

UTILIZAÇÃO DE CPF – COFRAGEM DE PERMEABILIDADE CONTROLADA EM BETÕES COM FIBRAS

GUSTAVO HENRIQUE FERREIRA SOARES DA SILVA OLIVEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientadora: Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de
Sousa Coutinho

FEVEREIRO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais

*“A ambição da ciência não é
abrir a porta do saber infinito,
mas pôr um limite ao erro
infinito”*

Brecht, Bertold

AGRADECIMENTOS

Pretendo neste espaço expressar a minha gratidão a todas as pessoas e entidades que contribuíram directa ou indirectamente para a realização deste trabalho. Desejo naturalmente fazer referências no âmbito académico e profissional mas também no plano pessoal a todos aqueles que estão intimamente ligados a mim na minha vida privada.

Um primeiro agradecimento à Professora Doutora Joana Sousa Coutinho por toda a experiência passada, pelos conhecimentos transmitidos e pela motivação e apoio sempre contínuos. Será sempre alguém que vou guardar como Professora de excelência e como modelo de ser humano.

Desejo expressar um agradecimento também a todo o departamento de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia do Porto, desde o pessoal técnico do seu laboratório e que tanto colaboraram nesta tese como é o caso da Patrícia, da Paula, do Manuel e do Fernando, passando naturalmente por todos os Professores cujos ensinamentos se revelaram essenciais neste trabalho, e sobretudo a D. Maria Teresa por todo o empenho e ajuda que sempre prestou a todos os alunos de seu departamento.

Um agradecimento especial à empresa LUCIO's por ter permitido iniciar a minha actividade profissional em paralelo com a realização deste trabalho contribuindo assim, do contacto com o mercado de trabalho, para uma visão mais ampla do mundo da Engenharia civil. Este agradecimento estende-se naturalmente ao plano pessoal e sentimental, para com os administradores da empresa, Filipe Azevedo e Nuno Azevedo, meus primos e que fazem parte do conceito mais restrito de família directa que sempre me acompanhou em todas as etapas da minha vida.

Mantendo o tema de agradecimentos académicos que são ao mesmo tempo do âmbito sentimental quero demonstrar toda a minha gratidão com os meus amigos da FEUP, Alvarim Almeida, Gabriel Santos, Lorena Cambuí, Nuno Ferreira, Pedro Sena e Ricardo Afonso, por toda a ajuda técnica dada mas sobretudo pelos momentos passados juntos. Partilhamos angustias, tristezas, alegrias, vitórias...Fomos uma verdadeira equipa. O meu muito obrigado a todos vós e um brinde a nós.

Aos meus amigos exteriores quero agradecer-vos o simples facto de serem meus amigos. É um privilégio para mim. Sem querer ferir susceptibilidades, não posso deixar de referir os meus amigos de “infância” que tanto me têm feito feliz. O meu muito obrigado Pedro Azevedo, Daniel Machado, Rita Lopes da Silva, Joana Lopes da Silva e Diana Carneiro. A todos os outros agradeço também do fundo meu coração por cada momento vivido.

A toda a minha família, quero dedicar um agradecimento eterno por tudo que me têm dado. Mais uma vez não posso deixar de nomear certas pessoas e recuperando o conceito de família directa atrás já referido aproveito para englobar também aqui o meu tio Fernando Oliveira, a minha tia Natália Oliveira, a minha tia Isaura Soares a minha prima Rita Oliveira e agora duas pessoas muito especiais para mim: O meu primo Bruno Oliveira a quem aproveito para mandar um abraço muito especial nesta fase também especial da sua vida, e a minha bisavó Isaura mandando-lhe um beijo eterno. O seu “Tadinho” nunca a vai esquecer.

À minha irmã Ana Teresa, porque é uma pessoa que eu amo muito, e que me acompanhou ao longo de toda a vida, quantas vezes deixando o papel de irmã mais velha e assumindo o papel de mãe mais nova. Também á minha irmã e ao meu cunhado Duarte Senra o meu muito obrigado pelo interesse e apoio nesta fase da minha vida mas sobretudo por me terem presenteado com os sobrinhos mais lindos do mundo. Francisco e Joana O “tiudu” adora-vos.

À minha namorada Vânia Vilas-Boas, por ser a mulher mais linda do mundo e a melhor companheira que alguém pode ter. És grande parte da minha motivação e inspiração. É sem dúvida uma sorte infinita ter-te sempre a meu lado. Amo-te muito

Aos meus Pais, António Oliveira e Maria Helena Oliveira o meu agradecimento por toda a minha vida. Por tudo, no sentido mais global que a palavra tudo possa ter. Obrigado por terem acreditado em mim e acima de tudo por me terem feito acreditar. Espero que um dia os meus filhos possam dizer que tiveram uns pais como os que eu tive. Tenho um orgulho infinito em vocês.

Só tenho pena que ainda não seja possível ensaiar sentimentos no laboratório, porque sinceramente não encontro prova científica mais evidente e concreta que o meu amor por todos vós. Um agradecimento de um trabalho, um agradecimento de uma vida. Muito obrigado, por terem através das minhas mãos, realizado este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objectivo, o estudo da eficiência do uso de cofragem de permeabilidade controlada (CPF) em betões com fibras.

Nos últimos anos, muitas têm sido as discussões sobre o comportamento do ser humano face ao meio ambiente em que está inserido. Por ser um sector importantíssimo na sociedade, a indústria da construção civil tem tentado adaptar-se aos novos conceitos de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável. É essencial aferir através de estudos, que novas práticas devem ser tomadas no sentido de garantir a harmonia entre esta actividade e o planeta Terra.

Devido ao alto índice de industrialização, da maioria dos países desenvolvidos, têm-se verificado nos últimos anos consequências catastróficas na Natureza. Um dos problemas identificados, está relacionado com a emissão de dióxido de carbono para atmosfera e consequente efeito estufa. Sendo, a indústria do cimento responsável por cerca de 5% do total de CO₂ emitido, é urgente diminuir a sua produção. Esta redução pode ser assegurada, caso se comece a substituir parcialmente o cimento por resíduos provenientes de outra indústrias ou ainda, se se garantir parâmetros de durabilidade melhorados nas estruturas, fazendo-as durar mais tempo obrigando assim a um menor número de reparações e adiando no tempo a sua necessidade de demolição

Uma solução técnica que se tem mostrado eficaz no aumento da durabilidade das estruturas de betão armado é sem duvida o CPF. Ao conferir características de maior resistência aos agentes agressivos a um betão, este tipo de cofragem garante-lhe uma vida útil superior.

Neste trabalho pretende-se analisar as melhorias nos parâmetros de durabilidade que o CPF incute em betões com fibras. Para isso foram obtidos vários provetes de betão contemplando duas soluções de cofragem distintas, cofragem com CPF e cofragem tradicional.

Com os provetes de betão foi possível realizar ensaios de resistência mecânica, e de avaliação da durabilidade através de ensaios como a penetração de água sob pressão, absorção de água por capilaridade, penetração acelerada por cloretos, resistividade eléctrica e carbonatação acelerada.

A análise dos resultados indicaram que o uso de CPF melhora significativamente os betões que contemplam fibras na sua estrutura. Assim sendo é positivo o contributo desta solução para a sustentabilidade na construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade, betão, durabilidade, CPF, fibras,

ABSTRACT

The main goal of this work is the study of the efficiency of the usage of controlled permeability formwork (CPF), in concretes with fibers.

In the last years, there have been many discussion about the human being behavior in relation to it's environment. By being an extremely important area in the society, the civil construction industry has been trying to adapt to the new concepts of sustainability and sustainable development. It is essencial to gauge through research, which new procedures must be carried out, in order to assure the harmony between this activity and the planet Earth.

Due to the high rate of industrialization of the majority of the developed countries, there have being taken place catastrophic consequences in the Nature. One of the identified problems is related with the carbon dioxide emission for the atmosphere and the resulting greenhouse effect. Being the cement industry responsible for about 5% of the whole emitted CO₂, it is urgent to reduce its production. This reduction can be assured, by partially substituting the cement by wastes coming from other industries or even, by guaranteeing improved durability parameters in structures, making them last for much longer, obliging to a lower number of repairing and delaying the need of their demolition.

One technical solution, proved to be effective on improving the reinforced concrete structures is without a doubt the CPF. By conferring a concrete higher resistance to the aggressive agents, this kind of formwork assures a higher lifespan.

This project seeks to analyse the improvement that CPF instils to Concretes with fiber. For that, it was necessarily to obtain several test samples covering two different types of formwork: Controlled permeability formwork and traditional formwork

With test samples it was possible to perform tests of mechanical resilience and durability to evaluate the behaviour of each concrete.

The results analysis indicated that the use of CPF improves significantly the concretes with fiber. So it is positive the contribute of this solution to sustainability in civil construction area.

