(F_c \times 1000)}{40^2} = 0,625 \times F_c \quad (3.12)$$

sendo f_c a tensão de rotura do provete à compressão, em N/mm^2 , e F_c o valor da força de rotura, em kN.

Notar adicionalmente que, além do ensaio de compressão ao 28º dia, executado em 6 provetes de 40 mm de aresta, previamente definidos, foram efetuados também, em procedimento analogamente adaptado, o ensaio de 3 provetes de 100 mm de aresta.

Os resultados são tratados e apresentados analítica e graficamente no capítulo 4. Análise e Discussão de Resultados.

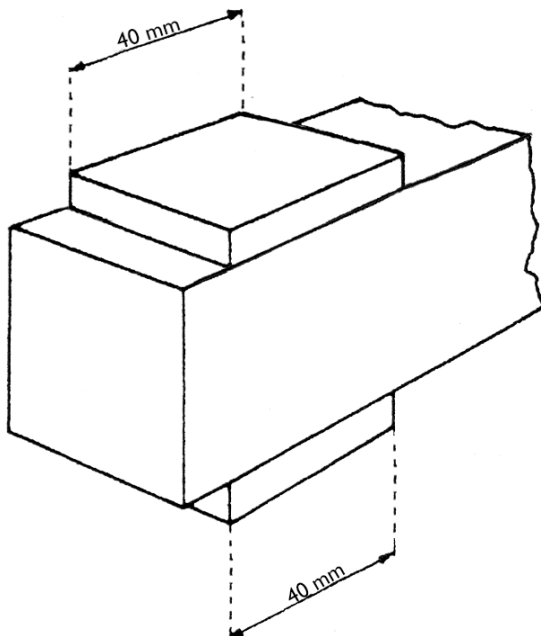


Figura 3.21 - Esquema (adaptado de [26]) de ensaio de compressão;



Figura 3.22 - Ensaio de compressão;

3.6.2.3. Resistência à tração por ensaio de compressão diametral

Para o ensaio em questão foram utilizados provetes de secção 100x100 mm e 200 mm de comprimento divididos em duas zonas de fratura, realizando 2 ensaios de compressão como se de provetes cúbicos de 100 mm de aresta se tratassem. Notar que pese embora o ensaio preconize a realização deste ensaio com provetes cilíndricos ou cúbicos, considerou-se que a diferença de resultado final pela diferença do provete de ensaio não é relevante.

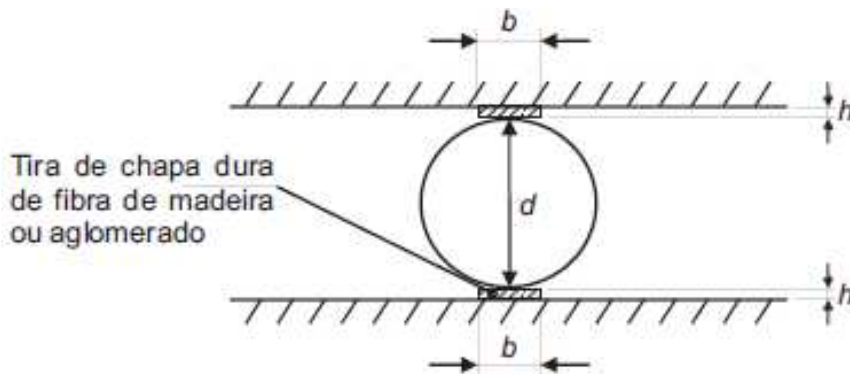


Figura 3.23 – Procedimento de ensaio de compressão diametral, com d sendo o diâmetro do provete, b e h a secção das tiras de chapa ou material duro compreendido entre 15 ± 1 mm e $3,5 \pm 0,5$ mm respetivamente;

Para realização do ensaio interpõe-se na prensa um dispositivo que tem na sua constituição, dois “rolos de aço” com a forma cilíndrica. Os “rolos” comprimem as faces superior e inferior dos provetes até à rotura, de acordo com a norma NP 12390-3 [44].



Figura 3.24 – Ensaio de compressão diametral;

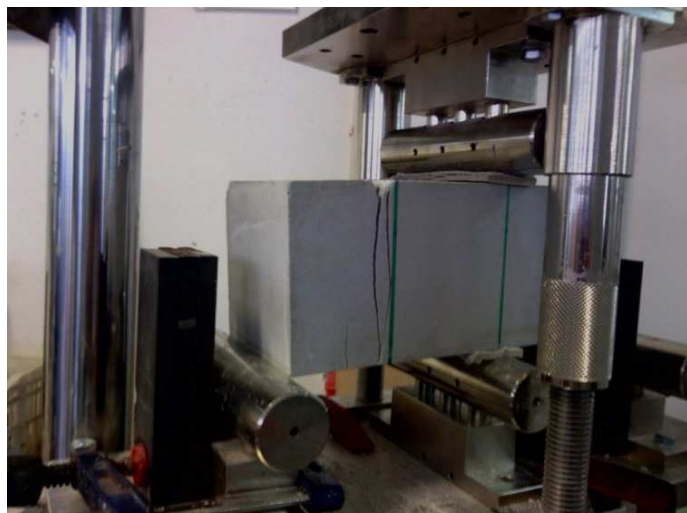


Figura 3.25 - Ensaio de compressão diametral (detalhe);

As medições efetuadas foram registadas, avaliando-se a evolução da retração em gráfico (disponível no capítulo 4) e tratadas de acordo com a especificação LNEC E398-1993 [45]. A extensão de retração foi determinada media ponderada dos resultados obtidos com a seguinte expressão:

$$\varepsilon_{cs} = \frac{d_f - d_i}{d_i} \quad (3.15)$$

Os resultados são tratados e apresentados analítica e graficamente no capítulo 4. Análise e Discussão de Resultados.

3.6.2.5. Módulo de elasticidade

Para o ensaio de determinação de módulo de elasticidade aos 28 dias foram utilizados provetes de secção 100x100 mm com 400 mm de comprimento.

Os provetes foram inicialmente instrumentados com apoios especiais para leitura com alongâmetro, conforme Figuras 3.27, 3.28 e 3.29. Estes apoios foram colocados em equidistância aos topos, distando entre eles 20 cm, em linha de eixo dos provetes, em faces opostas, conforme preconizado pela norma de referência para o ensaio NP EN 12390-13 [46].

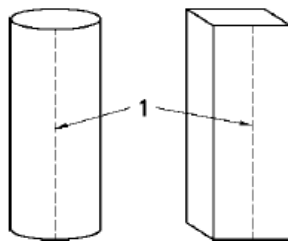


Figura 3.27 – Linha de eixo de leitura (adaptado de [46]).



Figura 3.28 – Aplicação dos apoios com bitola



Figura 3.29 – Provede instrumentado

Tendo sido determinada a resistência à compressão à data de realização do ensaio da mistura em avaliação, utilizada para definir os níveis de tensão superior, inferior e pré-carga (σ_a , σ_b e σ_p , respetivamente) do ciclo de ensaio, os provetes foram colocados e prensa de carga, conforme a Figura 3.30.

A tensão superior, inferior e de pré-carga determinam-se da seguinte forma:

$$\text{Tensão Superior} \quad \sigma_a = \frac{f_c}{3} \quad (3.16)$$

$$\text{Tensão Inferior} \quad 0,1 \times f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 \times f_c \quad (3.17)$$

$$\text{Tensão de pré-carga} \quad 0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b \quad (3.18)$$

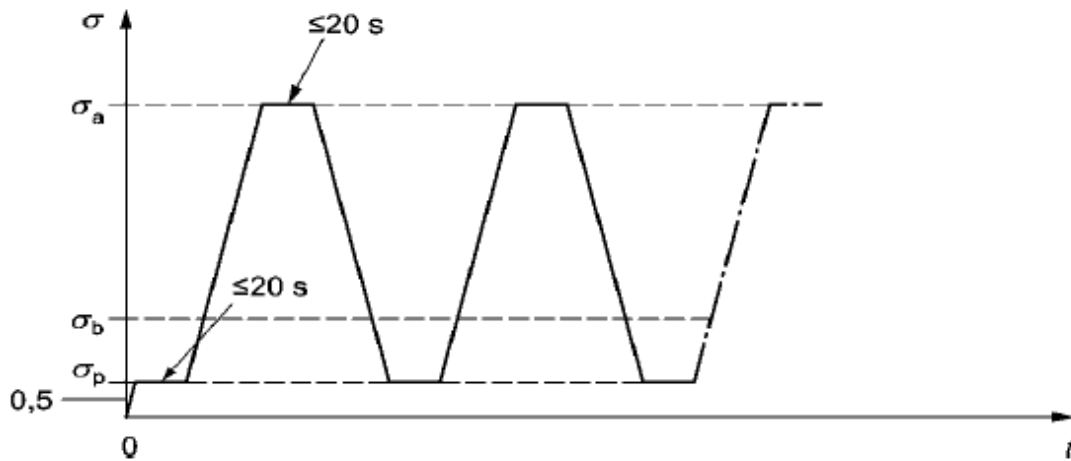


Figura 3.30 – Ciclos de carga para ensaio de módulo de elasticidade (adaptado de [46]);

Foram posteriormente aplicados 3 ciclos de carga/descarga, representado na Figura 3.31, com as respetivas leituras de extensões iniciais e finais, tendo sido as mesmas registadas para cálculo posterior, conforme Figura 3.32.



Figura 3.31 – Provede em prensa de carga;



Figura 3.32 – Medição com extensômetro;

O cálculo final do módulo de elasticidade foi efetuado pela seguinte expressão:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_p^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}} \quad (3.19)$$

Em que σ_a^m é a tensão superior aplicada, σ_p^m é a tensão de pré-carga aplicada, $\varepsilon_{a,3}$ é a extensão verificada e correspondente à tensão superior aplicada e $\varepsilon_{p,2}$ é a extensão verificada e correspondente à tensão de pré-carga aplicada. Os resultados são tratados e apresentados analítica e graficamente no capítulo 4. Análise e Discussão de Resultados.

3.6.2.6. Determinação de coeficiente de fluência

Para o ensaio de determinação de coeficiente de fluência foram utilizados provedes de secção 100x100 mm com 400 mm de comprimento. Estes foram mantidos em estufa de humidade e temperatura controlada até à data de ensaio e conservados da mesma forma durante o período de execução do mesmo.

Os provedes foram inicialmente instrumentados com apoios especiais para leitura com alongâmetro, colocados em equidistância aos topos, distando entre eles 20 cm, em linha de eixo dos provedes, em faces opostas, conforme preconizado pela especificação de base para a realização do ensaio, a especificação LNEC E399-1993 [47]. Os mesmos foram preparados para aplicação em pórtico de carga conforme a Figura 3.33.



Figura 3.33 – Provete instrumentado e preparado para aplicação de carga no pórtico de ensaio de fluência;

Posteriormente à preparação do ensaio, foi aplicada a carga, verificando-se nos pontos de medição a condição de não diferimento de extensões, superiores a 10 % do valor, conforme Figura 3.34.



Figura 3.34 – Medição da extensão com aplicação de carga;

Na primeira leitura de extensões determina-se a extensão instantânea. A periodicidade de leitura das extensões e tensões aplicadas foi definida como mais frequente nos primeiros dias após desmoldagem dos provetes (1º, 2º, 3º, 5º e 7º dia) e com menor frequência após final da primeira semana (14º dia 21º dia e 28º dia), determinando-se desta forma a extensão de fluência a determinada idade, dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_t(t) - \varepsilon_s(t) - \varepsilon_i \quad (20)$$

Com:

$\varepsilon_t(t)$ - extensão total do provete sob tensão num dado tempo t, contada a partir da primeira leitura feita no tempo $t = 0$;

$\varepsilon_s(t)$ - extensão média na mesma idade dos provetes não carregados e conservados (provetes para medição de retração);

ε_i - extensão instantânea medida logo após a aplicação da carga máxima no ensaio de fluência;

O coeficiente de fluência foi posteriormente calculado como sendo o quociente entre o valor da extensão de fluência para esse tempo, multiplicado pelo módulo de elasticidade inicial do betão em MPa, aos 7 dias de idade e o valor da tensão aplicada conforme expressão seguinte, [47]:

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_c(t) \times E'_{c7}}{\sigma_c} \quad (3.21)$$

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Introdução

O quarto capítulo abrange a análise e discussão dos resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais.

Pretende-se neste capítulo efetuar uma análise comparativa relativamente ao desempenho das misturas, quer em estado fresco quer em estado endurecido.

Conforme mencionado anteriormente, as misturas M7 e M13 foram desconsideradas na análise mais exaustiva do estudo, devido à elevada dosagem de superplastificante necessária à trabalhabilidade definida poder constituir um elemento de distorção de resultados, uma vez que a sobredosagem conduz à perda de homogeneidade da matriz e à perda de desempenho desta. Abaixo indica-se em Quadro 4.1 de misturas consideradas em ensaio.

| Mistura | Tipo de Fibra | Proporção | Volume |
|---------|---------------------|-----------|--------|
| M1 | N/A | N/A | N/A |
| M2 | Aço – F1 | 1 | 1 % |
| M3 | Aço – F1 | 1 | 2 % |
| M4 | Polipropileno – F2 | 1 | 1 % |
| M5 | Polipropileno – F2 | 1 | 2 % |
| M6 | Fibra de Vidro – F3 | 1 | 1 % |
| M8 | Polipropileno – F2 | 2/3 | 1 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 1/3 | |
| M9 | Polipropileno – F2 | 1/2 | 1 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 1/2 | |
| M10 | Polipropileno – F2 | 1/3 | 1 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 2/3 | |
| M11 | Polipropileno – F2 | 2/3 | 2 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 1/3 | |
| M12 | Polipropileno – F2 | 1/2 | 2 % |
| | Fibra de Vidro – F3 | 1/2 | |

Quadro 4.1 – Misturas consideradas e alvo de ensaios de caracterização;

4.2. Resultados de ensaios em estado fresco

Conforme indicado anteriormente, para análise das propriedades das misturas em estado fresco, foram considerados 3 parâmetros: massa volúmica aparente, teor de ar e análise da consistência e fluidez por espalhamento.

A nível de massa volúmica aparente registaram-se variações inferiores a 1%, sendo que foi considerado que este não é um parâmetro de primeira análise, e por consequência efetuar comparações com os resultados restantes. Tal pode ser verificado na Quadro 4.2 onde se verifica que o diferencial entre o valor da massa volúmica de cálculo e o valor de ensaio são efetivamente diminutos, o que reduz a significância de eventuais conclusões que se possam inferir deste parâmetro, além de ser um parâmetro que valida a mistura, conjuntamente com o teor de ar e o volume total.

| | Teor Ar (%) | M.V. Cálculo (g) | M.V. Ensaio (g) | Δ (%) |
|-----|----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| M1 | 1,00 | 2275 | 2268 | 0,31% |
| M2 | 1,50 | 2326 | 2311 | 0,64% |
| M3 | 1,50 | 2378 | 2357 | 0,88% |
| M4 | 1,60 | 2258 | 2247 | 0,49% |
| M5 | 1,75 | 2239 | 2225 | 0,63% |
| M6 | 1,20 | 2261 | 2281 | 0,88% |
| M8 | 1,40 | 2250 | 2230 | 0,89% |
| M9 | 1,30 | 2252 | 2272 | 0,89% |
| M10 | 1,75 | 2254 | 2273 | 0,84% |
| M11 | 1,40 | 2230 | 2225 | 0,22% |
| M12 | 1,40 | 2233 | 2242 | 0,40% |

Quadro 4.2 – Resultados de ensaio de teor de ar e massa volúmica aparente;

No entanto, e pelo que a trabalhabilidade é fortemente afetada pela dosagem de superplastificante, torna-se indispensável efetuar uma comparação entre este parâmetro, o teor de ar da mistura e o espalhamento da mesma, tendo em conta o tipo de fibra (ou mistura híbrida de fibras) em questão.

Assim sendo, e tendo em conta a análise do Gráfico 4.1, verifica-se desde logo um aumento de dosagem de superplastificante para todas as composições onde se incluam fibras do tipo F3 (fibra de vidro), podendo-se desta forma concluir diretamente que a aplicação deste tipo de fibra, por serem muito finas, induz nas misturas perdas de trabalhabilidade significativas.

A mistura M1, sem fibras, obteve uma compacidade ainda mais elevada, comprovada pelo reduzido teor de ar (1%).

De notar também que a combinação desta fibra em misturas híbridas de fibras obriga a um aumento gradual de superplastificante para mantimento de níveis de espalhamento e teor de ar dentro dos alvos admitidos inicialmente, ou seja 350 ± 20 mm e 1,5 % respetivamente. Tal evolução é verificável nas misturas M6 (1% de fibra F3) M7, M8, M9, M10, M11 e M12.

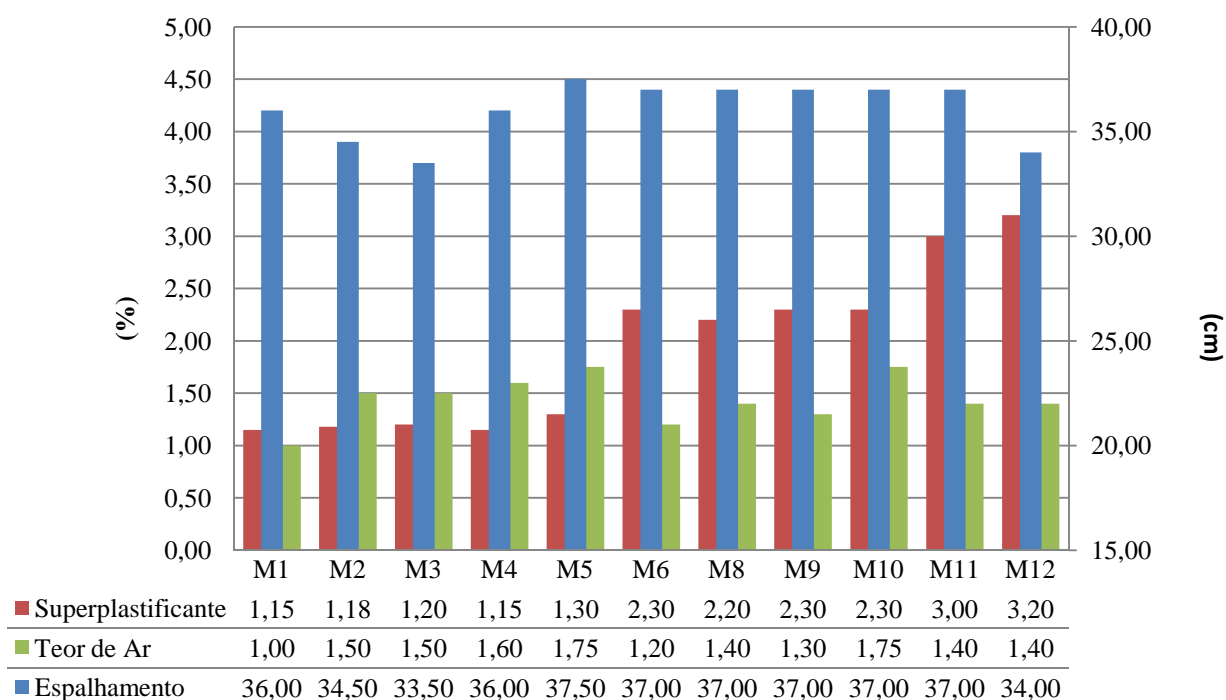


Gráfico 4.1 - Análise de dosagem de superplastificante, teor de ar e espalhamento.