PALAVRAS-CHAVE: Sustainability, concrete, durability, CPF, fibers,

Utilização de CPF – Cofragem de Permeabilidade controlada em betões com fibras

Índice Geral

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. BREVE NOTA HISTÓRICA DO BETÃO.....	2
1.3. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	3
1.4. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	4
2 ESTADO DA ARTE.....	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. DURABILIDADE	7
2.2.3 <i>Corrosão das armaduras</i>	15
2.3. CPF – COFRAGEM DE PERMEABILIDADE CONTROLADA	17
2.3.1 <i>Breve nota introdutória</i>	17
2.3.2 <i>Tipos de CPF</i>	19
2.3.3 <i>Funcionamento do CPF</i>	20
2.3.4 <i>Vantagens e desvantagens do CPF</i>	22
2.4. BETÃO COM FIBRAS.....	23
2.4.1 <i>Generalidades</i>	23
2.4.2 <i>Aplicação do betão com fibras</i>	24
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	29
3.1. INTRODUÇÃO	29
3.2. METODOLOGIA DOS TRABALHOS	30
3.2.1. <i>Introdução</i>	30
3.2.1. <i>Descrição do método</i>	31
3.2.1.1 <i>Fibras metálicas</i>	31
3.2.1.2 <i>Fibras sintéticas</i>	31
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	33
3.3.3. <i>microscópio electrónico de varrimento (M.E.V.)</i>	34
3.4. ENSAIOS.....	36
3.4.1. <i>Introdução</i>	36
3.4.2. <i>Ensaio de trabalhabilidade</i>	37
3.4.2.1 “Slump test”	37
3.4.3. <i>Ensaio de resistências mecânicas</i>	39
3.4.3.1 <i>Resistência superficial</i>	39
3.4.3.2 <i>Resistência à compressão</i>	41
3.4.3.3 <i>Resistência à flexão</i>	42
3.4.4. <i>Ensaio de durabilidade</i>	44
3.4.4.1 <i>Carbonatação Acelerada</i>	44
3.4.4.2 <i>Cloretos</i>	46

3.4.4.3 Resistividade.....	48
3.4.4.4 Penetração de água sob pressão	49
3.4.4.5 Absorção.....	51
4 CONCLUSÕES	57
4.1. INTRODUÇÃO	57
4.2. BETÕES COM CPF VS BETÕES SEM CPF	58
4.2.1. Resistência Superficial.....	59
4.2.2 Carbonatação	60
4.2.3. Penetração de Cloretos	61
4.2.4. Resistividade	62
4.2.5. Penetração de água sob pressão	63
4.2.6. Absorção de água por capilaridade	64
4.3. BETÕES COM FIBRAS VS BETÕES DE CONTROLO	65
4.4. BETÕES COM FIBRAS F VS BETÕES COM FIBRAS D	70
4.5. QUADRO RESUMO – EFEITO DO CPF EM BETÕES COM FIBRAS	71
4.6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	71
BIBLIOGRAFIA	73
ANEXOS	75

Índice de figuras

<i>Figura 1. – Obras antigas onde foram utilizados materiais compósitos a) Panteão de Roma. b) Aqueduto da Pont du Gard</i>	2
<i>Figura 2. – Um barco reconhecido como primeira obra de betão armado</i>	3
<i>Figura 3. – Gráfico indicador das percentagens de CO₂ emitidas por actividade</i>	5
<i>Figura 4. – Gráfico que relaciona a vida útil com o grau de deterioração das estruturas</i>	5
<i>Figura 5- Esquema da rede porosa de um betão (Neville, 1995)</i>	9
<i>Figura 6 – Sintomas de degradação do betão. a) Destacamento. b) fendilhação c) eflorescencias</i>	10
<i>Figura 7 – Esquema do fenómeno de carbonatação (Masy, 1996)</i>	11
<i>Figura 8 – Processo de deterioração provocado pela presença de sulfatos no betão</i>	13
<i>Figura 9 - Processo de deterioração provocado pela reacção álcalis-agregado</i>	14
<i>Figura 10 – Produtos expansivos resultantes da corrosão</i>	16
<i>Figura 11 – Corrosão das armaduras e respectivo esquema</i>	17
<i>Figura 12 – Várias obras onde foram aplicados CPF. a) Viaduto b) Reservatório de água c) Elemento de uma ETAR (Aveiro) em que foi utilizado CPF numa obra executada por um consórcio com a Teixeira Duarte</i>	19
<i>Figura 13 – Cofragem de permeabilidade controlada do tipo III</i>	20
<i>Figura 14 – a) Parede betonada com CPF b) Esquema de funcionamento do CPF</i>	20
<i>Figura 15 – Diferenças de superfície entre dois betões cofrados com cofragem tradicional e com CPF respectivamente</i>	21
<i>Figura 16 – Vários tipos de fibras</i>	23
<i>Figura 17 – a) Betão com fibras aplicado num pavimento b) Betão com fibras aplicado num túnel</i>	25
<i>Figura 18 – Processos de absorção de energia pelas fibras</i>	26
<i>Figura 19 – a) Tipos de fibras comercializados b) fibras Dramix usadas no presente ensaio</i>	28
<i>Figura 20 – Esquema de fibra sintética</i>	28
<i>Figura 21 – Provetes de betão com fibras</i>	31
<i>Figura 22 – a) Parede betonada b) esquema de parede betonada</i>	32
<i>Figura 23 – Esquema de parede betonada com fibras sintéticas</i>	32
<i>Figura 24 – Esquema de carotes e provetes serrados por cada meia parede.</i>	33
<i>Figura 25 – a) Amostra da superfície do betão cofrado com CPF visto no microscópio electrónico b) Amostra da superfície do betão cofrado tradicionalmente visto no microscópio electrónico</i>	35
<i>Figura 26 – a) Amostra da superfície do betão com fibras metálicas visto no microscópio electrónico b) Amostra da superfície do betão com fibras sintéticas visto no microscópio electrónico</i>	35
<i>Figura 27 – Amostra do conjunto de provetes ensaiados durante a realização deste projecto</i>	36
<i>Figura 28 – Ensaio de “slump test” e respectivo esquema</i>	38
<i>Figura 29 – Esclerómetro de Schmidt</i>	39
<i>Figura 30 – Esquema de ensaio - Esclerómetro de Schmidt</i>	40
<i>Figura 31 – a) Prensa mecânica do LEMC b) Esquema de ensaio de compressão</i>	41
<i>Figura 32 – Ensaio a flexão de um provete com fibras metálicas b) Esquema de ensaio à flexão</i>	43
<i>Figura 33 – a) Câmara de carbonatação b) Provetes na câmara de carbonatação</i>	44
<i>Figura 34- Provetes pulverizados com fenoftaleína e esquema de leitura da profundidade de carbonatação</i>	45
<i>Figura 35 – a) Proвете de ensaio aos cloretos b) Equipamento de saturação por vácuo</i>	46
<i>Figura 36 – a) Células acrílicas do ensaio aos cloretos b) Equipamento de registo de resultados</i>	46

Figura 37 – Provetes ensaiados e respectivo esquema de ensaio _____	47
Figura 38 – Provetes ensaiados á penetração de água sob pressão _____	50
Figura 39 – a) Estufa do LABEST b) Imagem dos provetes ensaiados _____	51
Figura 40 – a) Caixas consideradas para o ensaio de penetração de água sob pressão b) Indicação dos 5mm de lâmina de água em contacto com o betão _____	52
Figura 41 - Gráfico relativo ao coeficiente de absorção dos betões com fibras D _____	54
Figura 42 - Gráfico relativo ao coeficiente de absorção dos betões com fibras F _____	55
Figura 43 - Gráfico relativo ao coeficiente de absorção dos betões com fibras M _____	56
Figura 44. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF em resistência superficial _____	59
Figura 45. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na carbonatação _____	60
Figura 46. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na penetração aos cloretos _____	61
Figura 47. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na resistividade _____	62
Figura 48. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na penetração de água sob pressão	63
Figura 49. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na absorção de água por capilaridade _____	64
Figura 50. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com fibras em relação aos betões de controlo	65
Figura 51. a)– Gráfico relativo ao ensaio de tracção de um betão de controlo b) Gráfico relativo ao ensaio de tracção de um betão com fibras metálicas _____	66
Figura 52 – Comparação de desempenho entre betão com fibras M e o betão de controlo _____	67
Figura 53 – Comparação de desempenho entre betão com fibras F e o betão de controlo _____	68
Figura 54 – Comparação de desempenho entre betão com fibras D e o betão de controlo _____	69
Figura 55– Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras D com betão com fibras F_	70
Figura 56 – Conclusões – Grafico do quadro resumo de desempenhos dos betões com CPF _____	71

Índice de quadros

<i>Quadro 1 – Teor Crítico de cloretos</i>	<i>12</i>
<i>Quadro 2 – Grupos de betão estudados</i>	<i>30</i>
<i>Quadro 3 – Composição dos betões estudados</i>	<i>34</i>
<i>Quadro 4 – Abreviações dos provetes</i>	<i>37</i>
<i>Quadro 5 – Resultado ensaio de abaixamento</i>	<i>38</i>
<i>Quadro 6 – Resultado ensaio de resistência superficial</i>	<i>40</i>
<i>Quadro 7 – Resultado ensaio de resistência à compressão</i>	<i>42</i>
<i>Quadro 8 – Resultado ensaio de resistência à flexão</i>	<i>44</i>
<i>Quadro 9 – Resultado ensaio de carbonatação</i>	<i>45</i>
<i>Quadro 10 – Resultado ensaio de cloretos - DNS</i>	<i>48</i>
<i>Quadro 11 – Resultado ensaio de cloretos - Resistividade</i>	<i>49</i>
<i>Quadro 12 – Resultado ensaio de penetração de água sob pressão</i>	<i>50</i>
<i>Quadro 13 – Resultado ensaio de absorção de água por capilaridade</i>	<i>53</i>
<i>Quadro 14 – Conclusões “test slump”</i>	<i>58</i>
<i>Quadro 15 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF em Resistência superficial</i>	<i>59</i>
<i>Quadro 16 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na carbonatação</i>	<i>60</i>
<i>Quadro 17 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na penetração aos cloretos</i>	<i>61</i>
<i>Quadro 18 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na resistividade</i>	<i>62</i>
<i>Quadro 19 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na penetração de água sob pressão</i>	<i>63</i>
<i>Quadro 20 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na absorção de água por capilaridade</i>	<i>64</i>
<i>Quadro 21 – Conclusões – Comparação resultados resistências betão com fibras - betão controlo</i>	<i>65</i>
<i>Quadro 22 – Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras M com betão de controlo</i>	<i>67</i>
<i>Quadro 23 – Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras F com betão de controlo</i>	<i>68</i>
<i>Quadro 24 – Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras D com betão de controlo</i>	<i>69</i>
<i>Quadro 25 – Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras D com betão com fibras F70</i>	<i>70</i>
<i>Quadro 26 – Conclusões – Quadro resumo de desempenhos dos betões com CPF</i>	<i>71</i>