A nível de teor de ar, verifica-se também, nas misturas M4, M5 e M10, uma ligeira diferença por excesso (1,6, 1,75 e 1,75, respetivamente) em relação ao valor esperado de 1,5% para este parâmetro.

4.3. Resultados de ensaios em estado endurecido

Conforme indicado anteriormente, para análise das propriedades das misturas em estado fresco, foram considerados 5 parâmetros: resistência mecânica à compressão, resistência mecânica à flexão, resistência à tração por compressão diametral, retração total, determinação de módulo de elasticidade e do coeficiente de fluência, este último apenas determinado para

as misturas M3, M5, M11 e M12. Apresentam-se de seguida a análise detalhada e comparativa dos resultados obtidos.

4.3.1. Resistência mecânica à flexão

Para análise de resultados de resistência mecânica à flexão, e de forma a podermos aferir a prestação de cada mistura, são apresentados gráficos comparativos entre resistências médias comparativos, tendo sempre por referência a mistura M1 (mistura de referência). São efetuados vários tipos de análise gráfica comparativa sendo que se pretende:

- Comparação com a mistura sem fibras, M1, de referência;
- Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras (ou mistura) independente da dosagem;
- Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras, independente do tipo de fibras (ou mistura);

Apresenta-se abaixo o quadro de resultados de resistência mecânica à flexão, seguidamente a análise gráfica dos mesmos.

| | Resistência à compressão (Mpa) | | | | Fibra | Proporção | Volume |
|-----|--------------------------------|--------|---------|---------|-------|-----------|--------|
| | 1º Dia | 7º Dia | 28º Dia | 56º Dia | | | |
| M1 | 9,23 | 9,30 | 9,31 | 9,51 | N / A | N / A | N / A |
| M2 | 12,78 | 14,30 | 14,63 | 14,78 | F1 | 1 | 1% |
| M3 | 14,52 | 26,73 | 28,18 | 28,20 | F1 | 1 | 2% |
| M4 | 9,01 | 10,30 | 10,06 | 9,82 | F2 | 1 | 1% |
| M5 | 7,83 | 10,64 | 10,31 | 10,68 | F2 | 1 | 2% |
| M6 | 8,90 | 8,55 | 9,02 | 9,96 | F3 | 1 | 1% |
| M8 | 8,88 | 9,53 | 9,10 | 15,86 | F2+F3 | 2/3 + 1/3 | 1% |
| M9 | 8,49 | 8,59 | 8,70 | 12,06 | F2+F3 | 1/2 + 1/2 | 1% |
| M10 | 7,85 | 8,07 | 8,23 | 9,71 | F2+F3 | 1/3 + 2/3 | 1% |
| M11 | 8,43 | 9,20 | 10,49 | 11,78 | F2+F3 | 2/3 + 1/3 | 2% |
| M12 | 9,88 | 10,51 | 10,55 | 11,38 | F2+F3 | 1/2 + 1/2 | 2% |

Quadro 4.3 - Resultados de resistência à flexão.

4.3.1.1. Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras

Pretende-se com a análise seguinte efetuar uma comparação de desempenho entre misturas com o mesmo tipo de fibras ou mistura híbrida das mesmas, de forma a aferir o efeito da variação da dosagem destas.

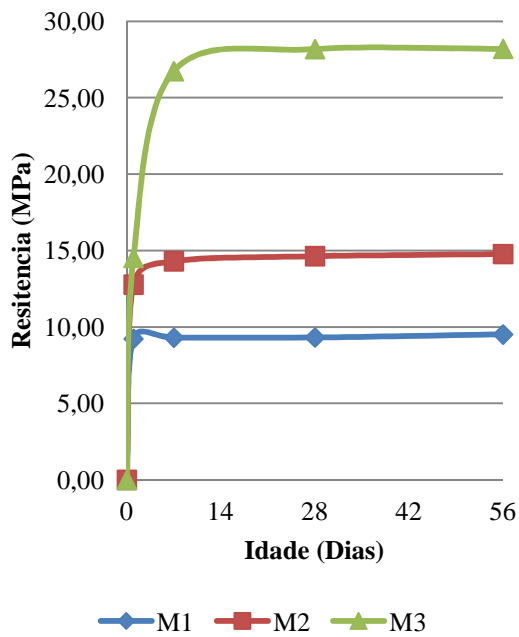


Gráfico 4.2 – Resistência à flexão
M1-M2-M3;

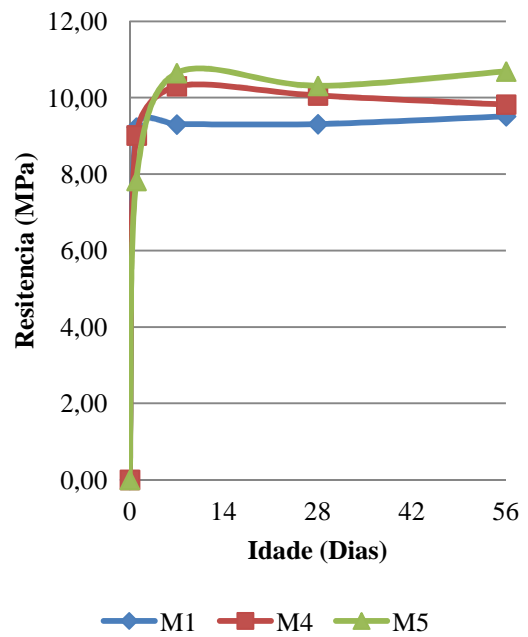


Gráfico 4.3 - Resistência à flexão
M1-M4-M5;

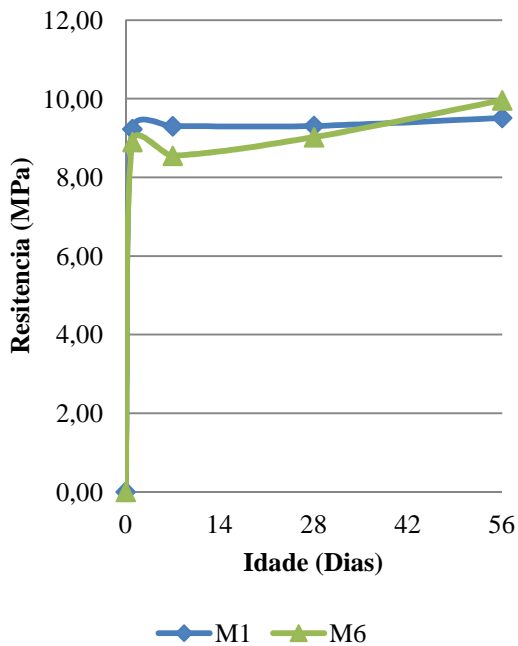


Gráfico 4.4 - Resistência à flexão
M1-M6;

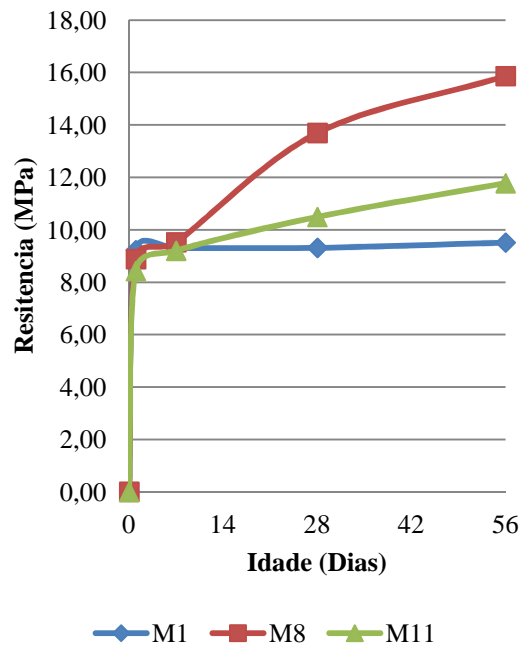


Gráfico 4.5 – Resistência à flexão
M1-M8-M11;

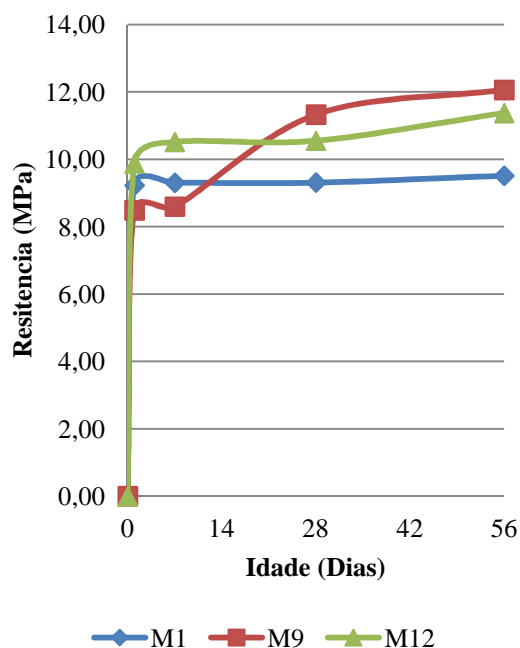


Gráfico 4.6 – Resistência à flexão
M1-M9-M12;

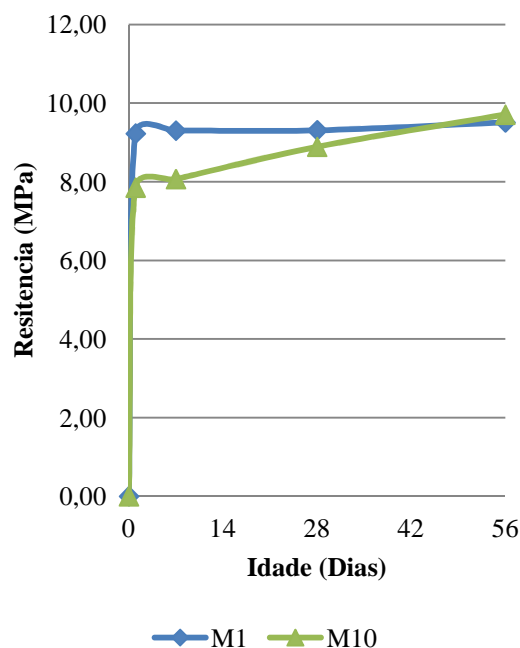


Gráfico 4.7 – Resistência à flexão
M1-M10;

Conforme pode ser verificado na análise anterior, em Gráfico 4.2 verifica-se um incremento de resistência mecânica à flexão, de cerca de 55% e 200% para a utilização de fibras de aço (F1) correspondentes à mistura M2 (14.78 MPa) e M3 (28.20 MPa), quando comparados com a mistura de referência M1 (9,51 MPa), aos 56 dias de idade. Salienta-se desta forma o evidente benefício da utilização de fibra de aço, nas dosagens indicadas que provoca um aumento gradual da resistência à flexão, em proporção à dosagem de fibra utilizada nestas misturas.

Já em análise às misturas M4 e M5, visível no Gráfico 4.3, correspondentes à utilização de 1% e 2% de fibra F2, verifica-se que estas têm, em comparação à mistura de referência, um aumento de resistência à flexão na ordem de 3% e 12%, traduzindo-se em 9.82 MPa e 10.68 MPa, respetivamente.

No que diz respeito à mistura M6 (1% de fibra F3), visível no Gráfico 4.4, verifica-se também um ligeiro aumento de resistência em relação à mistura de referência, na ordem de 4.5%, (9.96 MPa) ainda que numa fase inicial, o andamento das resistências tenha sido ligeiramente abaixo da mistura de referência.

Em análise às misturas M8 e M11, visível no Gráfico 4.5, e recordando que estas composições referem-se a dosagens de 1% e 2%, respetivamente, de mistura híbrida com predominância de fibra F2, verifica-se uma elevada resistência à flexão na mistura M8 (15,86 MPa aos 56 dias), sendo que na mistura M11, ainda que seja verificada maior resistência em

comparação à mistura de referência, (11,78 MPa aos 56 dias), é notório que o aumento de dosagem de mistura híbrida de fibra não traduz um aumento de resistência. Pelo contrário, tende a ser significativamente inferior.

Relativamente às misturas M9 e M12, visível no Gráfico 4.6, e recordando que estas composições referem-se a dosagens de 1% e 2%, respetivamente, de mistura híbrida de fibra F2 e F3 em partes iguais, verifica-se maior resistência à flexão, embora ligeira, na mistura M9 (12,06 MPa aos 56 dias), sendo que na mistura M12, ainda que seja verificada maior resistência em comparação à mistura de referência, (11,38 MPa aos 56 dias), é notório que o aumento de dosagem de mistura híbrida de fibra também não traduz um aumento de resistência. Pelo contrário, tende a decrescer, acompanhando a análise do parágrafo anterior.

Por fim, em relação à mistura M10 verifica-se, comparativamente à mistura de referência, uma maior resistência à flexão na ordem dos 2% (9,71 MPa) aos 56 dias, sendo que apenas nesta idade o valor de resistência é superior à mistura de referência.

4.3.1.2. Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras

Pretende-se com a análise seguinte efetuar uma comparação de desempenho entre misturas com a mesma dosagem de fibras, de forma a aferir o efeito da variação do tipo destas.

Conforme pode ser aferido no Gráfico 4.8, verifica-se que, para uma dosagem de 1% de fibras, a mistura M2 (fibra de aço) tem um desempenho superior (já espetável) em relação à mistura de referência M1, com valor de 14,78 MPa aos 56 dias.

Verifica-se de igual forma que as misturas M4 e M6, com 1% de fibra F2 e F3 respetivamente, atingem como já vimos anteriormente, valores de resistência ligeiramente superiores à mistura de referência, sendo que no caso da mistura M6, este valor só é atingido aos 56 dias, o que sinaliza um desempenho inferior desta fibra, quando comparada às demais.

No que diz respeito às misturas híbridas, conforme já mencionado, verifica-se uma elevada resistência à flexão na mistura M8, no valor de 15,86 MPa, sendo que na mistura M9 e M10 verifica-se 12,06 e 9,71 MPa, respetivamente. Recorda-se que a mistura M8 tem predominantemente fibra F2, a mistura M9 tem igual proporção de fibra F2 e F3 e a mistura M10 tem predominantemente fibra F3.

Verifica-se de igual forma, nas misturas híbridas, resistências iniciais relativamente baixas tendo em conta a resistência aos 56 dias e também quando efetuada a comparação com as restantes misturas, originando com isto, um crescimento de resistência conforme expresso no Gráfico 4.8 abaixo.

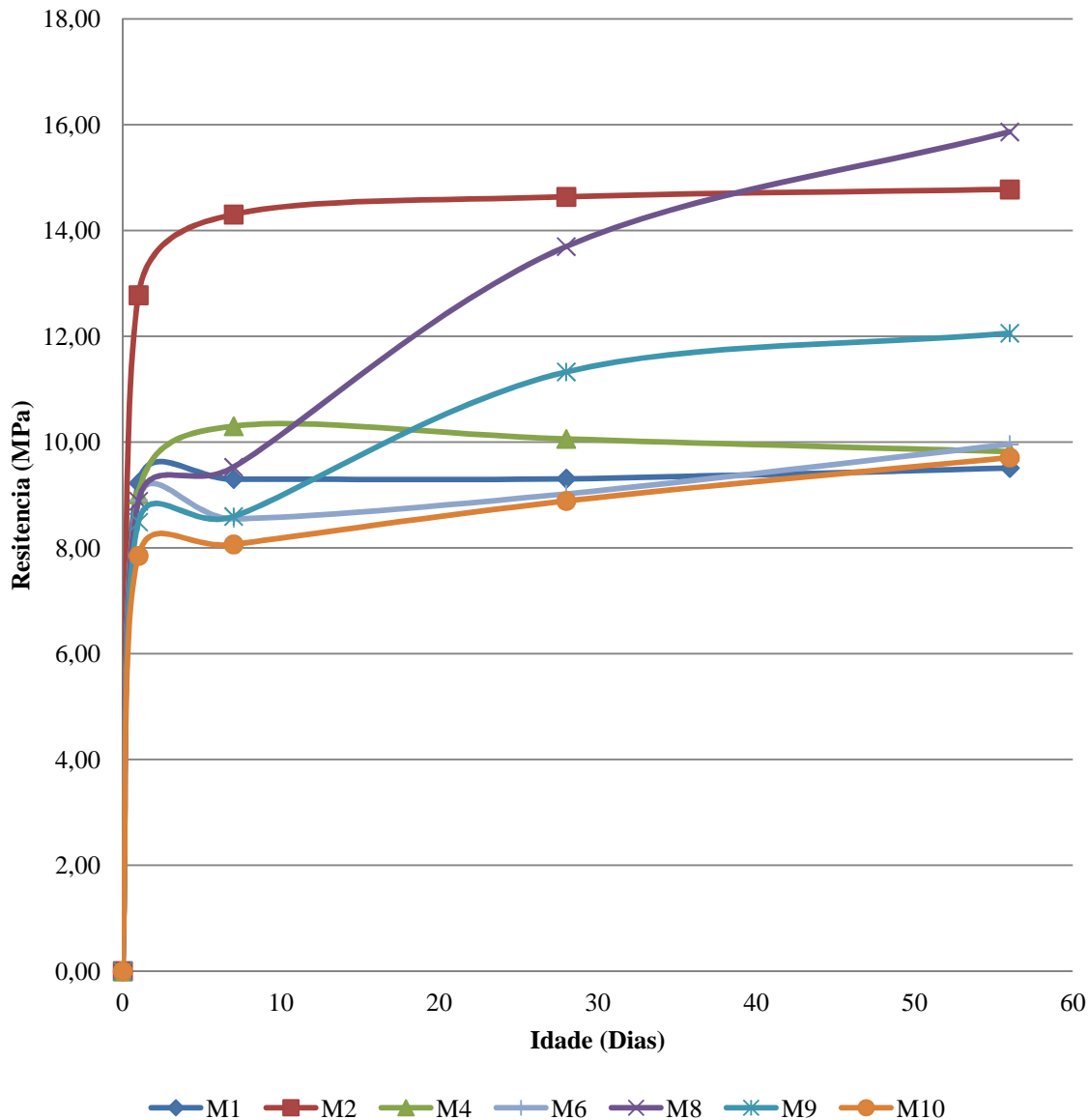


Gráfico 4.8 – Resistência à flexão - M1 e misturas com dosagem de 1% de fibras;

Conforme pode ser aferido no Gráfico 4.9, verifica-se que, para uma dosagem de 2% de fibras, a mistura M3 (fibra de aço) tem um desempenho muito superior (já espetável, embora tenha superado a proporção direta com a dosagem de fibras) em relação à mistura de referência M1, com valor de 28.20 MPa aos 56 dias.

Verifica-se de igual forma que a mistura M5, com 2% de fibra F2, atinge como já vimos anteriormente, valores de resistência na ordem dos 12% superiores, relativamente à mistura de referência.

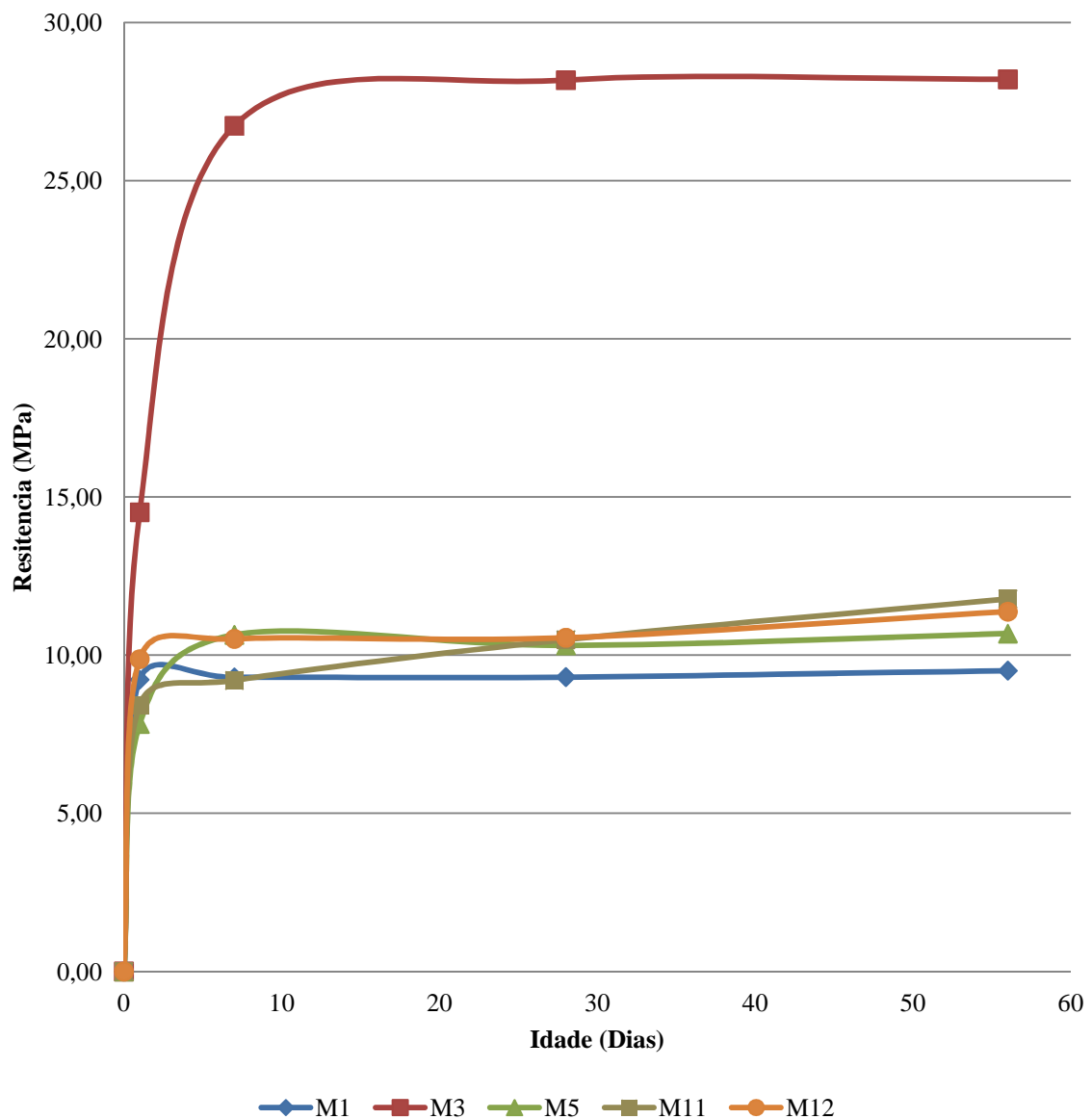


Gráfico 4.9 – Resistência à flexão - M1 e misturas com dosagem de 2% de fibras;

Já no que se refere às misturas híbridas M11 e M12, verifica-se para ambas, um nível de resistência semelhante, com ligeiro melhor desempenho para a mistura M11 (11,78 MPa) com predominância de fibra F3, quando comparada com a mistura M12 (11,38 MPa) com igual parte de fibra F2 e F3, aos 56 dias de idade.

4.3.2. Resistência mecânica à compressão

Para análise de resultados médios da resistência mecânica à compressão, e de forma a podermos aferir a prestação de cada mistura, são apresentados gráficos de resistência comparativos, tendo sempre por referência a mistura M1 (mistura de referência). São efetuados vários tipos de análise gráfica comparativa sendo que se pretende:

- Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras (ou mistura) independente da dosagem;
- Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras, independente do tipo de fibras (ou mistura);

Apresenta-se abaixo o quadro de resultados de resistência mecânica à compressão e seguidamente a análise gráfica dos dados em causa.

| | Resistência à compressão (Mpa) | | | | Fibra | Proporção | Volume |
|-----|--------------------------------|--------|---------|---------|-------|-----------|--------|
| | 1º Dia | 7º Dia | 28º Dia | 56º Dia | | | |
| M1 | 48,3 | 88,8 | 105,5 | 111,0 | N / A | N / A | N / A |
| M2 | 62,1 | 93,8 | 111,4 | 115,2 | F1 | 1 | 1% |
| M3 | 65,7 | 115,4 | 119,7 | 125,8 | F1 | 1 | 2% |
| M4 | 52,3 | 88,5 | 98,7 | 101,2 | F2 | 1 | 1% |
| M5 | 46,0 | 77,8 | 82,3 | 89,9 | F2 | 1 | 2% |
| M6 | 48,8 | 79,9 | 94,6 | 98,3 | F3 | 1 | 1% |
| M8 | 50,4 | 79,6 | 94,1 | 98,6 | F2+F3 | 2/3 + 1/3 | 1% |
| M9 | 45,9 | 74,9 | 93,6 | 96,8 | F2+F3 | 1/2 + 1/2 | 1% |
| M10 | 48,7 | 81,2 | 95,6 | 95,3 | F2+F3 | 1/3 + 2/3 | 1% |
| M11 | 44,3 | 72,8 | 80,5 | 93,0 | F2+F3 | 2/3 + 1/3 | 2% |
| M12 | 42,3 | 75,9 | 84,5 | 86,3 | F2+F3 | 1/2 + 1/2 | 2% |

Quadro 4.4 - Resultados de resistência à compressão;

4.3.2.1. Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras

Pretende-se com a análise seguinte efetuar uma comparação de desempenho entre misturas com o mesmo tipo de fibras ou mistura híbrida das mesmas, de forma a aferir o efeito da variação da dosagem destas.

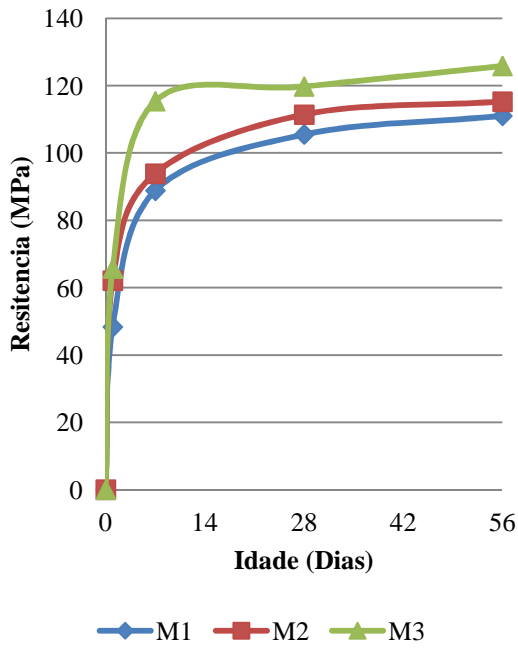


Gráfico 4.10 – Resistência à compressão
M1-M2-M3;

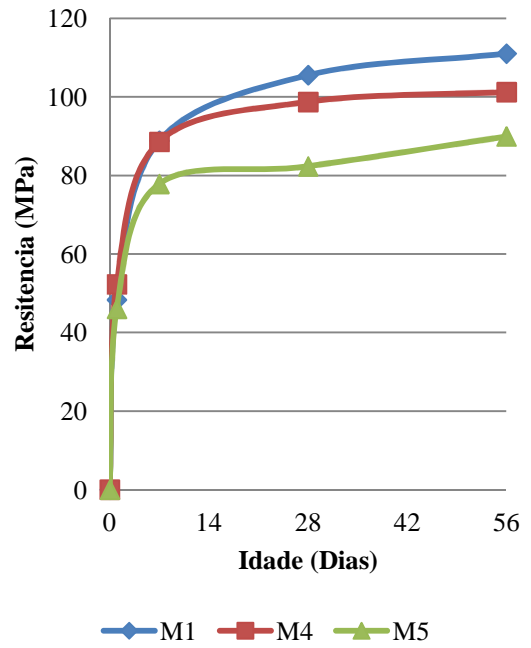


Gráfico 4.11 - Resistência à compressão
M1-M4-M5;

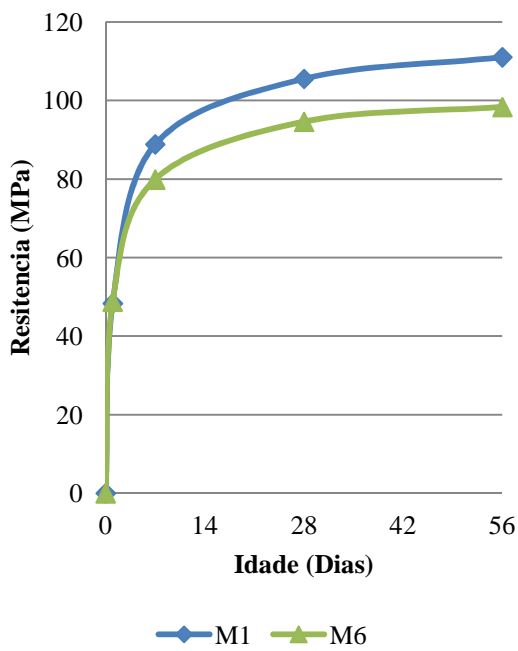


Gráfico 4.12 - Resistência à compressão
M1-M6;

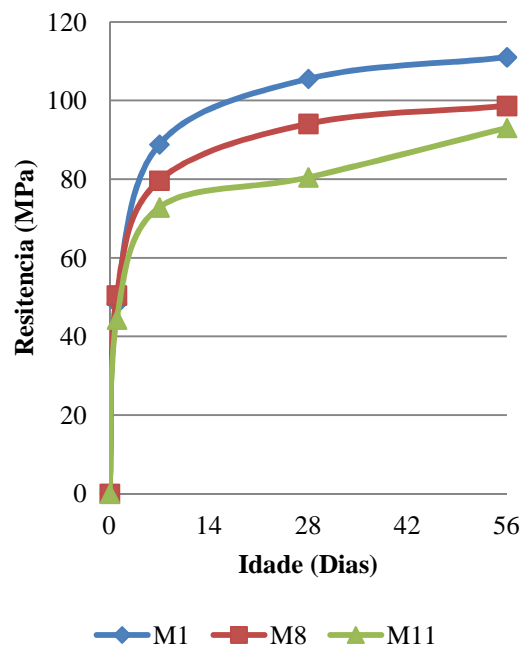


Gráfico 4.13 – Resistência à compressão
M1-M8-M11;

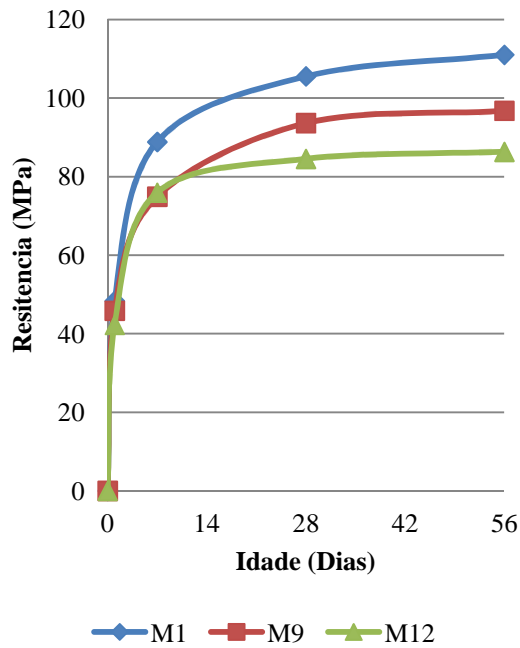


Gráfico 4.14 – Resistência à compressão
M1-M9-M12;

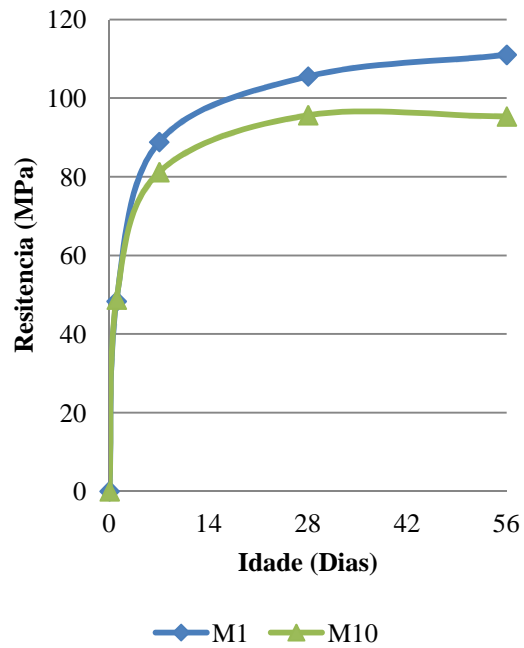


Gráfico 4.15 – Resistência à compressão
M1-M10;

Conforme pode ser verificado na análise anterior, em Gráfico 4.10 verifica-se um incremento de resistência mecânica à compressão, de cerca de 10% e 20% para a utilização de fibras de aço (F1) correspondentes à mistura M2 (1%) e M3 (2%), quando comparados com a mistura de referência M1.

Já em análise às composições com fibras não metálicas, quer em composição simples, quer em composição híbrida, verifica-se uma diminuição de resistência compressão em praticamente todas as idades em relação à mistura de referência, também na ordem de 10% a 20% para dosagens de 1% e 2% respectivamente.

Em análise mais detalhada podemos verificar que, na mistura M4 e M5, correspondentes a 1% e 2% de fibra F2 (polipropileno e polietileno) a diminuição de resistências é também de cerca de 10% e 20%, respectivamente), sendo que os valores tendem a ganhar algum afastamento com o envelhecimento, sempre comparativamente à mistura de referência.

A mistura M6 tem também um comportamento similar, de menores resistências em cerca de 10%, principalmente verificadas a partir do 7º dia de idade.

A nível de misturas híbridas verifica-se também o mesmo padrão, ou seja, abaixamento de resistências na ordem de 10% para as misturas com 1% de dosagem de fibra (M8, M9 e M10) e 20% para as para as misturas com 2% de dosagem de fibra (M11 e M12), em ambas as comparações com base na mistura de referência M1.

Pelos resultados obtidos podemos concluir que o aumento de dosagem de fibras não metálicas não se traduz num benefício direto de aumento de resistência à compressão. Pelo contrário, estas tendem a decrescer com o aumento de dosagem. Este é certamente o efeito combinado da redução da compacidade e do aumento do teor de ar com a necessidade de aumento da dosagem de superplastificante; nas misturas com fibras de aço, este comportamento não se verifica provavelmente pela maior rigidez e capacidade de confinamento da matriz com essas fibras.

Tendo em conta os resultados atrás verificados, decidiu-se efetuar uma análise transversal, de forma a mensurar um padrão de influencia na resistência à compressão, por parte dos parâmetros de trabalhabilidade verificados nas misturas, (teor de ar, espalhamento), bem como respetiva dosagem de superplastificante.

Desta forma, são abaixo apresentadas análises das misturas em gráfico de teia (Gráficos 4.16 a 4.21), notando que para melhor análise dos referidos parâmetros, tendo em consideração que os mesmos obedecem a ordem de grandeza e dimensões diferentes, optou-se por efetuar a comparação em valores normalizados, tendo por base a mistura de referência.

Esta análise permitiu aferir a existência de um padrão comportamental de redução das resistências à compressão, em *trade-off* com um aumento da dosagem de superplastificante, conforme expectável. Pode também ser verificada a manutenção dos valores de espalhamento e teor de ar em torno dos valores esperados, com exceção da mistura M10 na qual se verificou um teor de ar ligeiramente superior ao esperado, conforme já indicado anteriormente.