Utilização de CPF – Cofragem de Permeabilidade controlada em betões com fibras

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

CEMUP – Centro de Materiais da Universidade do Porto

MEV – Microscópio Electrónico de Varrimento

CPF – Cofragem de Permeabilidade Controlada

BRF – Betão Reforçado com Fibras

Utilização de CPF – Cofragem de Permeabilidade controlada em betões com fibras

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente trabalho tem como objectivo geral, o estudo dos parâmetros de durabilidade dos betões com fibras com o uso de novas técnicas de cofragem (CPF). É um projecto que se enquadra numa filosofia de consciência global de que os materiais usados na construção civil, são recursos cujo uso devemos otimizar de forma a garantir o equilíbrio da nossa sociedade enquanto ecossistema natural. Ao longo deste projecto estão referidos todos os pressupostos teóricos e práticos nos quais assentou o estudo realizado.

No sentido de tornar mais clara a leitura do trabalho, enuncia-se desde já o modo como está estruturado acompanhando cada capítulo de uma breve descrição.

O Capítulo 1 – Introdução, onde se pretende contextualizar a ideologia deste estudo com a necessidade de respostas concretas e devidamente documentadas daquele que é largamente o material mais usado na construção civil – o betão. É neste capítulo que se faz referência inicialmente à história da evolução deste tipo de materiais compósitos, seguido do conceito actual de desenvolvimento sustentável.

No Capítulo 2 – Estado da arte, são descritos com especificidade os pontos principais: a durabilidade, o CPF e o betão com fibras. Em resumo, pode-se dizer que é neste capítulo que estão explanados os conceitos teóricos que permitem o entendimento do conjunto de ensaios descrito no capítulo que se segue.

O Capítulo 3 – Programa experimental, descreve todos os ensaios levados a cabo na realização do presente projecto, assim como são apresentados os métodos seguidos e ainda todos os resultados obtidos. Estes valores são a base do conteúdo do capítulo 4.

É precisamente no Capítulo 4 – Conclusões, que se podem tirar as ilações dos resultados determinados através do programa experimental e assim confrontar com todos os pressupostos teóricos que servem de base ao estudo. Como se perceberá mais à frente, este trabalho permite diferentes comparações devido à diversidade de soluções técnicas diferentes de betões apresentados. São ainda apresentados neste capítulo sugestões para estudos futuros que visem a continuação e o aperfeiçoamento do projecto realizado.

1.2. BREVE NOTA HISTÓRICA DO BETÃO

O betão e as argamassas são utilizadas como materiais de construção há milhares de anos, sendo então produzidos através da mistura de argila ou argila margosa, areia, cascalho e água. Existem registos históricos que documentam o aparecimento destes materiais compósitos alguns milhares de anos A.C., como é exemplo um pavimento de betão datado de 5600 A.C. em Lepenskiivin (Stanley, 1982).

Nas antigas civilizações, estes materiais eram utilizados sobretudo em pavimentos, paredes e fundações. Os romanos, por exemplo, exploraram eficazmente este recurso em variadíssimas obras tais como casas, templos, pontes e aquedutos. O Panteão de Roma e o aqueduto da Pont du Gard em Nimes, ilustrados na Figura 1, é uma prova actual da elevada capacidade de construção da civilização Romana.



Figura 1. – Obras antigas onde foram utilizados materiais compósitos a) Panteão de Roma. b) Aqueduto da Pont du Gard

Está também documentada a tentativa dos Romanos em armar betão, através do uso de cabos de bronze, experiência que não teve sucesso devido aos diferentes coeficientes térmicos de dilatação térmica destes dois materiais (Quintela, 1989).

A partir deste momento e até ao século XVIII, o betão é visto como um material sem características estruturais e é usado apenas em fundações e como revestimento de paredes de alvenarias. São um conjunto de estudos começados nos meados deste século mais precisamente em 1758 por Smeanton, das características do cimento, que impulsionam o grande desenvolvimento na aplicação de betão nas construções. O contributo de James Parker (1776) e Louis Vicat (1818), originam finalmente o patentear do cimento Portland.

A produção a larga escala do cimento, torna-se no final do século XIX uma realidade, devido ao aparecimento dos fornos rotativos, que reduziram significativamente os preços finais do produto. Em Portugal a indústria do cimento tem o seu início em 1894 com a fábrica de cimento Tejo em Alhandra.

A título de curiosidade, enuncia-se que apesar de existirem referencias a betão armado desde o ano 1830, um barco realizado em ferrocimento pelo francês Jean Louis Lambot de 1848 é reconhecido como a obra mais antiga em betão armado. A Figura 2 retrata o pequeno barco que está preservado até aos dias de hoje.

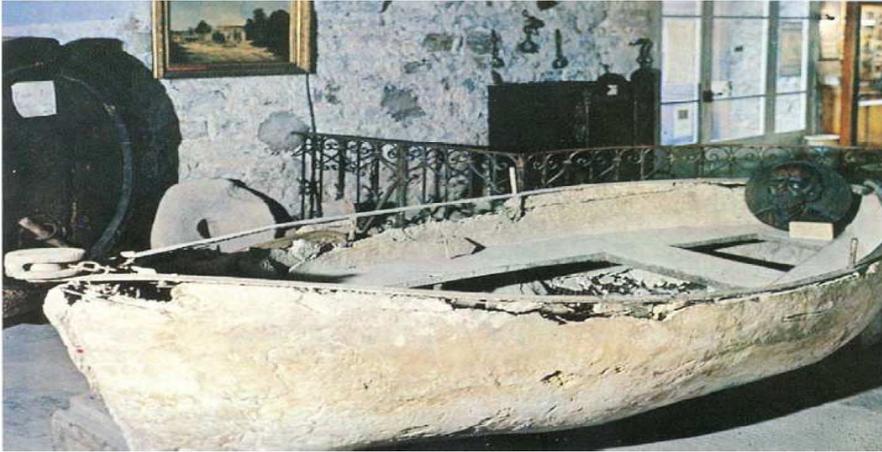


Figura 2. – Um barco reconhecido como primeira obra de betão armado.

No início do século XX O betão armado assume um papel fundamental no desenvolvimento da construção civil, dando assim origem à realização de variadíssimas patentes onde se indicam as bases de cálculo e as disposições construtivas adoptadas para os diversos elementos estruturais.

Estes novos documentos que regem o uso do betão armado na indústria da construção civil visam sobretudo as suas características de resistências mecânicas. É já no final do século XX que um novo conceito denominado “desenvolvimento sustentável”, incentiva a realização de estudos relativos aos parâmetros de durabilidade do betão.

1.3. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Os conceitos de “sustentabilidade” e de “desenvolvimento sustentável” são ideias recentes, que começam a vulgarizar-se em documentos e estudos sobre desenvolvimento regional e urbano, bem como em questões económicas e ambientais. No entanto, é de referir que não existe um conteúdo formalizado consensual junto da comunidade científica.

A expressão “sustentabilidade” terá aparecido pela primeira vez em 1980, num relatório da International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), World Conservation Strategy. Neste documento era sugerido este conceito como uma aproximação estratégica à integração da conservação e do desenvolvimento coerente com os objectivos de manutenção do ecossistema, preservação da diversidade genética e utilização sustentável dos recursos.

O conceito de desenvolvimento sustentável só mais tarde foi consagrado no relatório "O Nosso Futuro Comum", publicado em 1987 pela World Commission on Environment and Development, uma comissão das Nações Unidas, chefiada pela então primeira-ministra da Noruega, a Sr.^a Gro Harlem Brundtland. (Civitas, 2008).

Este documento viria a ficar conhecido como o relatório de brundtland e definia desenvolvimento sustentável como o "(...) *desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações vindouras satisfazerem as suas próprias necessidades*".

A noção de desenvolvimento sustentável tem implícito um compromisso de solidariedade com as gerações do futuro, no sentido de assegurar a transmissão do património natural capaz de satisfazer as suas necessidades. Tudo isto implica um esforço no sentido da integração equilibrada dos sistemas económico, sócio-cultural e ambiental, e dos aspectos institucionais relacionados com o conceito muito actual de boa “governança”.

1.4. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A noção de desenvolvimento sustentável é naturalmente transportada para a indústria da construção civil, pelo impacto económico, social e ambiental que esta actividade tem associado à sua natureza.

Em Portugal, o sector da construção consome fatias importantíssimas dos recursos humanos e financeiros disponíveis. Mobilizando em permanência cerca de 600 000 activos, a construção é a principal empregadora a seguir ao Estado. Absorvendo anualmente cerca de 25 000 milhões de Euros, a construção constitui a principal parcela da formação bruta de capital fixo do país. O contributo da construção para o PIB é, no entanto, relativamente pequeno, da ordem de 7% apenas (Cóias, 2005).