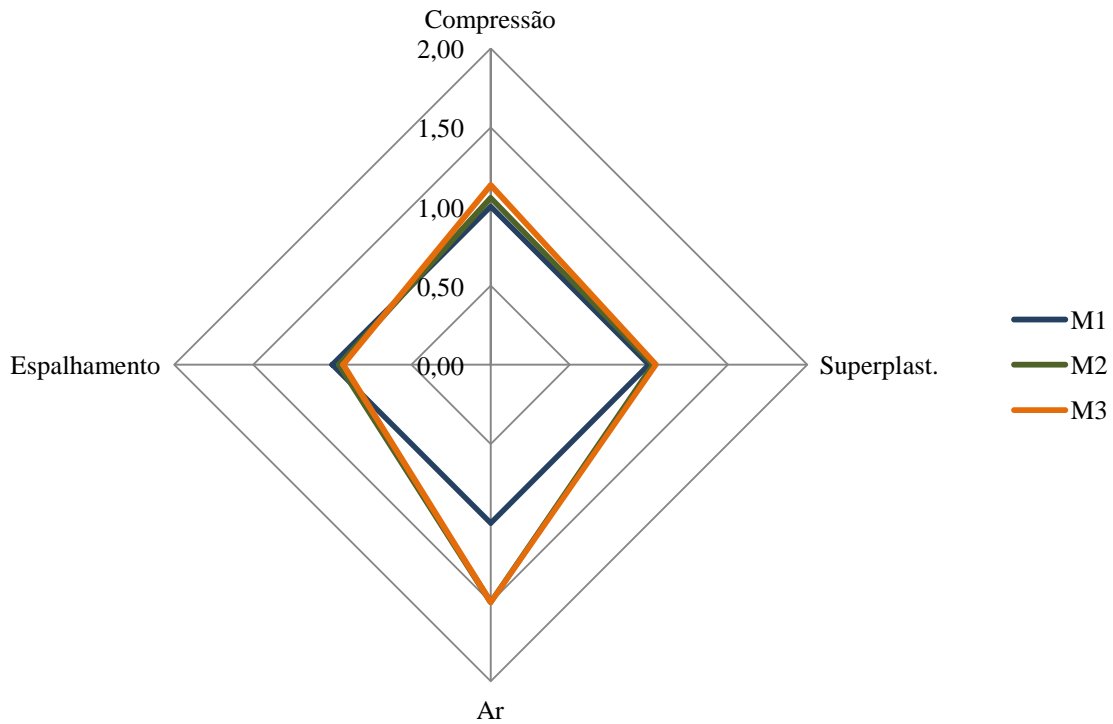


Gráfico 4.16 – Resistência à compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M2-M3;

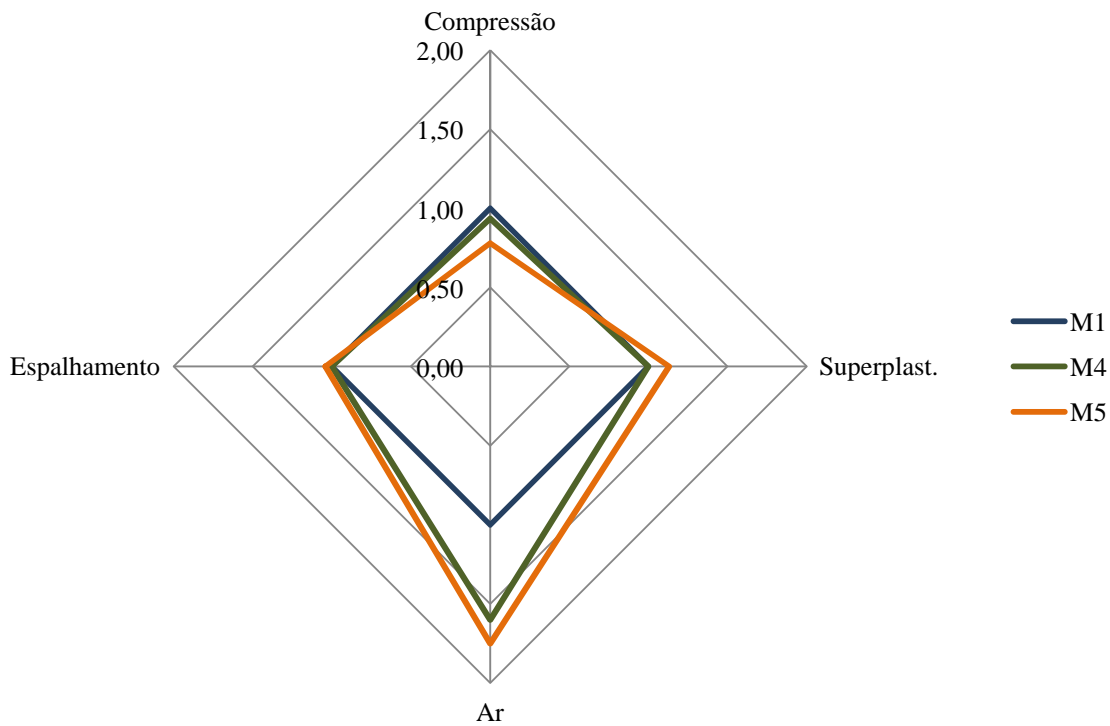


Gráfico 4.17 – Resistência à compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M4-M5;

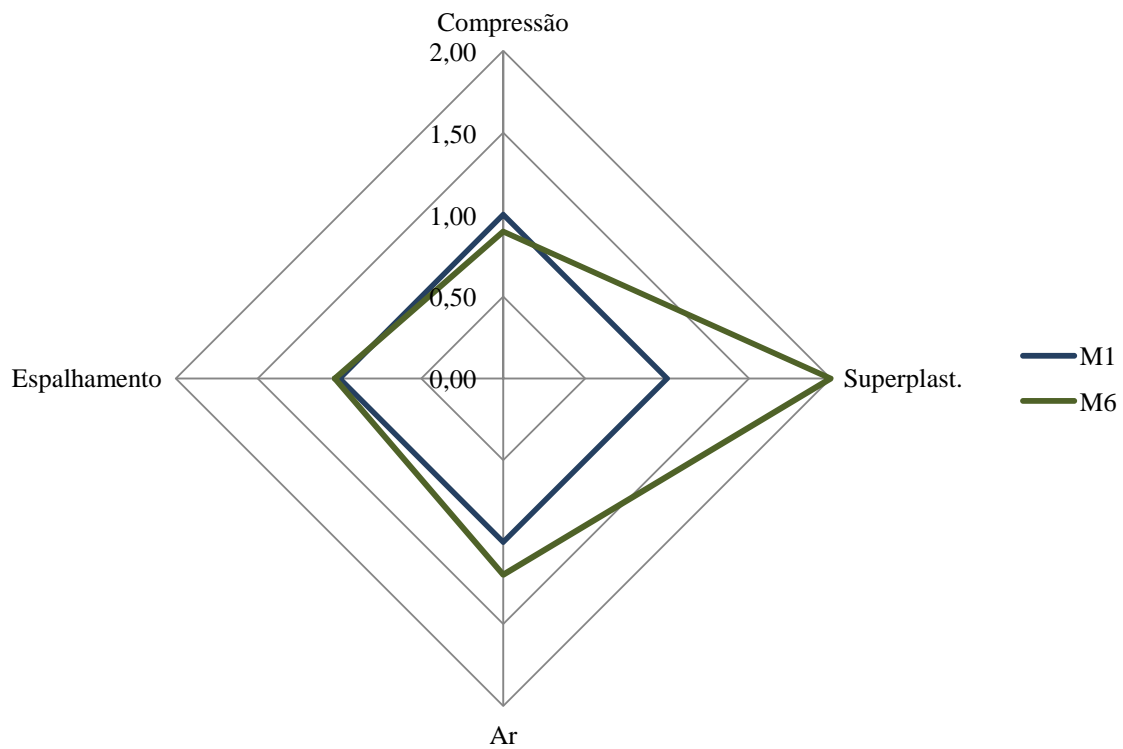


Gráfico 4.18 – Resistência à compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M6;

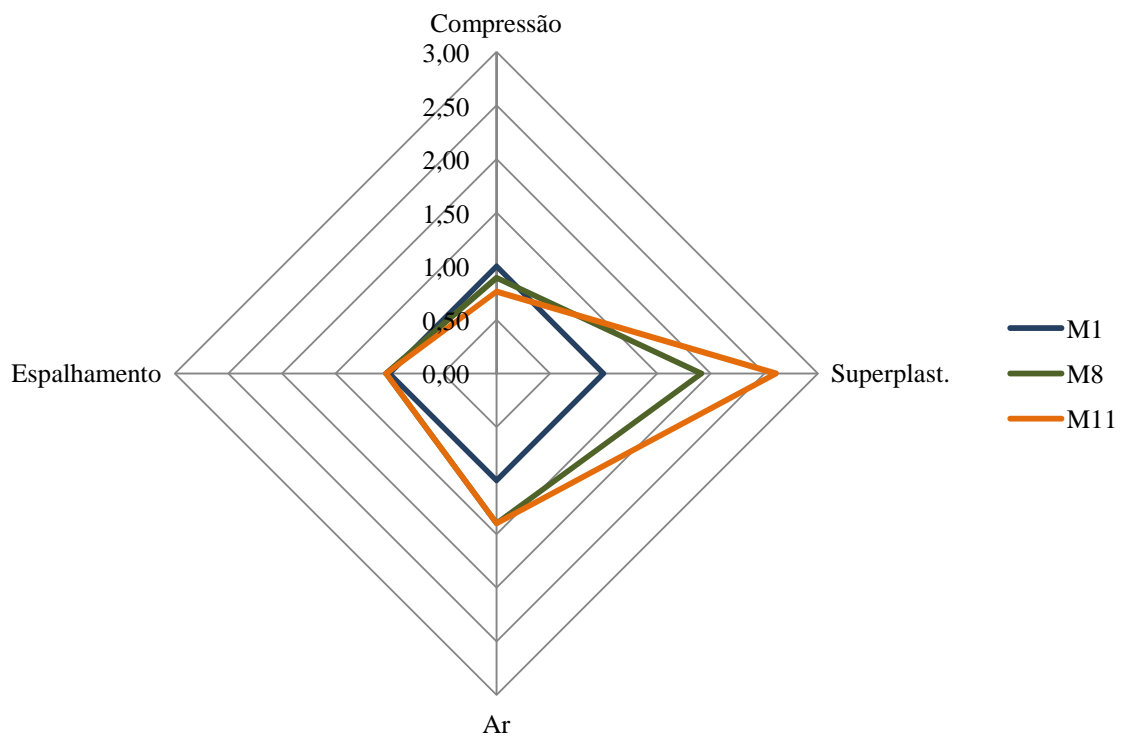


Gráfico 4.19 – Resistência à compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M8-M11;

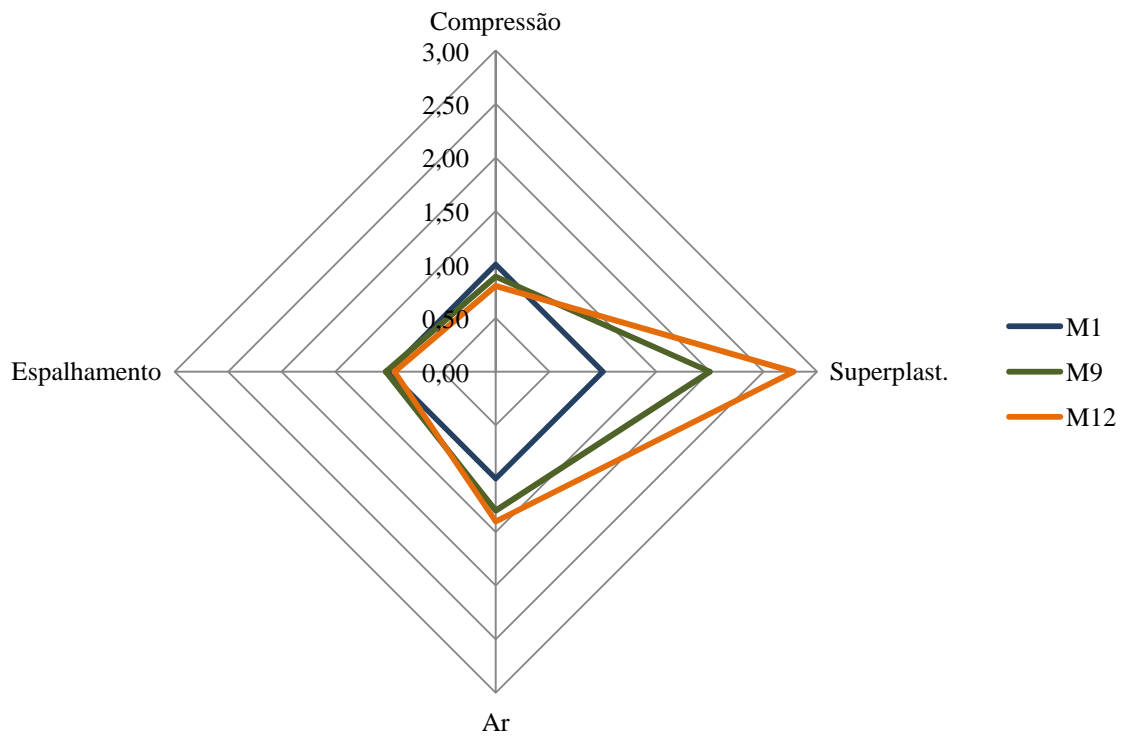


Gráfico 4.20 – Resistência à compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M9-M12;

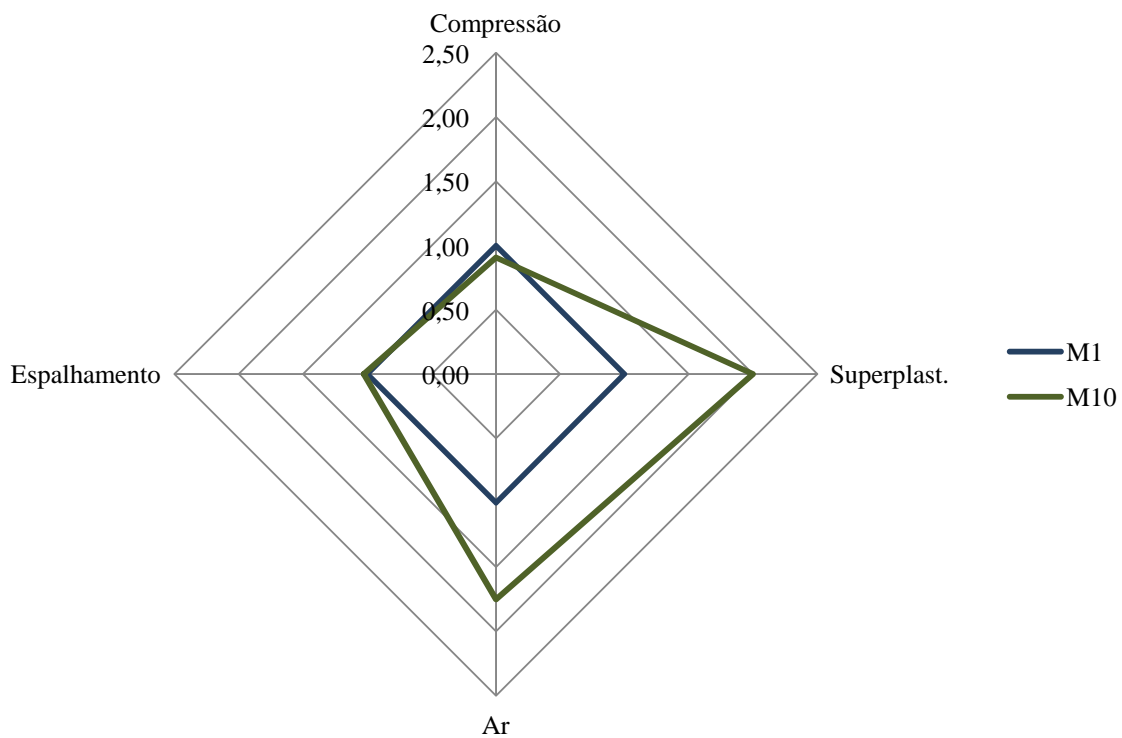


Gráfico 4.21 – Resistência à compressão e parâmetros de trabalhabilidade M1-M10;

Conforme pode ser verificado nas análises anteriores, verifica-se que, nas misturas com menor resistência à compressão do que a mistura de referência, o aumento significativo da dosagem do superplastificante, está associado às misturas onde se verifica abaixamento de resistência à compressão. No entanto, e apesar de poder contrariar a afirmação anterior, verifica-se na mistura M4 e M5 que o aumento de superplastificante não foi significativo, porém e por consequência, no entanto o seu teor em ar foi mais elevado.

4.3.2.2. Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras

Pretende-se com a análise seguinte efetuar uma comparação de desempenho entre misturas com a mesma dosagem de fibras, de forma a aferir o efeito da variação do tipo destas (Gráficos 4.22 e 4.23).