O peso que a construção tem tido em Portugal é insustentável. No documento “Estratégia Nacional para o Desenvolvimento Sustentável, ENDS 2002, reconhece-se que, na década de 90, “a área construída aumentou significativamente sendo uma das mais elevadas da Europa, quer em termos de percentagem do território, quer em área construída per capita”(Cóias, 2005).

Torna-se necessário conseguir um sábio equilíbrio entre dois objectivos fundamentais: por um lado, dispor de uma infra-estrutura para suportar padrões de vida aceitáveis e, por outro lado, proteger o meio ambiente e aproveitar racionalmente todos os recursos.

É exactamente nesta segunda condição de compromisso com o meio ambiente que incide a ideia geral deste projecto. Na realidade a indústria das construção civil é responsável por um impacto negativo ao nível ambiental que se tem tornado uma preocupação real para todas as partes envolvidas nesta actividade.

Como se pode ver através da Figura 3 a indústria cimentícia é responsável por cerca de 5% das emissões de dióxido carbono em todo o mundo. Podemos ainda constatar nesta figura os Países que mais contribuem para as emissões de dióxido de carbono, promovendo assim o efeito de estufa no nosso planeta.

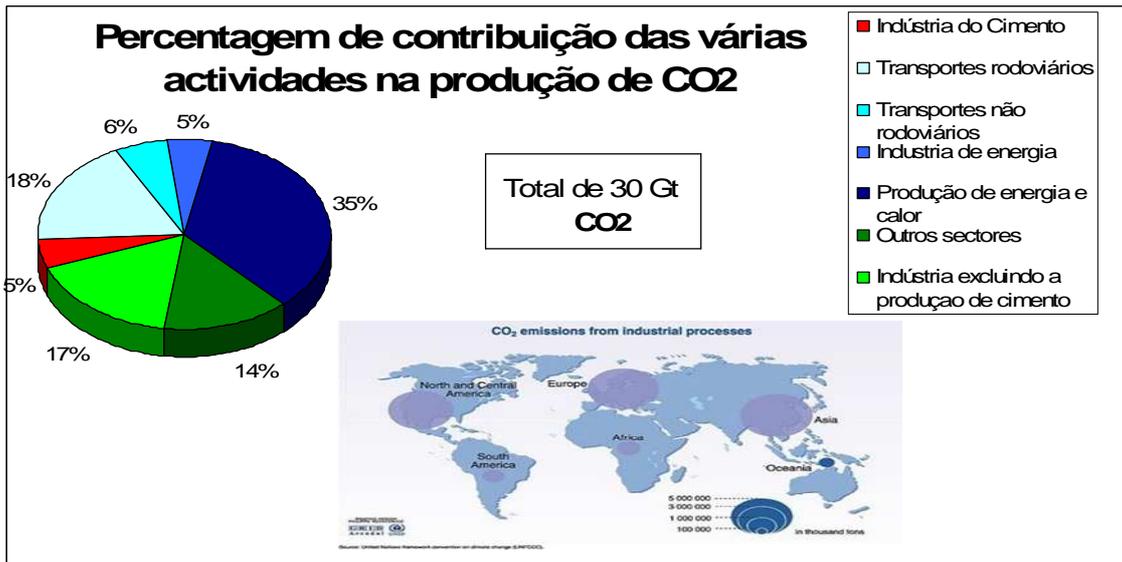


Figura 3. – Gráfico indicador das percentagens de CO₂ emitidas por actividade

Assim, e perante este cenário, torna-se essencial a adopção de medidas de prevenção que garantam a redução das emissões de CO₂ a nível mundial.

Existem caminhos distintos com o objectivo de garantir a sustentabilidade na construção civil. Uma primeira forma de intervenção será a reciclagem de resíduos provenientes de outras indústrias ou mesmo da indústria de construção e incorporar esses materiais desde que apropriados, em betões como substituto parcial do cimento usado na sua composição. Desta forma estaremos a garantir uma menor produção de cimento e conseqüentemente uma redução na emissão de CO₂ na atmosfera como se pode ver na Figura 3. Um outro modo de actuação será a de afectar os materiais de construção de forma a aumentar a durabilidade das estruturas. Uma destas tecnologias é o uso da cofragem de permeabilidade controlada CPF, que visa sobretudo garantir um desempenho e uma vida útil do betão melhoradas.



Figura 4. – Gráfico que relaciona a vida útil com o grau de deterioração das estruturas

A Figura 4, demonstra claramente que ao retardamos o processo de degradação do betão, garantimos uma vida útil superior deste material. É este conceito que nos remete de imediato para o capítulo 2, onde estão descritos os pressupostos de durabilidade e funcionamento do CPF.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Às exigências económicas e ambientais das sociedades de hoje, tem correspondido uma adaptação da indústria da construção civil ao contexto actual. Isto tem-se traduzido numa evolução e versatilidade de soluções técnicas que visam a satisfação das necessidades dessas mesmas sociedades, garantindo assim uma melhoria das características de qualidade na área da construção civil.

Neste sentido, é fundamental um estudo cada vez mais aprofundado dos materiais de construção no escrutínio das vantagens e desvantagens inerentes ao seu uso. Na realização deste projecto, foram considerados os fundamentos teóricos apresentados no sub-capítulo 2.2, e que resultam naturalmente de estudos anteriormente feitos. Nos sub-capítulos posteriores são apresentadas as soluções técnicas de cofragem de permeabilidade controlada e de betão com fibras respectivamente.

2.2. DURABILIDADE

Quando no início do século XX, O betão começou a ser utilizado massivamente em elementos estruturais na a engenharia civil, a principal preocupação dos projectistas foi a de aprofundar os seus conhecimentos no comportamento mecânico deste material. Por esta altura, acreditava-se que o betão teria uma duração ilimitada.

No entanto, a aplicação deste material compósito ao longo de mais de 100 anos, tem trazido novos dados quanto ao seu desempenho, que tem conduzido principalmente desde o final do século XX, a uma necessidade de estudo dos parâmetros de durabilidade dos betões, a sua vida útil e o seu comportamento ao longo do tempo.

Além de se verificar hoje em dia, que o betão é um material que apresenta limitações quanto ao seu tempo de vida útil, e entende-se por vida útil o período durante o qual a estrutura mantém um nível de desempenho satisfatório, constata-se também que as suas características de durabilidade têm sido reduzidas ao longo dos anos e isso deve-se sobretudo aos seguintes factores:

- No início da sua aplicação e por falta de confiança no material, as dosagens de cimento eram grandes, a colocação era cuidada e as espessuras de recobrimento da armadura maiores dos que actualmente usadas.
- Hoje em dia são usados cimentos com resistências mais elevadas, obtidos sobretudo por uma maior finura, que conduz a uma reactividade química mais elevada. Este fenómeno faz com que sejam necessárias maiores quantidades de gesso para retardar a presa, o que favorece por exemplo as reacções sulfáticas.
- O emprego de betões mais resistentes, aliado a enorme evolução dos métodos de cálculo estruturais, permite o dimensionamento de elementos cada vez mais esbeltos com maiores quantidades de aço, sendo necessário para isso betões mais trabalhaveis que são

conseguidos sobretudo através de maior dosagem de água e de agregados finos. Estes betões por serem mais porosos tornam-se menos duráveis.

Entende-se por durabilidade do betão, a capacidade para este resistir à meteorização, ataque químico, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Um betão durável manterá a sua forma original, qualidade e funcionalidade quando exposto ao ambiente previsto.

Com efeito, todos os agentes envolvidos na concepção, execução e utilização de estruturas de betão devem conhecer os mais importantes processos de deterioração e os parâmetros que os regem. Um betão pode experimentar dois processos distintos de agressão: deterioração por acções mecânicas como por exemplo tensões que induzem formações de fendas nos elementos estruturais e acções de natureza química que resultam da exposição do betão ao meio ambiente. Por ser este segundo tipo de deterioração de betão que mais nos interessa para o presente projecto, apresentam-se de seguida os mecanismos de transporte assim como os agentes agressivos para o betão e os fenómenos de degradação a si associados e ainda os fenómenos de corrosão de armaduras.

2.2.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE

A deterioração do betão das estruturas é muito afectada pelo transporte de gases e líquidos, com ou sem substâncias em solução ou suspensão. A maior ou menor facilidade deste transporte depende basicamente da estrutura porosa do betão e das condições ambientais na sua superfície. Assim, os fluidos passam através do betão:

- pela pasta de cimento hidratada
- pelo agregado
- pela superfície de ligação cimento agregado
- por fissuras existentes à superfície
- por defeitos existentes na massa do betão

O transporte de fluidos no betão actuando sem pressão hidráulica pode dar-se por fenómenos de capilaridade ou difusão. Em presença de uma pressão hidráulica, o mecanismo dominante de transporte é a permeabilidade.

Visto isto, podemos então considerar três mecanismos distintos de penetração dos agentes agressivos no betão. Estes mecanismos que não têm obrigatoriamente que se processar isoladamente, são a difusão, a capilaridade e a permeabilidade.

A difusão é um processo de transporte, provocado pela tendência para se estabelecer o equilíbrio quando existe um gradiente de concentração de determinada substância. O transporte processa-se pelo movimento aleatório de moléculas e iões livres, originando um fluxo das zonas de maiores concentrações para as de menores concentrações.

A capilaridade é a penetração de um líquido no betão por acção da tensão superficial que actua nos seus poros capilares. É, a capacidade que os materiais porosos têm de captar líquidos acima do nível que apresenta a superfície líquida em contacto com eles.