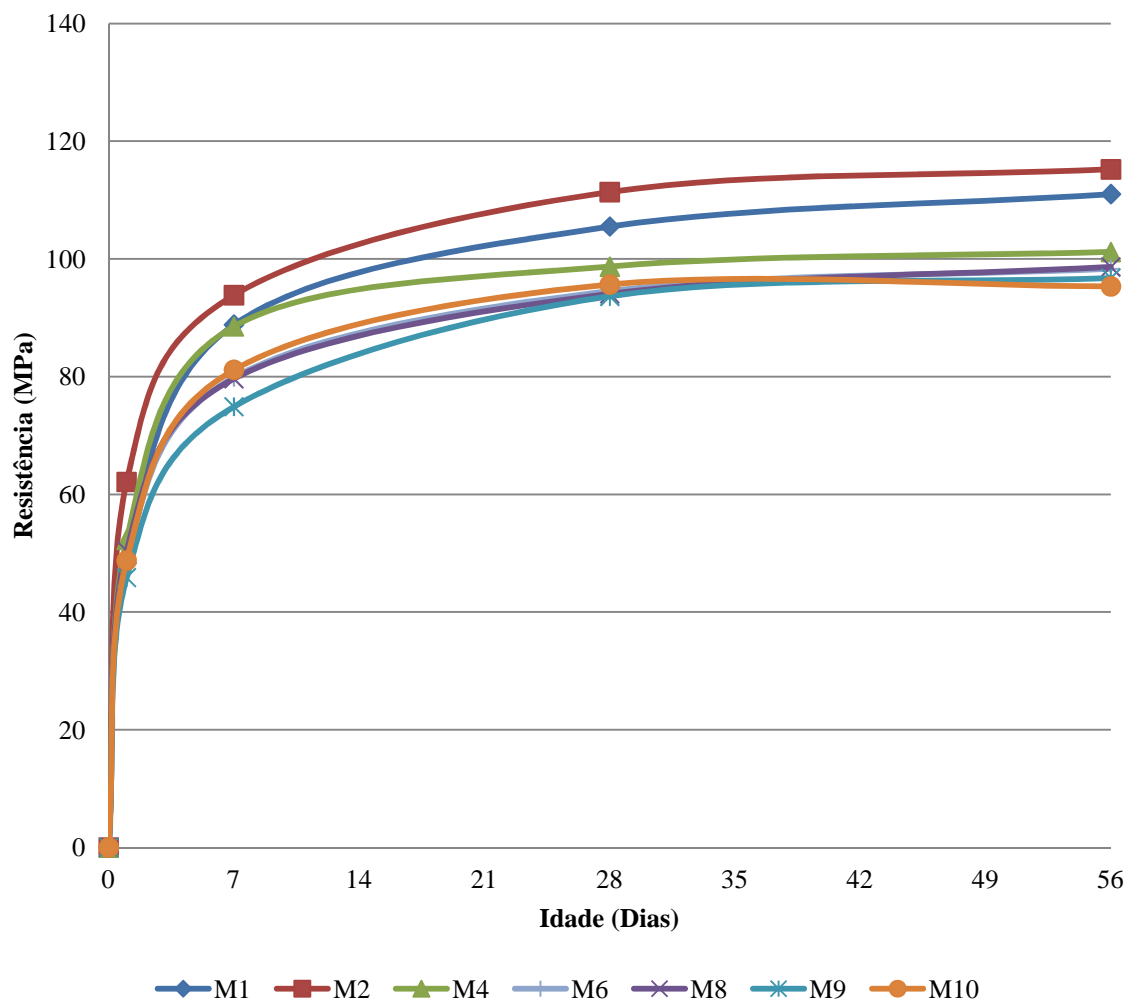


Gráfico 4.22 – Resistência à compressão - M1 e misturas com dosagem de 1% de fibras;

Conforme pode ser aferido no Gráfico 4.22, para uma dosagem de 1% de fibras, a mistura M2 (fibra de aço) tem um desempenho superior (já expectável) em relação à mistura de referência M1, com valor de 115 MPa aos 56 dias. Por sua vez, todas as misturas com fibras não metálicas, apresentam uma resistência à compressão inferior a M1, com valor de aproximadamente 95 a 100 MPa aos 56 dias.

Salienta-se também que as misturas onde existe predominância da fibra F2 (M4 e M8) os resultados são ligeiramente superiores em cerca de 2% a 3% quando comparados com as composições onde existe predominância de fibra F3, confirmando de certa forma a prestação desta fibra quando aplicada isoladamente, na mistura M6, que quando comparada com M4, tem um desempenho ligeiramente inferior.

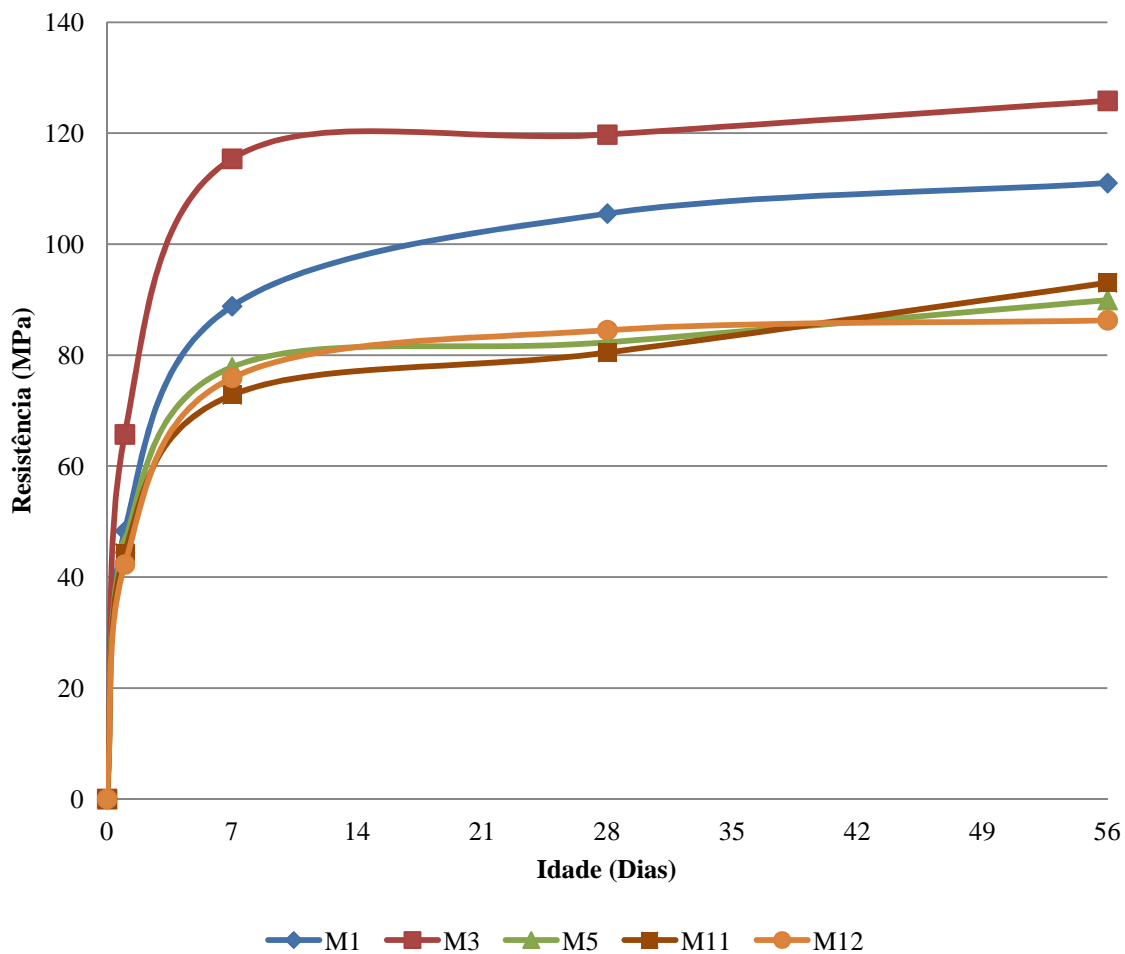


Gráfico 4.23 – Resistência à compressão - M1 e misturas com dosagem de 2% de fibras;

Conforme pode ser aferido no Gráfico 4.23, para uma dosagem de 2%, o padrão de conclusões a retirar da sua análise é relativamente paralelo às verificadas para uma dosagem de 1%. Verifica-se que a mistura M3 (fibra de aço) tem um desempenho superior (já

expectável) em relação à mistura de referência M1, com valor de 125 MPa aos 56 dias. Por sua vez, todas as misturas com fibras não metálicas, apresentam uma resistência à compressão inferior a M1, com valor de aproximadamente 86 a 93 MPa aos 56 dias, com particular destaque para a mistura M5 com resistência na ordem de 90 MPa.

A nível de misturas híbridas, verifica-se uma redução de resistência, com incremento de fibra F3, verificável nas misturas M11 e M12 que atingem, aos 56 dias, 93 e 86 MPa de resistência à compressão, respetivamente.

4.3.3. Resistência à tração por compressão diametral

Para análise de resultados de resistência mecânica à tração por compressão diametral, e de forma a podermos aferir a prestação de cada mistura, é apresentada representação gráfica dos respetivos valores médios de resistência, com referência comparativa à mistura M1 (mistura de referência). São efetuados vários tipos de análise comparativa sendo que se pretende:

- Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras (ou mistura) independente da dosagem;
- Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras, independente do tipo de fibras (ou mistura);

| Resistência à tração por compressão diametral (MPa) 28º Dia | | Fibra | Proporção | Volume |
|--|------|-------|-----------|--------|
| M1 | 6,04 | N / A | N / A | N / A |
| M2 | 7,40 | F1 | 1 | 1% |
| M3 | 9,25 | F1 | 1 | 2% |
| M4 | 4,41 | F2 | 1 | 1% |
| M5 | 4,22 | F2 | 1 | 2% |
| M6 | 4,70 | F3 | 1 | 1% |
| M8 | 5,37 | F2+F3 | 2/3 + 1/3 | 1% |
| M9 | 5,34 | F2+F3 | 1/2 + 1/2 | 1% |
| M10 | 4,39 | F2+F3 | 1/3 + 2/3 | 1% |
| M11 | 4,88 | F2+F3 | 2/3 + 1/3 | 2% |
| M12 | 5,15 | F2+F3 | 1/2 + 1/2 | 2% |

Quadro 4.5 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral;

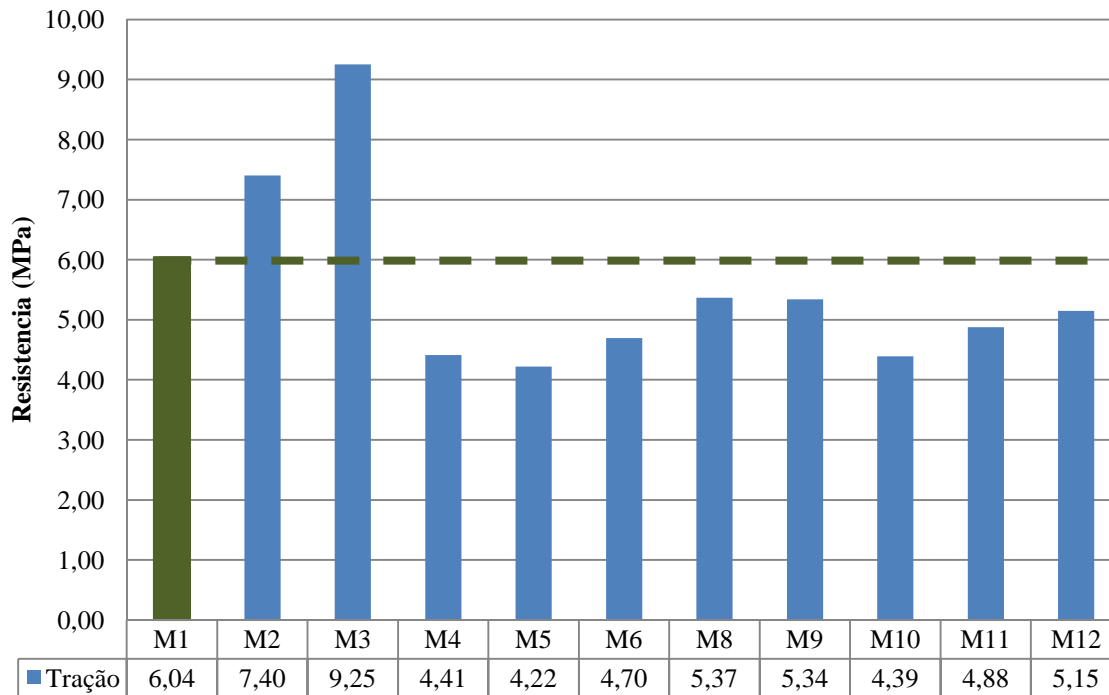


Gráfico 4.24 - Resistência à tração por compressão diametral.

4.3.3.1. Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras

Conforme pode ser verificado no Gráfico 4.24, verificaram-se nas misturas M2 e M3, correspondentes a 1% e 2% de dosagem de fibra de aço, maior resistência, comparativamente à mistura de referência, traduzindo-se em aumentos na ordem de 22% e 53% respectivamente, em relação a esta.

Já no que diz respeito às fibras não metálicas, em todas é verificada perda de resistência em relação à mistura de referência, na ordem dos 11% a 30%. Mais detalhadamente, podemos verificar que nestas fibras, o aumento da dosagem de 1% para 2% traduziu-se numa perda generalizada de resistência. Tal verifica-se ao comparar a mistura M4 (1% fibra F2) com a mistura M5 (2% fibra F2) que atingem valores de 4.41 e 4.22 MPa respectivamente, e também ao comparar as misturas híbridas M8/M9 (1% híbrida) com as misturas M11/M12 (2% híbrida). Este tipo de ensaio, menos dependente das fibras não metálicas, como menor rigidez, evidencia mais claramente a redução do desempenho mecânico da matriz com a adição dessas fibras; o mesmo não acontece nas misturas com adição de fibras metálicas devido à sua rigidez elevada e capacidade de confinamento.

4.3.3.2. Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras

Tendo em conta a análise das misturas com fibras não metálicas, verifica-se que, em termos de resistência, a fibra tipo F3, quando utilizada isoladamente, oferece melhor desempenho do que a fibra F2. Tal pode ser aferido comparando os resultados obtidos pela mistura M4 e M6, correspondentes a 1% de fibra F2 e 1 % de Fibra F3.

Já a nível de misturas híbridas, verifica-se um benefício significativo da utilização destas misturas, quando comparadas com as misturas simples. Tal pode ser verificável por comparação de resultados obtidos entre as misturas M5 (4.22 MPa) e M11 ou M12 (4.88 e 5.15 MPa respetivamente), misturas correspondentes à incorporação de 2% de fibra. Verificação semelhante, pode também ser retirada da análise de comparação entre as misturas M4, M6 (4.41 e 4.70 MPa) e M8, M9 (5.37 e 5.34 MPa), sendo que, nesta dosagem apenas a mistura M10, rompe com esta verificação, tendo obtido um valor de resistência inferior (4.39 MPa).

4.3.4. Módulo de Elasticidade

Para análise de resultados do módulo de elasticidade, e de forma a podermos aferir a prestação de cada mistura, é apresentada representação gráfica (Gráfico 4.25) dos respetivos valores médios, com referência comparativa à mistura M1 (mistura de referência). São efetuados vários tipos de análise comparativa sendo que se pretende:

- Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras (ou mistura) independente da dosagem;
- Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras, independente do tipo de fibras (ou mistura);

| Módulo de Elasticidade (GPa) 28º Dia | | Fibra | Proporção | Volume |
|---|-------|-------|-----------|--------|
| M1 | 38,65 | N / A | N / A | N / A |
| M2 | 42,27 | F1 | 1 | 1% |
| M3 | 38,99 | F1 | 1 | 2% |
| M4 | 37,69 | F2 | 1 | 1% |
| M5 | 31,41 | F2 | 1 | 2% |
| M6 | 35,61 | F3 | 1 | 1% |
| M8 | 36,18 | F2+F3 | 2/3 + 1/3 | 1% |
| M9 | 38,65 | F2+F3 | 1/2 + 1/2 | 1% |
| M10 | 36,18 | F2+F3 | 1/3 + 2/3 | 1% |
| M11 | 35,89 | F2+F3 | 2/3 + 1/3 | 2% |
| M12 | 35,06 | F2+F3 | 1/2 + 1/2 | 2% |

Quadro 4.6 - Resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias;

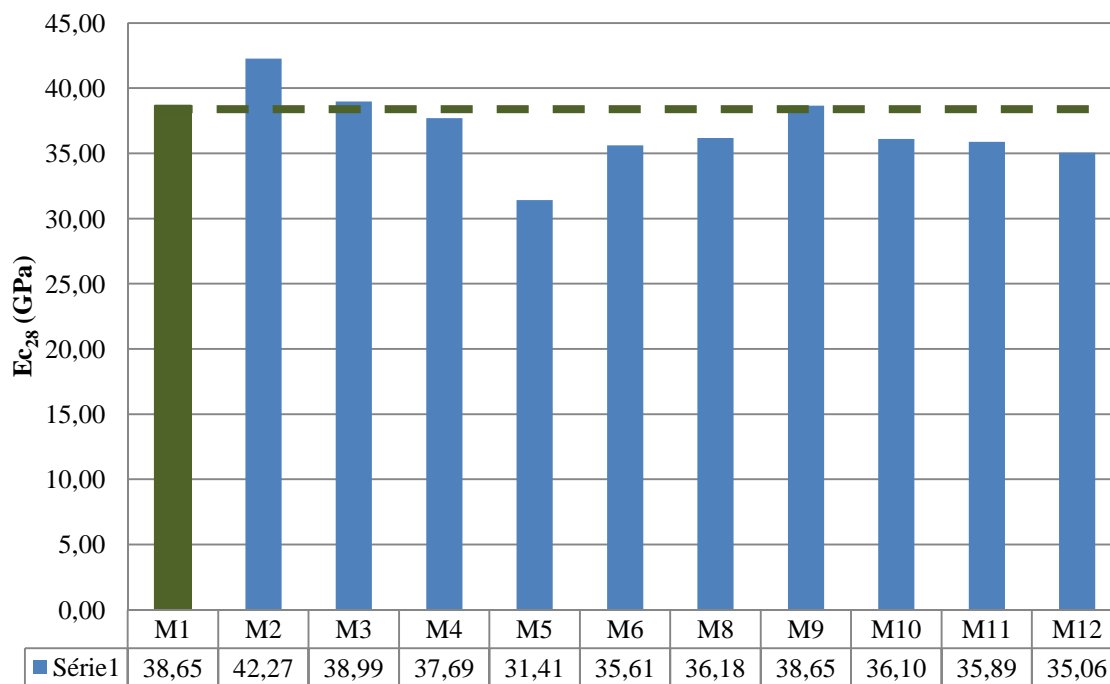


Gráfico 4.25 - Módulo de elasticidade aos 28 dias;

4.3.4.1. Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras

Verifica-se através dos resultados que em todas as misturas realizadas com fibra não metálica, o módulo de elasticidade aos 28 dias é inferior, ou no máximo igual, ao obtido para a mistura de referência M1. Apenas nas misturas com fibras de aço (F1) o valor é superior.