A permeabilidade é a propriedade de um meio poroso se deixar atravessar por um fluido sob a acção de uma diferença de pressão.

A velocidade de penetração de fluidos por capilaridade é inversamente proporcional ao tamanho dos poros, enquanto que por permeabilidade é directamente proporcional. As superfícies livres

dos sólidos apresentam um excesso de energia superficial devido à falta das ligações entre os componentes do sólido e as moléculas adjacentes.

Nos poros da pasta de cimento, esta energia superficial dá origem a que as moléculas de vapor de água que se encontram nos poros sejam adsorvidas, formando-se um filme de água cuja espessura depende do grau de humidade dentro dos poros, assim como da humidade relativa do meio ambiente. Por outro lado, a quantidade de água adsorvida pelos poros será tanto maior quanto maior for a superfície específica dos mesmos.

A estrutura porosa do betão endurecido, sobretudo da rede capilar, é o factor decisivo na eficiência dos mecanismos de transporte, pois estes dependem principalmente da facilidade com que os fluidos, sobretudo água pura ou com substâncias dissolvidas, dióxido de carbono e oxigénio, penetram e se movimentam através da rede porosa, sobretudo nos capilares que formam uma rede contínua pois os microporos ou poros do gel já são demasiado pequenos para intervirem e os macroporos, em geral, estão isolados da rede.

A rede porosa da pasta de cimento de um betão é constituída pelos poros descritos anteriormente - os poros do gel e os poros capilares e ainda, os poros de maiores dimensões – os macroporos resultantes da granulometria e do ar emulsionado com os componentes durante a amassadura e que não se conseguiu libertar durante a fase de compactação (Neville, 1995).

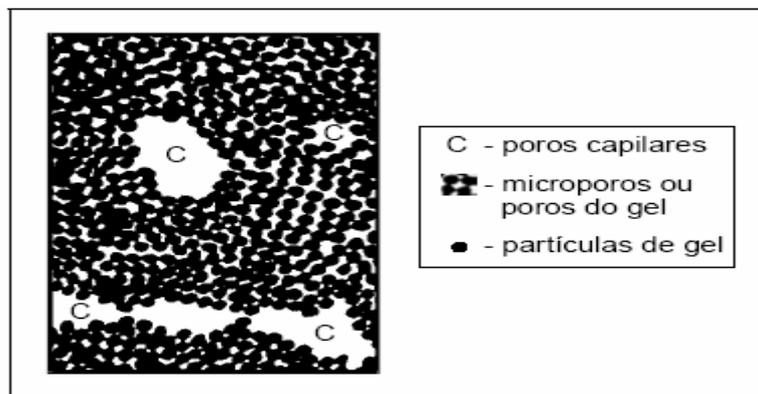


Figura 5- Esquema da rede porosa de um betão (Neville, 1995)

Para razões água/cimento baixas (entre 0.23 e 0.38), possíveis, hoje, devido ao uso de super plastificantes, o volume de capilares é muito reduzido, produzindo-se uma pasta de cimento muito densa, o que é francamente vantajoso em termos de durabilidade. Se o betão fendilhar as partículas de cimento não hidratadas poderão reagir com a água que vai penetrando nas fendas contribuindo para a sua colmatação. Em termos de resistência, este facto de existirem partículas de cimento não totalmente hidratadas, também é benéfico funcionando como inclusões na matriz de hidrossilicatos. A densidade da pasta do cimento hidratado tem consequências mecânicas a nível de transferência de tensões na interface com o agregado, pois o betão funciona como verdadeiro material compósito onde os inertes são componentes activos cujas propriedades elásticas influenciam as respectivas propriedades do betão.

Para razões água/cimento superiores a cerca de 0,38 todo o cimento hidrata transformando-se em gel cujo volume não preenche todo o espaço livre. A proporção final de poros capilares (após hidratação total) será tanto maior quanto maior a razão água/cimento. Através de estudos anteriormente realizados, pode-se constatar que o volume de poros capilares aumenta muito a partir da razão água/cimento 0,4 a 0,5 e que uma cura inadequada pode levar a uma hidratação incompleta com um volume enorme de rede capilar. (ACI, 1994)

Para valores muito elevados da razão água/cimento, a microestrutura dum betão é sempre muito aberta, com agulhas de etringite, cristais hexagonais de hidróxido de cálcio e outros cristais de silicatos de cálcio muito fracamente aderentes aos inertes (Coutinho, 1997).

2.2.2 AGENTES AGRESSIVOS PARA O BETÃO

Os dois factores fundamentais que influenciam significativamente sob o ponto de vista da durabilidade, uma estrutura de betão armado, são a agressividade do ambiente à que o material está exposto e as suas próprias características físicas e químicas.

Os agentes agressivos que são mais vulgarmente considerados num estudo de durabilidade de uma estrutura de betão armado ou pré-esforçado material compósito são:

- O dióxido de carbono que conduz à carbonatação do betão que como se verá mais a frente contribui para o fenómeno de corrosão das armaduras
- O oxigénio que tal como o dióxido de carbono, embora por motivos diferentes, é um elemento participativo no processo que conduz à corrosão das armaduras
- Os cloretos que promovem também os mecanismos de corrosão.
- Os sulfatos que dão origem a reacções expansivas no interior do betão
- Os álcalis que na presença de agregados reactivos originam reacções expansivas.

Os principais sintomas da degradação de uma obra de betão armado são as fendas, a escamação e os destacamentos de betão, a formação de crateras, as exsudações, as eflorescências e as manchas. A figura que se segue apresenta vários exemplos de estruturas deterioradas.

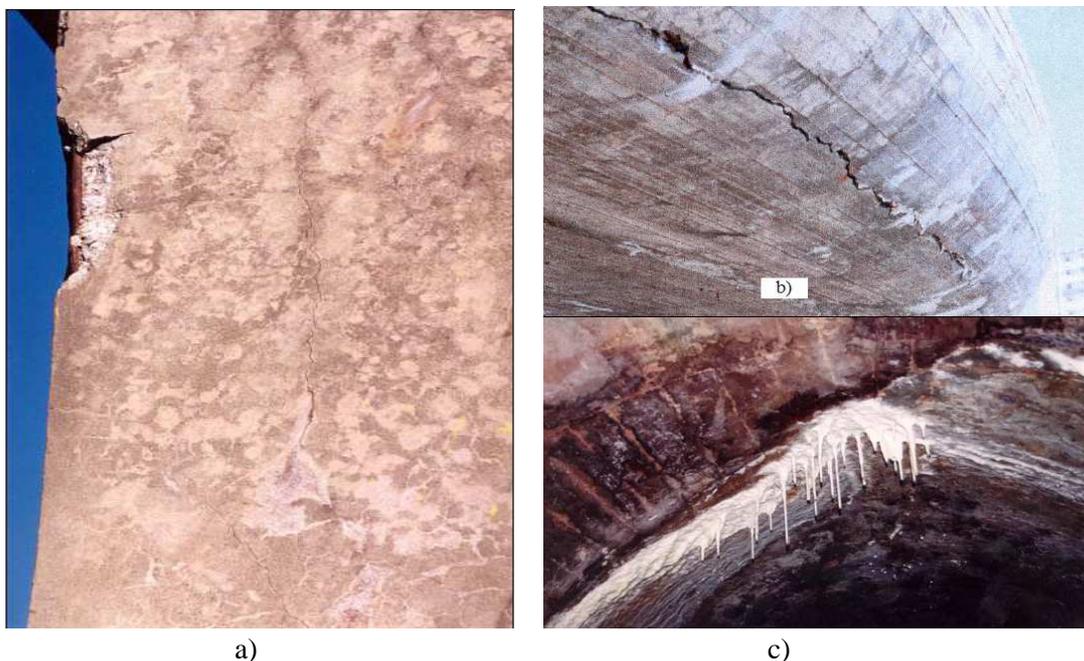


Figura 6 – Sintomas de degradação do betão. a) Destacamento. b) fendilhação c) eflorescencias

Dióxido de carbono

A durabilidade do betão pode ser posta em causa pelos fenómenos designados por carbonatação do betão de recobrimento das armaduras.

A carbonatação consiste basicamente na reacção do dióxido de carbono do ar que penetra através dos poros do betão, com os compostos cálcicos do betão, sobretudo o hidróxido de cálcio, isto é:



O dióxido de carbono existe na atmosfera na proporção de 0,03% em volume ou 0,04% em peso do ar, ou seja cerca de 0,5 mg por litro de ar. É bem conhecido que esta proporção pode variar devido a condições locais, não só de vegetação e outros factores biológicos, mas muito especialmente pela poluição do ar provocada pela combustão nas grandes cidades e centros industriais.

À medida que se vai processando a carbonatação do betão, o hidróxido de cálcio da pasta de cimento hidratado vai-se transformando em carbonato de cálcio de pH mais baixo e portanto, a carbonatação do betão, inicialmente são e de pH cerca de 12.5, tem como consequência uma diminuição de alcalinidade que pode ir até valores abaixo de 9 quando o betão passa a estar totalmente carbonatado – Figura7 (Masy, 1996).

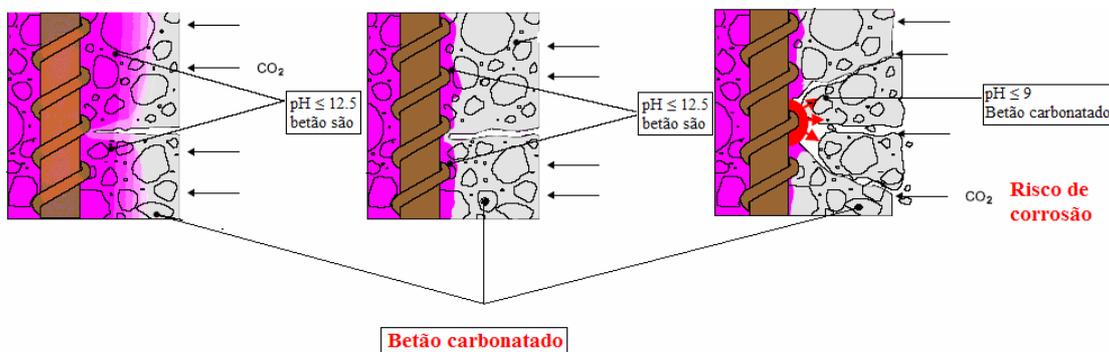


Figura 7 – Esquema do fenómeno de carbonatação (Masy, 1996)

A difusão do dióxido de carbono no betão dá-se do exterior para o interior e portanto a carbonatação começa desde a superfície e vai penetrando lentamente para o interior, segundo a velocidade de difusão do dióxido de carbono.

Como se explica anteriormente, no sub-capítulo 2.2.1, referente aos mecanismos de transporte, a difusão de uma substância resulta da tendência das diferentes concentrações em se equilibrarem e no caso de dióxido de carbono o gradiente de concentrações deve-se à reacção do dióxido de carbono sobretudo com os hidróxidos da pasta de cimento hidratado que se verifica apenas na presença de água, isto é, a difusão do dióxido de carbono dá-se através da película de água que forra as paredes do poro, até à superfície de poro onde se combina com os hidróxidos.

Assim, a difusão de dióxido de carbono e, portanto, a carbonatação não se dá em betão totalmente seco, nem em betão totalmente saturado. Neste último caso é impedido o acesso do ar contendo dióxido de carbono.

Cloretos

Os cloretos que se encontram na massa do betão podem ter uma de duas origens:

- A existência destes elementos químicos nos próprios materiais constituintes do betão, como por exemplo no cimento, agregados, água e possíveis adjuvantes ou adições.

- Estarem presentes no meio ambiente que se encontra em contacto com a estrutura de betão, como é o caso de ambientes marítimos ou industriais que são reconhecidos por serem ricos em sais desta natureza.

No que diz respeito ao primeiro ponto, é possível um controlo quase que absoluto das percentagens de cloretos em presença nos betões, através de normas que limitam a sua quantidade. No entanto é praticamente impossível controlar a presença destes sais no meio ambiente, pelo que se torna fundamental o estudo de três aspectos relevantes no processo de penetração de cloretos através do exterior:

- O tempo que estes elementos demoram a alcançar a armadura
- A quantidade de concentração necessária para provocar a despassivação
- A velocidade de propagação do fenómeno de corrosão

Os mecanismos de transporte mais usais no processo de penetração de cloretos são a difusão, a capilaridade e a permeação. A velocidade de penetração dos cloretos é considerada, em geral, função da raiz quadrada do tempo, uma vez que, tanto os processos de difusão pura, como os de absorção capilar, seguem uma lei potencial como se pode ver na seguinte equação

$$x = k_d \sqrt{t} \quad (2)$$

Em que :

x – a profundidade alcançada para uma determinada concentração de cloretos

t – o tempo que ocorre até se verificar a referida concentração

k_d – corresponde a uma constante que depende do betão e do meio exterior

Existe um valor mínimo de teor de cloretos que nas condições de uma dada estrutura conduz à sua deterioração. É este conceito que define o teor crítico de concentração de cloretos referido na equação acima descrita. No entanto, refira-se, que não existe nenhum valor de concentração de cloretos universalmente aceite uma vez que este parâmetro depende da composição, colocação, compactação e cura do betão. Também a quantidade de doseamento do cimento influi no valor do teor crítico de concentração de cloretos.

Na quadro que se segue podem ser lidos os valores para o teor crítico de concentração de cloretos preconizados na norma NP EN 206-1.

Quadro 1 – Teor Crítico de cloretos

Utilização do betão	Classes de exposição ambiental	
	XC, XF, XA	XS, XD
Betão sem armaduras de aço ou outros metais embebidos, com excepção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	C1 1,0	C1 1,0
Betão com armaduras de aço ou outros metais embebidos	C1 0,4 ⁽¹⁾	C1 0,2 ⁽¹⁾
Betão com armaduras pré-esforçadas	C1 0,2 ⁽¹⁾	C1 0,1 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Estas classes podem deixar de se aplicar se forem tomadas medidas especiais de protecção contra a corrosão, como protecção do betão ou recobrimentos, devidamente justificados, ou utilização de aço inox.

Sulfatos

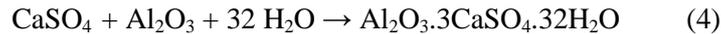
O ião sulfato ataca apenas os aluminatos do cimento portland endurecido ou cimento com clinquer portland, formando-se sobretudo etringite (e algum gesso) que é uma reacção muito expansiva no caso de água em presença ser suficiente.

Esta reacção pode ser de tal modo expansiva que o volume final seja duas vezes e meia o inicial, causando tensões intensas e fissuração irregular do betão, facilitando a penetração posterior de mais substância agressiva e progressão da deterioração. Enuncia-se de seguida, as reacções químicas inerentes à formação de etringite, através das equações 3 e 4.

Formação de sulfato de cálcio (gesso):



Formação do sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringite) com um aumento de volume de cerca de duas vezes a mais :



Os principais parâmetros que influenciam esta reacção expansiva, são:

- Condições de exposição, isto é, a severidade do ataque e portanto a quantidade de substâncias agressivas
- Acessibilidade da substância agressiva e, portanto, a permeabilidade do betão que influencia a velocidade do transporte
- Susceptibilidade do betão em questão, que depende do tipo de cimento usado, ou seja da quantidade de substâncias reactivas que este contém
- A quantidade de água presente

Na Figura 8 está esquematizado um processo de deterioração provocado pela presença de sulfatos na matriz cimentícia do betão

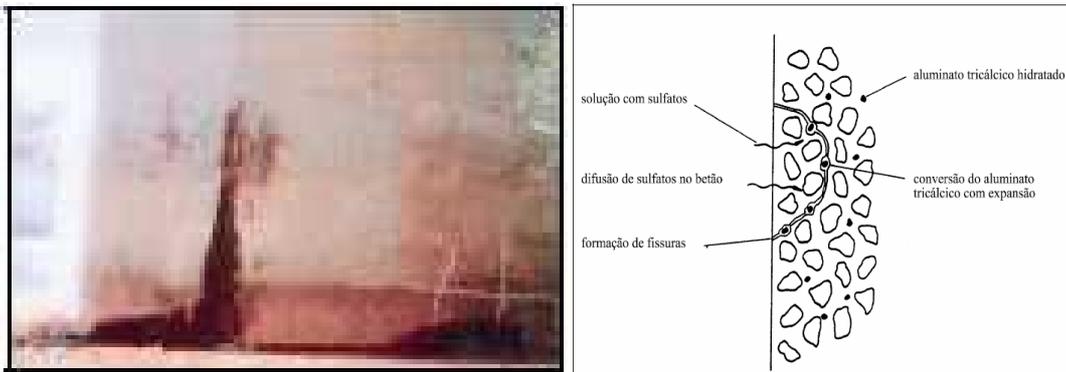


Figura 8 – Processo de deterioração provocado pela presença de sulfatos no betão

Refere-se que a formação de etringite é máxima para 0 °C e diminui até se anular para 80 °C, pelo que é uma reacção lenta em países quentes. Os modos de protecção do betão contra o ataque de sulfatos são: escolha do tipo de cimento de forma a não reagir com os sulfatos e grau de impermeabilidade necessário (baixa razão A/C).

Em geral o ataque por sulfatos incide sobre o aluminato tricálcico do cimento hidratado, no entanto, é possível verificar-se esse ataque sem que o cimento hidratado contenha aluminato tricálcico desde que providenciado pelo agregado. De facto, se o agregado contém inertes com feldspato caulinizado, então contém alumina, que pode reagir com os sulfatos formando etringite. Esta reacção será expansiva se o betão se encontrar sobressaturado de hidróxido de cálcio (Neville, 1995, Stark, 1987)

Álcalis

Tal como os sulfatos as reacções álcalis-agregado, originam produtos expansivos que deterioram o betão. Existem dois tipos de reacção que são mais vulgarmente documentadas, e que estão directamente relacionados com os elementos químicos presentes nos agregados que reagem com os álcalis (em geral sódio e potássio) :

- Reacções álcalis-sílica reactiva dos agregados
- Reacções álcalis-carbonatos dos agregados

Quando os agregados que constituem o betão, possuem sílica reactiva, é vulgar este material reagir com os elementos de sódio e potássio existentes na solução intersticial que circula nos poros e fendas do betão. Esta reacção provoca expansões e consequentemente degrada o betão. Este tipo de agressão pode levar muito tempo a manifestar-se em termos de deterioração do betão (Harrison, 1987). Pode-se referir que os principais parâmetros que influenciam as expansões são a quantidade e respectiva reactividade (presença de sílica) dos agregados, a concentração na solução intersticial de cálcio, sódio e potássio, o tipo de cimento e finalmente o meio ambiente em que está inserida a estrutura de betão.