Tendo em conta uma comparabilidade entre misturas com o mesmo tipo de fibra, podemos aferir a um nível generalizado que a incorporação de fibras na dosagem de 2% fez com que houvesse uma diminuição do módulo de elasticidade. Tal pode ser aferido comparando as misturas M2 e M3 (fibra F1), M4 e M5 (fibra F1), M8 e M10 (híbrida com predominância F2) e M9 e M12 (híbrida em igual proporção).

4.3.4.2. Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras

A nível comparativo de misturas com 1 % de dosagem de fibra não metálica, podemos aferir que, para misturas com apenas um tipo de fibra, os resultados obtidos são superiores para a utilização de fibra F2. Tal pode ser verificado pela comparação entre a mistura M4 e M6, cujos resultados foram de 37.69 GPa e 35.61 GPa respetivamente.

Já quando se efetua uma comparação das misturas com dosagem de 2% de fibra não metálica, pode ser facilmente verificável que as misturas híbridas têm um melhor desempenho em comparação da mistura M5 (31.41 GPa) composta por 2% de fibra F2 e pelas misturas M11 (35.89 GPa) e M12 (35.06 GPa). Nas misturas híbridas, não é possível definir no entanto uma tendência de benefício ou perda de módulo de elasticidade onde exista predominância de fibra F2 ou F3.

4.3.5. Retração Total

Para análise de resultados de retração total, é apresentada representação gráfica dos respetivos valores médios de deformação acumulada, verificada em ensaio com provetes de 40x40x160 mm, para todas as misturas em estudo. Adicionalmente é também apresentada análise referente aos resultados de retração total, obtidos através do ensaio com provetes de 100x100x500 mm, especificamente para as misturas M1, M3, M5 e M12, correspondendo estas a uma dosagem de 2% de fibras.

Para ambas as análises retratadas, e de forma a poder aferir-se a prestação de cada mistura, é efetuada uma comparação relativamente à mistura M1 (mistura de referência), e, de forma análoga às análises anteriores, são efetuados vários tipos de exercícios comparativos sendo que se pretende:

- Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras (ou mistura) independente da dosagem;
- Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras, independente do tipo de fibras (ou mistura);

No caso dos provetes de 100x100x500 (mm), das misturas M1, M3, M5 e M12 é adicionalmente efetuada uma análise tendo em conta a previsão de retração de acordo com o modelo de retração preconizado pelo EC2 [48].

4.3.5.1. Resultados em provetes 40x40x160 - Comparação entre misturas com o mesmo tipo de fibras

Apresenta-se abaixo representação gráfica dos resultados obtidos para retração total em provetes de 40x40x160 mm, até aos 90 dias de idade, sendo que a partir desta, os valores de retração apresentam relativa estabilidade, tendo em conta a análise em questão.

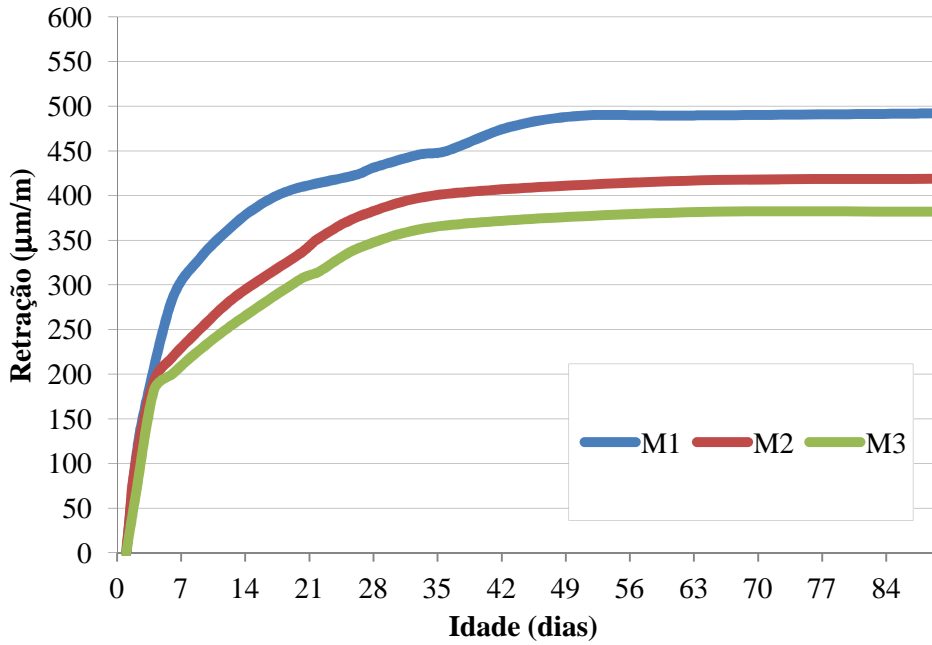


Gráfico 4.26 - Retração total para M1-M2-M3 em provetes 40x40x160 mm;

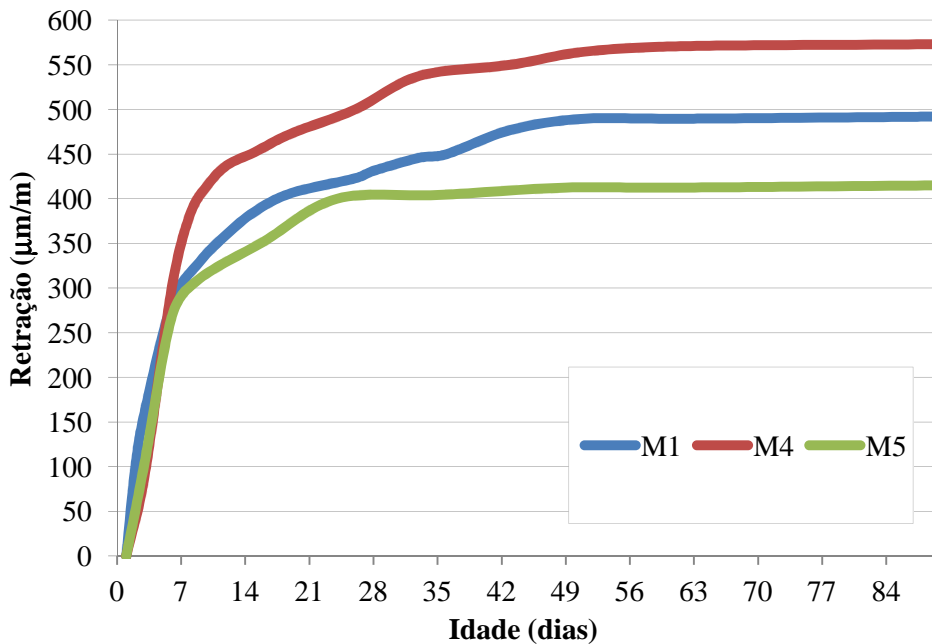


Gráfico 4.27 - Retração total para M1-M4-M5 em provetes 40x40x160 mm;

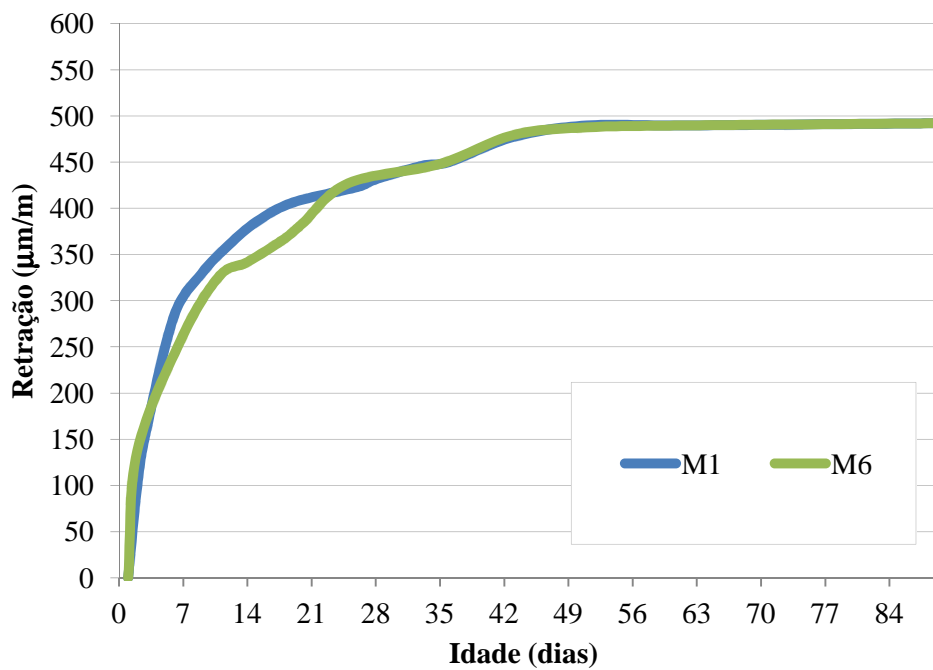


Gráfico 4.28 - Retração total para M1-M6 em provetes 40x40x160 mm;

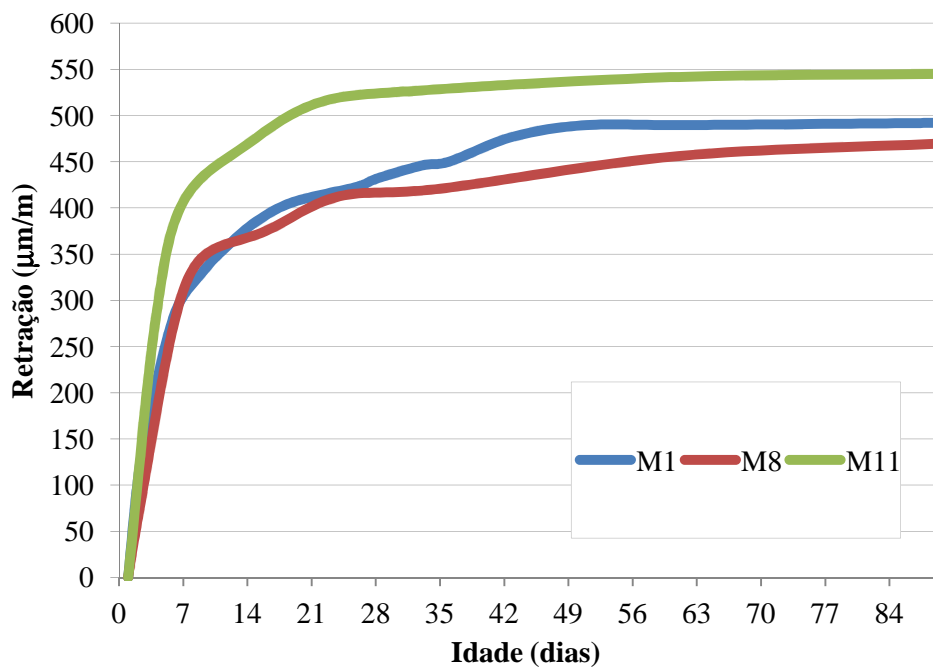


Gráfico 4.29 - Retração total para M1-M8-M11 em provetes 40x40x160 mm;

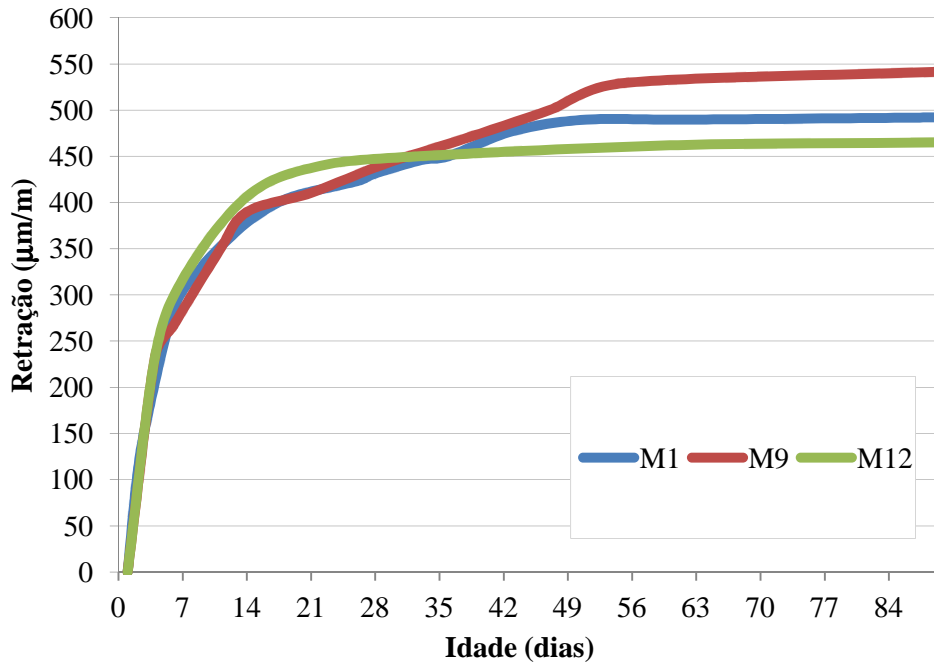


Gráfico 4.30 - Retração total para M1-M9-M12 em provetes 40x40x160 mm;

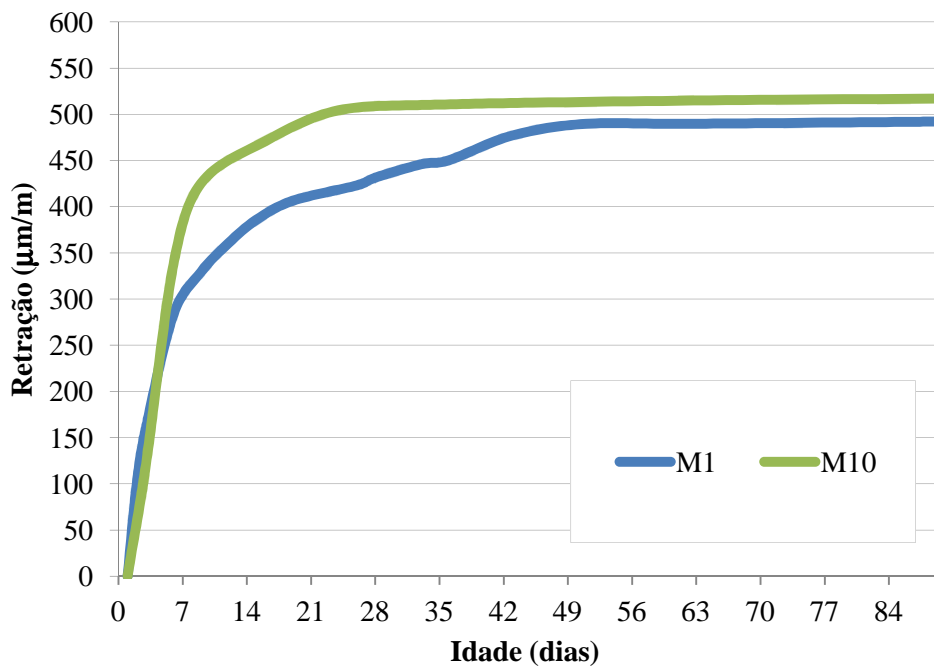


Gráfico 4.31 - Retração total para M1-M10 em provetes 40x40x160 mm;

Conforme pode ser verificado no Gráfico 4.26, verificaram-se nas misturas M2 e M3, correspondentes a 1% e 2% de dosagem de fibra de aço, uma retração inferior à verificada na

mistura de referência M1, tendo o valor estabilizado para M2 e M3 sido 15% e 22% inferior ao verificado para M1, na qual se registam cerca de 490 $\mu\text{m}/\text{m}$ após estabilização.

Relativamente às misturas M4 e M5, apresentadas em Gráfico 4.27, sendo estas correspondentes, respetivamente, a 1% e 2% de dosagem de fibra F2, verifica-se que a retração verificada para M4 foi cerca de 15% inferior à mistura de referência, sendo que, para M5 verifica-se uma retração superior, no mesmo valor percentual.

Já a mistura M6, visível no Gráfico 4.28, correspondente a uma dosagem de 1% de fibra F3, verifica-se um andamento dos valores de retração muito similar à mistura de referência M1.

No que diz respeito a misturas híbridas, verifica-se que, para misturas com predominância de fibra F3, sendo estas M8 e M11 (1% e 2% respetivamente) representadas no Gráfico 4.29, verifica-se que para M8, a retração foi cerca de 5% inferior à mistura de referência, sendo que, para M11, verifica-se uma retração superior, em cerca de 10%.

Nas misturas híbridas, com igual proporção de fibra F2 e F3, sendo estas M9 e M12 (1% e 2% respetivamente) representadas no Gráfico 4.30, verifica-se que a retração para M9 foi cerca de 10% superior à mistura de referência, sendo que, para M12 verifica-se uma retração inferior, em cerca de 5%.

Já relativamente à mistura M10, representada em Gráfico 4.31, correspondente a 1% de dosagem de mistura de fibra híbrida com predominância do tipo F3, verifica-se um valor de retração total acumulada, cerca de 5% superior à mistura de referência.

Da análise anterior pode-se verificar que existe um padrão de diminuição dos valores de retração, com o aumento da dosagem de fibra, não sendo verificável apenas nas misturas M8 e M11, sendo estas misturas híbridas com predominância de fibra F2.

4.3.5.2. Resultados em provetes 40x40x160 - Comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras

De forma análoga à análise efetuada no parágrafo anterior, apresenta-se abaixo representação gráfica dos resultados obtidos, separadamente por dosagem de 1% e 2% respetivamente.