Também as rochas carbonatadas podem experimentar ataque pelos álcalis e aí estamos perante uma reacção álcalis-carbonato. O mineral dolomite constituído por carbonato de cálcio e magnésio reage com o sódio e o potássio verificando-se um processo de desdolomitização que origina novos produtos de reacção tais como a calcite e a brucite. Ao contrário da etringite, estes novos elementos têm um volume menor que o originam, mas são responsáveis por permitir que as argilas e constituintes mais finos dessas rochas, adsorvam água, causando assim expansões que ultrapassando certos limites, provocam fissuração (Nixon, 1987).

Este ultimo tipo de reacção não tem sido verificada na Europa, mas está documentada em outros países do mundo, como é o caso do Canadá.

Na Figura 9 apresenta-se um caso real de deterioração por reacção álcalis-agregado e ainda um esquema do efeito desta reacção no betão.

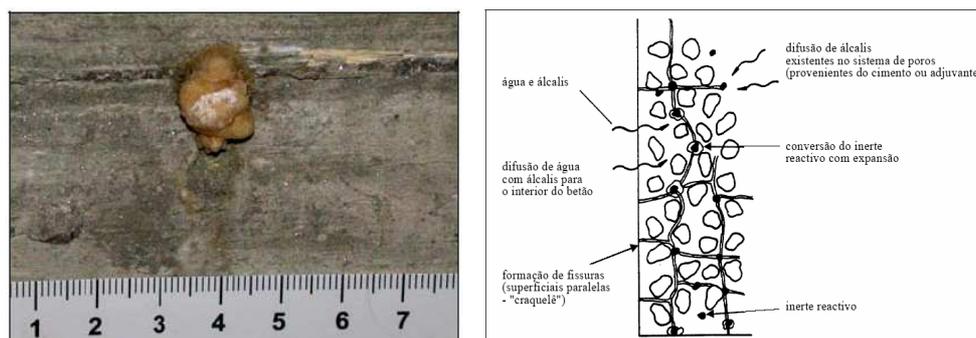


Figura 9 - Processo de deterioração provocado pela reacção álcalis-agregado

Oxigénio e água

O oxigénio e a água podem ser vistos como elementos nocivos ao betão na medida em que são essenciais para que ocorram mecanismos de corrosão. A sua presença em si, poderá não significar uma degradação do betão, mas quando reunido um conjunto de condições, contribuem significativamente para a corrosão das armaduras.

Também não se pode considerar que a quantidade destes elementos no interior do betão é linearmente proporcional aos processos de deterioração. Um exemplo disto que acabou de ser

referido, é o caso em que o betão está saturado (excesso de água) e por isso mesmo não há penetração de oxigénio no seu interior.

Tudo isto remete-nos de imediato para uma breve descrição dos mecanismos de corrosão e as suas origens.

2.2.3 CORROSÃO DAS ARMADURAS

A corrosão das armaduras é provavelmente o processo de deterioração mais comum nas estruturas de betão armado. O betão é muitas vezes visto como um material de protecção do aço das armaduras, sendo a sua eficiência nessa função, dependente da sua resistência aos agentes agressivos anteriormente descritos.

Para que ocorra um processo de corrosão das armaduras é necessário garantir simultaneamente o seguinte:

- Que se verifique a despassivação das armaduras
- Que ocorram diferenças de potencial na superfície das armaduras.
- Que se exista disponibilidade nas zonas catódicas
- Que as zonas anódicas e catódicas estejam ligadas electróliticamente e electricamente de modo a que os iões possam fluir entre elas

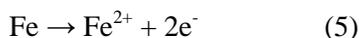
De uma forma resumida, poder-se-á dizer que para ocorrer um fenómeno de corrosão ter-se-á que verificar a presença de um ânodo que é a zona da armadura despassivada, um cátodo que é a zona da armadura que tem acesso ao oxigénio, um condutor eléctrico que neste caso é a armadura e um electrólito que se pode considerar a matriz do betão onde os poros contêm a solução condutora.

Descrevendo agora o mecanismo de corrosão, é preciso começar por definir o que se entende por despassivação da armadura. As armaduras no betão armado ou pré-esforçado encontram-se protegidas contra a corrosão pelo fenómeno designado por "passivação", devido à forte alcalinidade ($\text{pH} > 12,5$) do betão são. Nestas condições, forma-se à superfície da armadura uma película microscópica de cerca de 10 nm de espessura, que impede a dissolução do ferro e que se pensa ser constituída por complexos de ferro e cálcio contendo iões OH^- e CO_3^{2-} , óxidos de ferro Fe_2O_3 , Fe_3O_4 e água molecular.

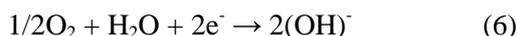
A forte alcalinidade do betão são, deve-se ao facto da solução intersticial existente na rede de poros e fendas do betão conter hidróxido de cálcio formado no processo de hidratação, e também aos alcalis presentes na constituição química do cimento. O fenómeno de passivação impede assim a corrosão do aço mesmo que estejam satisfeitas todas as outras condições que levam à corrosão das armaduras (humidade e oxigénio). A despassivação das armaduras, isto é, a destruição da película passivante, pode ocorrer através de dois fenómenos:

- Decréscimo do pH do betão (abaixo de 8 a 9,5), sobretudo devido à acção do dióxido de carbono no betão de recobrimento (carbonatação) ou, por vezes, à lixiviação de alcalis provocada por água corrente que pode ocorrer em zonas sensíveis da estrutura por exemplo em juntas de construção ou zonas fendilhadas quando o betão é de má qualidade (ninhos de pedra, razão água/cimento elevada).
- Penetração de agentes despassivantes sobretudo cloretos, no betão de recobrimento até às armaduras. Quando a concentração de cloretos excede determinado valor crítico a película passivante é destruída e poder-se-á dar início à corrosão do aço.

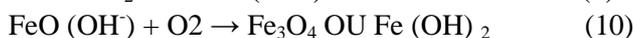
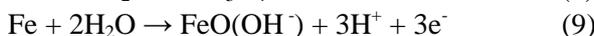
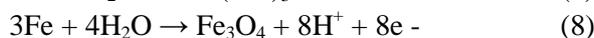
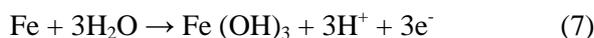
Verificada a despassivação das armaduras começam as reacções químicas que resultam na corrosão das armaduras, e que se podem dividir em dois processos distintos: o processo anódico e o processo catódico. Assim, teremos um primeiro processo (anódico) que consiste na dissolução do ferro com libertação de electrões como se pode ver na equação (5).



No processo catódico, estes iões de ferro formados e que foram transportados através da armadura até ao cátodo vão reagir com o oxigénio e com a água formando iões oxidrilo como se pode constatar na equação (6)



No entanto, na zona anódica ocorrem reacções secundárias (equações 7, 8, 9, 10), originando produtos de corrosão cuja forma final depende das condições de humidade e da disponibilidade de oxigénio (Coutinho, 1998):



À formação dos produtos de corrosão está associado um aumento significativo de volume (figura 10), gerando-se no interior do betão tensões muito elevadas que acabam por fendilhar, destacar ou delaminar o betão de recobrimento das armaduras (Figura 10).

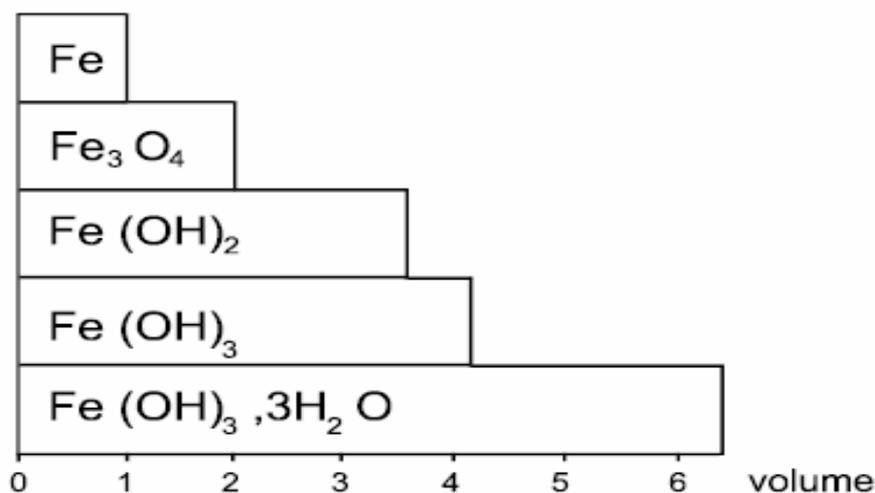


Figura 10 – Produtos expansivos resultantes da corrosão

Existem vários tipos de corrosão que se passam a descrever sumariamente:

- Corrosão generalizada: este tipo de corrosão é consequência da perda generalizada da película passiva, que dá origem a zonas anódicas e catódicas muito pequenas e muito juntas, formando microcélulas de corrosão. A perda generalizada da película passiva resulta do abaixamento do pH do betão, quer por carbonatação, quer por efeito da lixiviação do betão produzida por águas puras ou ligeiramente ácidas. A corrosão generalizada tem como efeito a redução da secção transversal das armaduras e a fissuração do betão de recobrimento (Schiessl, 1987).
- Corrosão localizada : a corrosão por acção dos cloretos é geralmente caracterizada por zonas anódicas pequenas, onde o teor crítico de cloretos ao nível das armaduras foi

atingido, e por grandes zonas catódicas, normalmente adjacentes aos ânodos, mas podendo também localizar-se em zonas afastadas dos mesmos [16]. O tipo de corrosão originado é a corrosão localizada ou corrosão por picadas. A corrosão por acção dos cloretos é bastante gravosa porque, em geral, é caracterizada por elevada velocidade e perdas acentuadas na secção das armaduras (Costa, 1996).