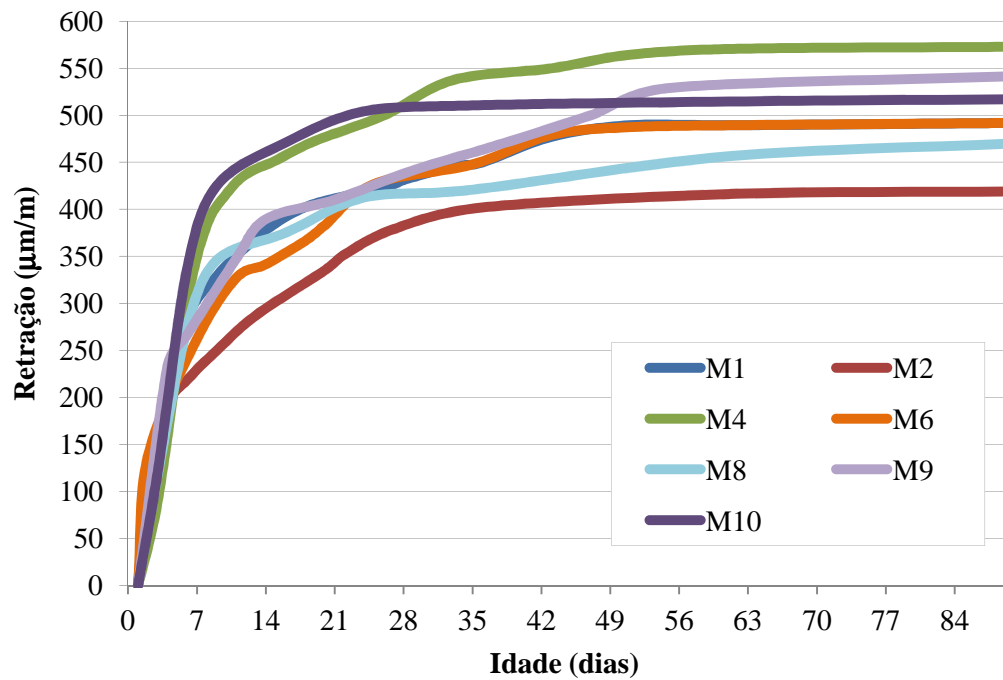


Gráfico 4.32 - Retração total para M1 e misturas com dosagem de 1% de fibras em provetes 40x40x160 mm;

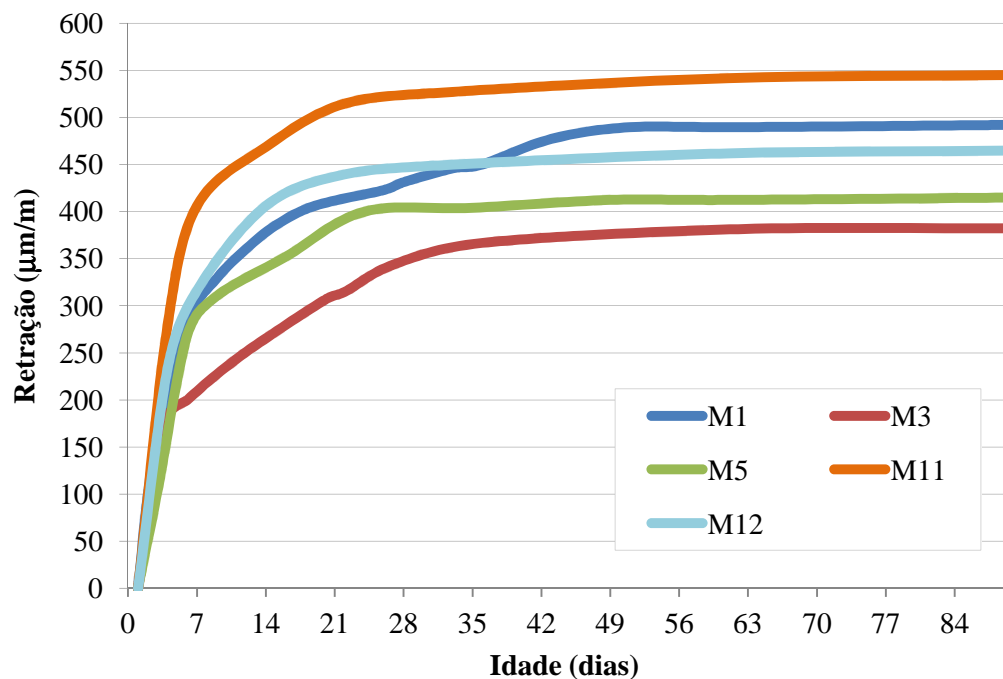


Gráfico 4.33 - Retração total para M1 e misturas com dosagem de 2% de fibras em provetes 40x40x160 mm;

Tendo em conta uma análise comparativa do desempenho das misturas com uma dosagem total de 1% de fibra, pode ser verificado no Gráfico 4.32 que as misturas com dosagem de fibra F3, sendo em mistura híbrida (M8, M9 e M10) ou dosagem simples (M6), tendem em apresentar resultados mais próximos aos verificados para a mistura de referência, sem que no entanto exista uma tendência clara de resultado que permita outras observações relacionadas com a predominância desta fibra, nas misturas híbridas mencionadas.

Já no que diz respeito ao desempenho das misturas com uma dosagem de 2 % de fibra, apresentadas no Gráfico 4.33, verifica-se claramente que as misturas híbridas (M11 e M12) tendem a aproximar-se mais do nível de resultado da mistura de referência, sendo que nas misturas simples em análise (M3 e M5), são verificados menores valores de retração quando comparados a esta.

4.3.5.3. Resultados em provetes 100x100x500

Apresenta-se abaixo representação gráfica dos resultados obtidos para retração total em provetes de 100x100x500 mm, para as misturas M1, M3, M5 e M12, correspondentes a mistura de referência e misturas com 2% de dosagem de fibra, até aos 180 dias de idade, sendo que a partir desta, os resultados apresentam estabilidade, tendo em conta a análise em questão.

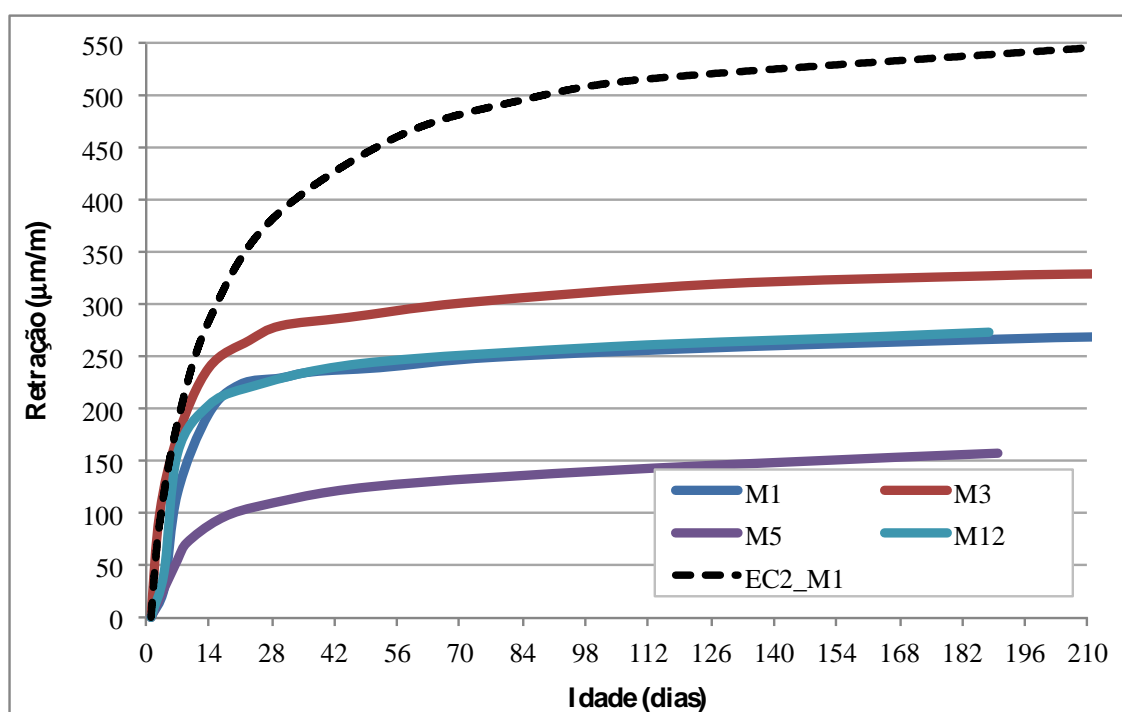


Gráfico 4.34 - Retração total para misturas M1-M3-M5-M12 e valor previsto pelo EC2 para a mistura de M1 (mistura EC2_M1) em provetes 100x100x500 mm;

Conforme apresentado no Gráfico 4.34, verifica-se que neste formato de ensaio, a retração verificada na mistura M1 é cerca de 50% menor do que o valor previsto pela referência do EC2, estando esta última identificada como EC2_M1, no referido gráfico. Verifica-se para as restantes misturas, que os valores de retração são de facto inferiores ao esperado para o EC2, numa ordem de 20% a 55% do seu valor.

Em análise mais detalhada, verifica-se que para a mistura híbrida M12, correspondente a uma dosagem de fibra de 2% em mistura híbrida de igual proporção, que o seu valor é próximo da mistura de referência M1, reforçando uma tendência verificada nos provetes de 40x40x160 mm, indicado no parágrafo anterior. Igual tendência apresenta a mistura M5, correspondente a uma dosagem de 2% de fibra F2, que, também apresenta um valor significativamente inferior de retração, sendo este cerca de 45% do valor verificado para M1.

Salienta-se no entanto o facto de que, neste ensaio, o valor de retração obtido para M3, correspondente a uma dosagem de fibra de aço F1 de 2%, ter sido superior ao valor da mistura de referência em cerca de 25% do valor desta última, resultado que contraria os resultados obtidos para os provetes de 40x40x160.

4.3.4. Coeficiente de Fluência

Para análise de resultados do coeficiente de fluência, é apresentada evolução gráfica dos respetivos resultados obtidos em ensaio com provetes de 100x100x400 mm para as misturas M1, M3, M5 e M12, correspondendo estes a uma dosagem de 2% de fibras.

Com o objetivo de podermos aferir a prestação de cada mistura em questão, é efetuada uma comparação relativamente à mistura M1 (mistura de referência), e, de forma análoga às análises anteriores, são efetuados vários tipos de exercícios comparativos sendo que neste caso, e face às misturas consideradas, pretende-se fundamentalmente a comparação entre misturas com a mesma dosagem de fibras, independente do tipo de fibras (ou mistura);

É também adicionalmente efetuada uma análise comparativa tendo em conta a previsão de valores do coeficiente de fluência, de acordo com o EC2 [48].

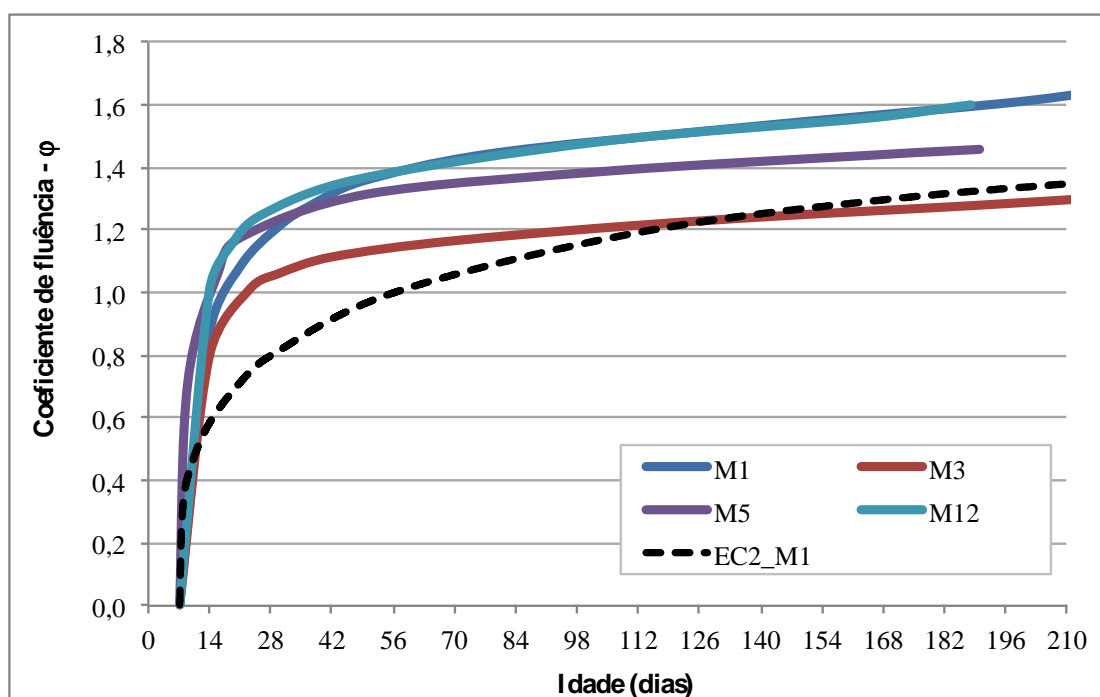


Gráfico 4.35 – Coeficiente de fluência para misturas M1-M3-M5-M12 e valor previsto pelo EC2 para a mistura de M1 (mistura EC2_M1) em provetes 100x100x500 mm;

Conforme visível no gráfico 4.35, verifica-se que o valor obtido para o coeficiente de fluência da mistura M1 (aproximadamente 1,6 após 180 dias) é cerca de 20% superior ao que o valor previsto pelo Euro-Código 2 (aproximadamente 1,35 aos 180 dias), estando esta última identificada como EC2_M1, no referido gráfico.

Verifica-se para as restantes misturas que os valores de coeficiente de fluência obtidos encontram-se balizados de forma aproximadamente igual ou superior à previsão do EC2, (na ordem de 1,3) e igual ou inferior à mistura de referência M1.

Em detalhe, verifica-se que as misturas com dosagens de fibra em proporção simples, M3 e M5, tendem a obter um resultado de coeficiente de fluência inferior à mistura de referência, com valores de aproximadamente de 1,6 e 1,45, respetivamente.

Por sua vez, a mistura híbrida, com igual proporção de fibra F2 e F3, tende a obter um perfil de resultados, com evolução muito similar à mistura de referência M1.

Tendo em conta que o carregamento para os ensaios de fluência foi efectuado aos 7 dias, era esperada uma amplitude desta ordem de grandeza, pois a maturidade do betão não é ainda muito elevada. Ainda assim, a evolução da curva de fluência experimental é mais rápida em idades jovens e tende a atenuar após 7 dias de carregamento, aos 14 dias de idade do betão,

desviando-se da forma da curva do EC2, o que resulta numa aproximação para idades mais avançadas.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Conforme indicado anteriormente, o presente estudo procura, numa perspetiva individualizada e reduzida, caracterizar a utilização e emprego de outros tipos de fibras que não metálicas na formulação de UHPC, possibilitando desta forma a minimização ou eliminação de fenómenos de perda de durabilidade deste material, nomeadamente pela oxidação das fibras metálicas empregues nas composições correntes.

Assim sendo, e conforme descrito no Capítulo III foi determinada uma metodologia de análise que possibilitasse a caracterização das propriedades macro deste material, com incorporação de dois tipos de fibra não metálica e de um tipo de fibra metálica, podendo desta forma, estabelecer relações e comparações entre o desempenho destas, quer em estado fresco, quer em estado endurecido.

Desta forma, com base nos resultados verificados em ensaio e indicados no Capítulo IV, numa análise às propriedades analisadas para o estado fresco, pode ser concluído de forma generalizada que, a incorporação de fibras não metálicas, provoca um efeito de deterioração das propriedades do UHPC em estado fresco, induzindo aumento do teor de ar e a perda de trabalhabilidade nas composições analisadas. Este efeito é mais acentuado onde se incluem fibras de vidro, misturas nas quais, para mantimento destas propriedades nos valores pretendidos, é necessário elevado ajuste de dosagem de superplastificante. Refira-se inclusivamente a exclusão de análise, das misturas M7 e M13, por terem maior dosagem destas fibras F3, onde, numa fase de caracterização inicial, foi verificada a necessidade de aplicação de elevada dosagem de superplastificante, na ordem dos 4,5% a 6% o que se considerando ainda que a sobredosagem conduz à perda de homogeneidade da matriz e à perda de desempenho desta. No que diz respeito às misturas com fibra de aço, os resultados obtidos estão de certa forma enquadrados com o expectável, apresentando bom desempenho.

No que diz respeito ao desempenho mecânico das misturas em análise, nomeadamente a nível de resistência mecânica à flexão, verificam-se resultados satisfatórios de desempenho, dos quais se pode concluir que, a mistura híbrida de fibras não metálicas em dosagem de 1%, permite uma melhoria da resistência, comparativamente à mistura de referência. Neste caso, o ganho de resistência é efetivamente superior ao verificado com este género de misturas com dosagem de 2%, o que se pode relacionar com o desempenho verificado em estado fresco. Verifica-se no entanto que para este tipo de misturas híbridas em dosagem de 1%, o aumento da proporção de fibra de vidro é prejudicial à resistência á flexão, o que indica que esta fibra é de facto útil, porem sempre em complemento com uma fibra de maior dimensão, de forma a maximizar o efeito conjunto da resistência gerada pelas mesmas. Tal facto está patente na análise de desempenho das misturas M8, M9, M10, onde se verifica uma diminuição de resistências, em ordem correspondente, tendendo a aproximar-se dos valores de resistência das misturas M4 e M6, sendo estas últimas correspondentes misturas de dosagem simples de

fibras de polipropileno e de vidro, respetivamente. As misturas M2 e M3, apresentam um bom desempenho, sendo que em M2 a expectativa de resultado fosse na ordem dos 18 MPa.

Relativamente à resistência mecânica à compressão foram verificados, de forma generalizada, resultados que se consideram aquém das expectativas, no sentido em que é visível uma perda de resistência, para as misturas com incorporação de fibras não metálicas de polipropileno e de vidro. Inclusivamente, pode ser de igual modo concluído que mesmo aumentando a dosagem deste tipo de fibra, tal não se traduz num benefício direto de aumento de resistência à compressão, ocorrendo, pelo contrário, um decréscimo de resistência com o aumento de dosagem. Salienta-se, no entanto, a obtenção de melhor desempenho das misturas híbridas, com predominância de fibra de polipropileno, nomeadamente em dosagem de 1%, o que acompanha a verificação indicada no parágrafo anterior relativamente à resistência à flexão. Conforme também mencionado, conclui-se que esta diminuição de resistências é certamente o efeito combinado da redução da compactidade e do aumento do teor de ar com a necessidade de aumento da dosagem de superplastificante. Já nas misturas com fibras de aço, este comportamento não se verifica provavelmente pela maior rigidez e capacidade de confinamento da matriz com essas fibras, sendo que nestas, os resultados obtidos, encontram-se dentro da expectativa inicial de resistência.

A análise de resistência à tração por compressão diametral permite concluir, de igual modo ao verificado na resistência à compressão, que a incorporação de fibra não metálica provoca um efeito de perda de resistência, sendo no entanto manifestado com um padrão de resultados diferente. Verifica-se que o aumento da dosagem de fibra de 1% para 2 % não beneficia o desempenho desta propriedade, no entanto pode ser concluído que existe um benefício notório para todas as misturas com predominância de fibra de vidro, relativamente aos resultados obtidos para a fibra de polipropileno. Pese embora a fibra de vidro seja dimensionalmente inferior, a dispersão desta fibra gera uma maior distribuição das tensões induzidas pelo esforço de tração, permitindo com isso obter melhor desempenho do que do que a fibra de polipropileno. Já relativamente às fibras metálicas, os resultados obtidos, não sugerem nenhuma observação pertinente, tendo estes atingido um padrão de resultados dentro do espectável. Por fim reitera-se que, estando este tipo de ensaio menos dependente das fibras não metálicas, como menor rigidez, o mesmo evidencia mais claramente a redução do desempenho mecânico da matriz com a adição dessas fibras, o que já não acontece nas misturas com adição de fibras metálicas, devido à sua rigidez elevada e capacidade de confinamento.

Relativamente ao módulo de elasticidade obtido aos 28 dias de idade, das misturas em análise, e sendo este um parâmetro fortemente influenciado pela rigidez da pasta de cimento e dos agregados, pelas ligações pasta de cimento-agregado e ainda pela compactidade do betão, conclui-se que, de facto, o reflexo dos parâmetros de trabalhabilidade verificados, influenciam fortemente os resultados obtidos, numa lógica comparativa de teor de ar ou dosagem de superplastificante vs. modulo de elasticidade. Também é verificável de uma forma

generalizada que a inclusão de uma dosagem de 2 % de fibras provoca uma diminuição de resistência para as misturas em análise, reflexo do facto de que o módulo de elasticidade aumenta ou diminui com a resistência do betão, pese embora a relação entre estas duas propriedades apresente uma dispersão elevada pelos motivos elencados.

No que diz respeito à análise de retração efetuada, conclui-se que tanto para a análise realizada em provetes de 40x40x160 mm como para os provetes de 100x100x500 mm a incorporação de fibras não metálicas em dosagem híbrida tende a aproximar os valores de retração destas ao valor da mistura de referência sem fibras. Em análise aos resultados em provetes de 40x40x160 mm, e tendo em conta a expectativa de aumento de valores de retração, reflexo do aumento generalizado da dosagem de superplastificante para dosagens de 2 % de fibra, conclui-se que, com exceção à relação entre as misturas híbridas M8 e M11, correspondentes a 1% e 2% fibra híbrida com predominância de fibra de polipropileno, o efeito de aumento de dosagem de fibra, contribui para a diminuição do efeito de retração. Já a análise dos resultados em provetes de 100x100x500 mm, permite concluir que a retração é menor para as misturas com fibras não metálicas em proporção de 2%, quando comparadas com uma mistura de referência, sendo todas, conforme espectável, menores do que o valor de cálculo preconizado pelo EC2.

Relativamente ao coeficiente de fluência conclui-se, que a inclusão de fibra metálica, diminui o valor do coeficiente de fluência. Julga-se que esta constatação ocorre fundamentalmente por três fatores, sendo estes a resistência à compressão, o efeito na superfície de aderência agregado-pasta de cimento e a dosagem de superplastificante para efeito de trabalhabilidade. No primeiro, a constatação é sublinhada pela prestação da mistura M3 que é superior à mistura de referência, com menor fluência, pela maior resistência à compressão obtida. Já relativamente ao efeito na aderência pasta-agregado pode ser minimizado e de certa forma protegido pela inclusão de fibra, o que por consequência provoca um efeito de diminuição do coeficiente de fluência. Tal é verificado pela aproximação de valores entre M5 e M12, sendo estes menores ou iguais à mistura de referência. A dosagem de superplastificante é também um fator a ter em conta, dado que o mesmo foi utilizado para aumentar a trabalhabilidade, o que por consequência poderá aumentar o coeficiente de fluência, o que neste caso, justifica também a diferenciação verificada entre M5, M12 e M3. Conclui-se de igual forma que os valores de coeficiente de fluência para as misturas com dosagem de 2% fibras não metálicas são superiores ao valor de cálculo preconizado pelo EC2.

5.2. Contribuições do desenvolvimento efetuado

Concluindo, resumidamente, pensa-se que o presente trabalho concorreu para o esclarecimento de um conjunto de ideias já formuladas por especialistas deste domínio. Salientam-se as seguintes:

- Necessidade de substituição das fibras de aço para minimização de fenômenos de oxidação;
- A influência da tipologia de fibra selecionada para o desempenho pretendido;
- A influência da fibra selecionada nas características do betão em estado fresco, nomeadamente a trabalhabilidade,
- A influência da fibra selecionada nas propriedades mecânicas e diferidas em betão endurecido;
- Relação entre propriedades em estado fresco e propriedades em estado endurecido;

5.3. Trabalhos futuros

Embora este trabalho tenha sido extenso do ponto de vista laboratorial, julga-se efetivamente que o mesmo poderia ter sido complementado com várias análises suplementares. Tais são abaixo sugeridas, como base para trabalhos de desenvolvimento futuros, de forma a complementar as conclusões que foram retiradas deste estudo, caracterizando desta forma uma alternativa fiável ao emprego de fibras metálicas em UHPC.

No que respeita à estrutura organizativa do trabalho, sugere-se uma maior subdivisão das dosagens de fibra, nomeadamente para sub-valores na ordem de 0.5% ou 0.25%, de forma a estudar detalhadamente a dosagem ótima de cada tipo fibra.

Paralelamente, considera-se ainda que seria também importante efetuar uma análise inversa onde se efetuariam os incrementos de dosagem de fibras, em escalões similares aos acima propostos, sem que se efetuasse o respetivo ajuste dos parâmetros de caracterização em estado fresco, nomeadamente pelo ajuste de superplastificante. Este exercício permitiria aferir de forma mais rigorosa, a influência da fibra em questão, em parâmetros como a retração, fluência ou mesmo resistências características, sem a interferência da eventual sobredosagem do superplastificante.

Já em termos de materiais, considera-se que seria útil uma análise aos mesmos parâmetros com uma fibra de polipropileno mais curta e mais fina, com comprimento aproximado das fibras de vidro e de aço, de forma a obter-se uma melhor comparabilidade de benefícios. Julga-se de igual forma importante a análise do emprego de outro tipo de materiais fibrosos altamente resistentes tais como aramida ou similar.

Relativamente a análises laboratoriais, consideram-se os parâmetros indicados ajustados ao estudo em questão, sendo que poderiam ser complementados em análises futuras com uma eventual análise de trabalhabilidade com V-Funnel, ou análise de fluência em condições de restrição de troca de humidade com o ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Greybeal B.A., Hartman J.L. (2003). *Ultra High-Performance Concrete – material properties*. TRB Annual meeting, Washington, USA.
- [2] Schmidt M. (2004). *Ultra High-Performance Concrete : Research, development and application*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High-Performance Concrete, Kassel University, Germany.
- [3] Greybeal B. (2006). *Material Property Characterization of Ultra High-Performance Concrete*. US Department of Transportation, USA.
- [4] JSCE (2006). *Recommendations for design and construction of UHPC structures - Draft*. Technical Publishing House, Japan.
- [5] Redaelli D. (2009). *Behavior of Ultra – High Performance Concrete with passive reinforcement*. Tese de Doutorado 4298, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland.
- [6] Devin K., Harris D., (2010). *Application of Ultra – High Performance Concrete for sustainable building elements*. US – Israel Workshop on Sustainable Buildings – Material and Energy, Israel
- [7] Cizmar, D., et. al. (2006) *Arch bridge made of reactive powder concrete*. Faculty of Civil Engeneering, Zagreb, Croatia.
- [8] Spasojevic A. (2008). *Structural Implications of Ultra – High Performance fiber reinforced concreting bridge design*. Tese de Doutorado 4051, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland.
- [9] Perry, V. H., et al. (2012). *First use of Ultra High-Performance Concrete for an inovative train stationa canopy*. PCA - Portland Cement Association, Illinois, USA.
- [10] Markovic I. (2006). *Ultra – High Performance hybrid - fiber concrete – Development and utilization*. Delft University Press, Holand.
- [11] Brameshuber W., Brockmann T., Banholzer B., (2004). *Textile reinforced Ultra – High Performance Concrete*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University, Germany.

- [12] Orgass, Marko et. al. (2004). *Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes*. Leipzig University of Applied Sciences, Leipzig, Germany
- [13] Sousa Coutinho, J. (2006). *Apontamentos de Materiais de Construção I da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Ensaio Mecânicos*. Porto
- [14] NP ENV 206 : 2003 (2003). *Betão – Comportamento, produção e critérios de conformidade*. Instituto Português da Qualidade
- [15] Sosa I. (2009). *Physical and mechanical properties of Ultra High-Performance Concrete*. Tese de Doutoramento, Technical University of Cluj, Romania.
- [16] ACI Committee 363, (1995). *State of the art Report on High Strength Concrete*, American Concrete Institute, USA.
- [17] Güvensoy, Gödze et. al. (2004). *UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading*. University of Kassel – Department of Structural Materials, Kassel, Germany
- [18] Pimienta P, Chanvillard G. (2004). *Retention of the mechanical performances of Ductal specimens kept in various aggressive environments*. FIB Symposium, Spain.
- [19] Lohaus, Ludger et. al. (2004) *Effects of polymer- and fibre modifications on the ductility, fracture properties and micro-crack development of ultrahigh performance concrete*. University of Hannover, Germany
- [20] Greybeal B. (2008). *Creep and Shrinkage of Ultra High-Performance Concrete*. ACI Materials Journal, USA.
- [21] CEB – FIP Model Code 2010 (2010). *High-Performance Concrete specifications*. Bulletin 55, FIP Publishing Company, France.
- [22] Francois T. (2002). *Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concretes – Interim Recommendations*. Technical Report AFGC, France.
- [23] DUCTAL. <http://www.ductal.com>. LafargeHolcim Group, Consultado em Janeiro de 2015.
- [24] Brebbia, C.A. (2006). *High Performance Structures and Materials*. Wessex Institute of Technology, Wessex, Reino Unido.

- [25] CIMPOR. <http://www.cimpor-portugal.pt>. CIMPOR – Cimentos de Portugal, SGPS, S.A., Lisboa. Consultado em Junho de 2012.
- [26] Lourenço, J. F. (s/d). *Formulação e produção de argamassas e betões*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- [27] NP EN 197-1:2012 (2012), *Cimento: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*.
- [28] APEB – Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto (2014). *Formação Livre – Formulação de Composições de Betões*. Manual de Formação, Portugal.
- [29] NP EN 933-1:2000 (2000), *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1 : Análise granulométrica. Método de peneiração*.
- [30] Sika Concrete Academy (2008). *Concrete Training – Level 2: Admixtures*. Sika Concrete Academy, Sika Services AG.
- [31] FUNDEC – Associação para a Formação e o Desenvolvimento em Engenharia Civil e Arquitetura (2013). *Formação Livre – Formulação de Betões Especiais*. Manual de Formação, Portugal.
- [32] EN 1008:2002 (2002), *Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recover from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete*.
- [33] Lourenço, J. (2007). *Apontamentos de Materiais de Construção II do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra*. Coimbra
- [34] Nunes, S. (2001). *Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [35] Coutinho, A. de Sousa. (2012). *Fabrico e Propriedades do Betão – Volume I*. LNEC, Lisboa.
- [36] Coutinho, A. de Sousa. (1994). *Fabrico e Propriedades do Betão – Volume III*. LNEC, Lisboa.
- [37] Azevedo, Aires. (2002). *Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Minho, Braga.

- [38] Coutinho, A. de Sousa. (2012). *Fabrico e Propriedades do Betão – Volume II*. LNEC, Lisboa.
- [39] ASTM C1611 / C1611M (2014). *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. ASTM International, USA
- [40] NP EN 12350-7:2003 (2003). *Ensaio de betão fresco - Parte 7: Determinação do teor de ar*. Instituto Português da Qualidade
- [41] NP EN 12390-2:2003 (2003). *Ensaio de betão endurecido - Parte 2: Execução e cura de provetes para ensaios de resistência mecânica*. Instituto Português da Qualidade
- [42] NP EN 12390-5:2003 (2003). *Ensaio de betão endurecido - Parte 5: Resistência à flexão de provetes*. Instituto Português da Qualidade
- [43] NP EN 12390-3:2003 (2003). *Ensaio de betão endurecido - Parte 5: Resistência à compressão de provetes de ensaio*. Instituto Português da Qualidade
- [44] NP EN 12390-6:2003 (2003). *Ensaio de betão endurecido - Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes*. Instituto Português da Qualidade
- [45] LNEC E398-1993 (1993), *Determinação da Retração e Expansão* – LNEC, Lisboa
- [46] NP EN 12390-13 (2014), *Ensaio do betão endurecido - Parte 13 : Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão*.
- [47] LNEC E399-1993 (1993), *Determinação da fluência em compressão* – LNEC, Lisboa
- [48] EN 1992-1-1. (2010). *Eurocódigo 2 : Projeto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade

ANEXOS

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 1,15 |

Mistura M1

AMASSADURA DE CONTROLO S/ FIBRAS

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m ³) | Peso kg/m ³ |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 8,94 | 9,30 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,84 | 352,38 | 923,23 |
| | | | | | | 1000,0 | 2274,5 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 1,18 |

Mistura M2

1 % FIBRA METALICA (F1)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m ³) | Peso kg/m ³ |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 9,17 | 9,54 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 1,0 | - | 10,00 | 78,50 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,82 | 342,18 | 896,50 |
| | | | | | | 1000,0 | 2326,5 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 1,20 |

Mistura M3

2 % FIBRA METALICA (F1)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m ³) | Peso kg/m ³ |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 9,33 | 9,70 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 2,0 | - | 20,00 | 157,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,79 | 332,02 | 869,88 |
| | | | | | | 1000,0 | 2378,6 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 1,15 |

Mistura M4

1 % FIBRA PP/PE (F2)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m3) | Peso kg/m3 |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|----------------|---------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 8,94 | 9,30 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 1,0 | - | 10,00 | 9,20 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,82 | 342,39 | 897,05 |
| | | | | | | 1000,0 | 2257,5 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 1,30 |

Mistura M5

2 % FIBRA PP/PE (F2)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m3) | Peso kg/m3 |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|----------------|---------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 10,11 | 10,51 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 2,0 | - | 20,00 | 18,40 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,79 | 331,18 | 867,68 |
| | | | | | | 1000,0 | 2238,6 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 2,30 |

Mistura M6

1 % FIBRA GF (F3)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m3) | Peso kg/m3 |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|----------------|---------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 17,88 | 18,60 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 1,0 | - | 10,00 | 26,80 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,79 | 333,40 | 873,51 |
| | | | | | | 1000,0 | 2260,9 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 2,20 |

Mistura M8

2/3 % FIBRA PP/PE (F2) + 1/3 % FIBRA GF (F3)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m3) | Peso kg/m3 |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|----------------|---------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 17,10 | 17,79 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 0,7 | - | 6,67 | 6,13 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,3 | - | 3,33 | 8,93 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,80 | 334,20 | 875,60 |
| | | | | | | 1000,0 | 2250,5 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 2,30 |

Mistura M9

1/2 % FIBRA PP/PE (F2) + 1/2 % FIBRA GF (F3)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m3) | Peso kg/m3 |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|----------------|---------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 17,88 | 18,60 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 0,5 | - | 5,00 | 4,60 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,5 | - | 5,00 | 13,40 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,79 | 333,40 | 873,51 |
| | | | | | | 1000,0 | 2252,1 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 2,40 |

Mistura M10

1/3 % FIBRA PP/PE (F2) + 2/3 % FIBRA GF (F3)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m3) | Peso kg/m3 |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|----------------|---------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 18,66 | 19,40 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 0,3 | - | 3,33 | 3,07 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,7 | - | 6,67 | 17,87 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,79 | 332,65 | 871,53 |
| | | | | | | 1000,0 | 2253,9 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 3,00 |

Mistura M11

4/3 % FIBRA PP/PE (F2) + 2/3 % FIBRA GF (F3)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m3) | Peso kg/m3 |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|----------------|---------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 23,32 | 24,26 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 1,3 | - | 13,33 | 12,27 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 0,7 | - | 6,67 | 17,87 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,76 | 317,95 | 833,03 |
| | | | | | | 1000,0 | 2229,4 |

| Dosagem de Ligante (kg/m ³) | Relação A/C | Relação A/L | Dosagem de Superplastif. (% x CEM) |
|---|-------------|-------------|------------------------------------|
| 1100 | 0,30 | 0,22 | 3,20 |

Mistura M12

1 % FIBRA PP/PE (F2) + 1 % FIBRA GF (F3)

| Constituintes | Denominação | Tipo | M. Vol. kg/dm ³ | % Vol | Massa / Ligante | Volume (lt/m3) | Peso kg/m3 |
|---------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|-----------------|----------------|---------------|
| Cimento | CEM | CEM II AVL 52,5N | 3,02 | - | 0,74 | 267,72 | 808,50 |
| Adições | SF | Mapeplast SF | 2,20 | - | 0,07 | 32,50 | 71,50 |
| | FC | Filler Cálcareo | 2,70 | - | 0,20 | 81,48 | 220,00 |
| Água | A | | 1,00 | - | - | 242,00 | 242,00 |
| Pasta | Superplastif. | SP | 1,04 | - | - | 24,88 | 25,87 |
| | Ar | Ar | - | 1,5 | - | 15,00 | 0,00 |
| Fibras | F1 | 0,20/13 mm (Aço) | 7,85 | 0,0 | - | 0,00 | 0,00 |
| | F2 | S25 - 25 mm (PP/PE) | 0,92 | 1,0 | - | 10,00 | 9,20 |
| | F3 | Cem-Fil 60-12 mm (GF) | 2,68 | 1,0 | - | 10,00 | 26,80 |
| Agregados | Agregado 1 | AG1 | 2,62 | | 0,75 | 316,44 | 829,07 |
| | | | | | | 1000,0 | 2232,9 |