- Corrosão sob tensão: este tipo de corrosão ocorre quando se conjugam duas circunstâncias: elevados esforços de tracção sobre os aços e presença de um meio agressivo. A corrosão sob tensão, particularmente associada a aços de pré-esforço, resulta da distribuição não uniforme da tensão nas armaduras devido à existência de heterogeneidades no metal (defeitos), conduzindo à sua fissuração localizada. Este tipo de corrosão, corrosão sob tensão, é particularmente importante, uma vez que a progressão de uma fissura é muito rápida, provocando a rotura brusca e frágil do metal, mesmo sem a superfície mostrar sinais de ataque.

.Na figura abaixo apresentam-se uma fotografia de uma estrutura que sofreu um processo de corrosão e um esquema resumido deste fenómeno:

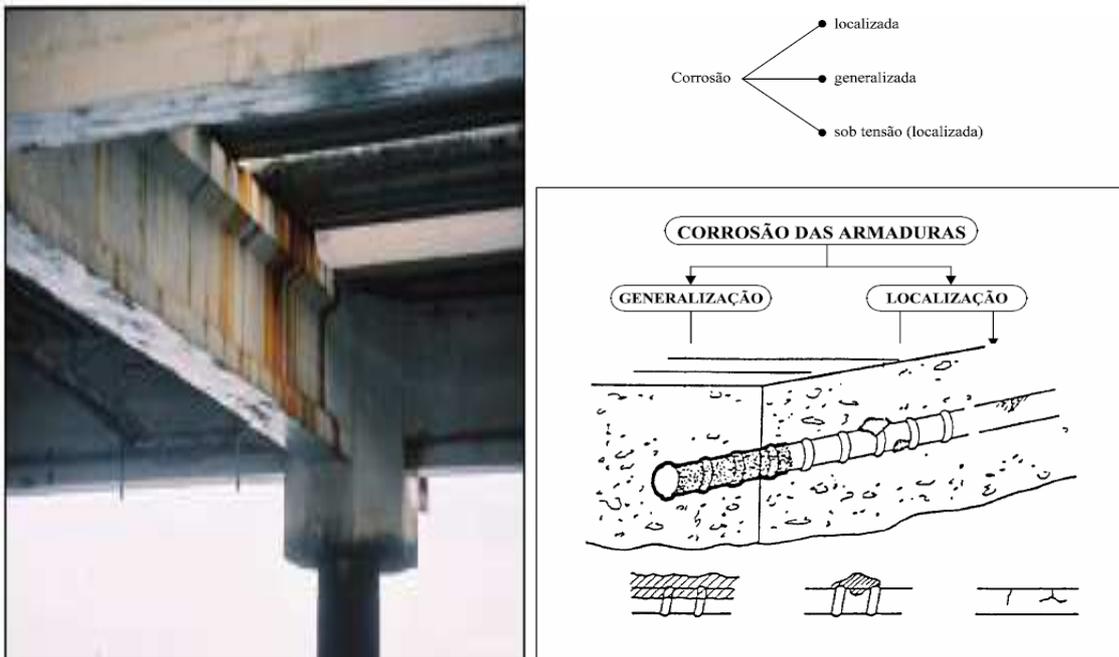


Figura 11 – Corrosão das armaduras e respectivo esquema

2.3. CPF – COFRAGEM DE PERMEABILIDADE CONTROLADA

2.3.1 BREVE NOTA INTRODUTÓRIA

O primeiro método com equivalência ao CPF (Controlled Permeability Formwork) utilizado nos dias de hoje, foi o modelo japonês “textile Form”, sendo a sua primeira aplicação na barragem Aseishi Gawa datada de 1986 (Marosszky, 1993).

O principal objectivo da utilização deste sistema, era a de tentar reduzir o índice de vazios no betão, que é como se sabe um dos parâmetros associados à uma menor durabilidade em estruturas em contacto com a água. Devido ao sucesso que foi o uso deste método na barragem

em questão, houve como que um despertar do interesse da comunidade científica no desenvolvimento desta tecnologia. Começaram então a decorrer imensas pesquisas no sentido de se determinar as suas propriedades e otimizar a sua utilização. Pode-se dizer que foi o momento que definiu o aparecimento dos sistemas de cofragem drenantes para o betão (Geyer, 1989)

Em 1987, numa obra no Reino Unido foi utilizado o primeiro verdadeiro sistema CPF, constituído por um suporte de madeira com 8 metros de altura, sobre a qual foi fixa uma grelha geotêxtil produzida pela ICI (Paragrid), à qual foi agrafado um têxtil produzido também pela ICI (Terram). Isto conduziu a que uma empresa (SGB) desenvolvesse um sistema CPF constituído por um têxtil sobreposto sobre uma rede tipo malhasol (Coutinho,1998).

Em 1995 surge um novo sistema de cofragem de permeabilidade controlada japonês em que o filtro/dreno é constituído por duas camadas: Uma interior que contacta com o betão em polietileno perfurado e uma exterior correspondente a cofragem de polipropileno não tecido Tsukinaga Et al 1995).

Nos anos 90 o sistema CPF começa a ser divulgado na Europa, com a DuPont a criar um filtro/dreno especificamente aplicável a cofragens de permeabilidade controlada e lança no mercado europeu o produto Zemdrain que tem um enorme impacto e conduz a uma série de trabalhos de investigação e de experiências que demonstram que este produto melhora claramente várias características do betão, tais como a permeabilidade, o aspecto superficial, a resistência superficial e variados aspectos de durabilidade.

Trata-se de uma tela constituída por uma única camada que combina um filtro e um dreno. O lado que fica em contacto com a cofragem é de cor preta e tem a função de drenagem, enquanto que o lado que fica em contacto com o betão é de cor cinza e tem a função de reter as partículas de cimento

Novos estudos comprovam então, que os ensaios de absorção superficial, absorção por capilaridade, resistência ao gelo/degelo, de penetração de cloretos e resistência à abrasão apresentam melhorias significativas nos seus resultados, confirmando assim um conjunto considerável de vantagens no uso desta tecnologia.

É já em finais de 1996 que a DuPont cria uma versão melhorada de Zemdrain designado “Zemdrain MD1” cuja diferença principal em relação ao produto anteriormente comercializado é a de não necessitar de tensionamento durante a sua colocação. É de facto um têxtil com maior rigidez bastando por isso fixa-lo a cofragem sem necessidade de dobrar as pontas. Posteriormente surge o “Zemdrain MD2”, que é em tudo equivalente ao MD1 com a diferença de se poder reutilizar até três vezes.

Desde então, o CPF tem tido uma aceitação praticamente unânime junto da comunidade científica e são já muitas as obras de construção civil que adoptaram este tipo de solução técnica na execução dos seus trabalhos. No entanto muitas vezes esta solução não é bem encarada por parte dos empreiteiros por se tornar uma solução onerosa e as vantagens da sua utilização sejam difíceis de definir. Na Figura 12 apresentam-se três obras distintas onde foi utilizada cofragem de permeabilidade controlada.

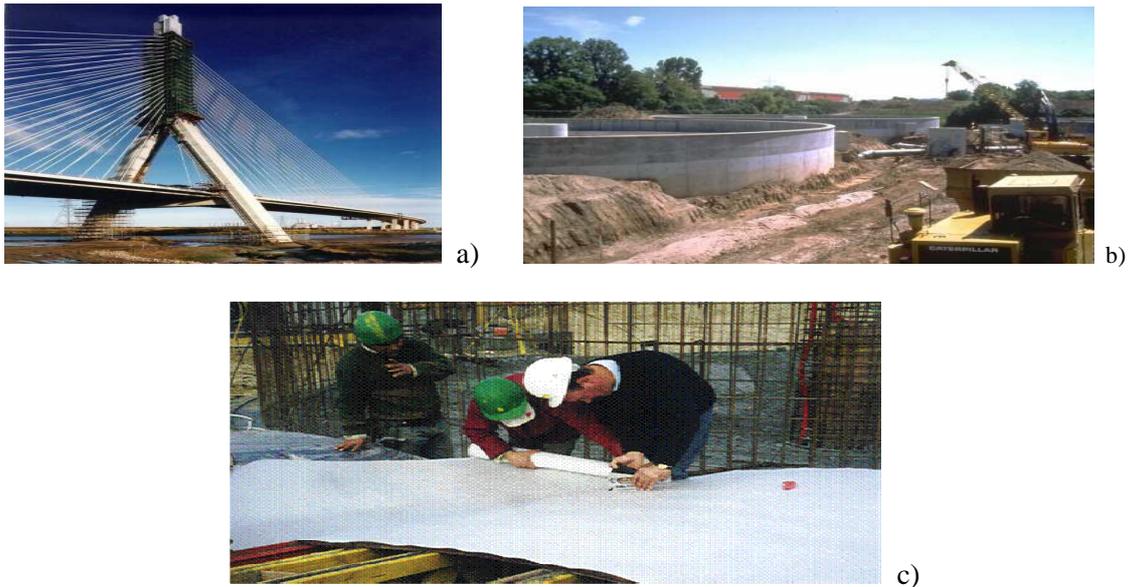


Figura 12 – Várias obras onde foram aplicados CPF. a) Viaduto b) Reservatório de água c) Elemento de uma ETAR (Aveiro) em que foi utilizado CPF numa obra executada por um consórcio com a Teixeira Duarte

2.3.2 TIPOS DE CPF

Pretende-se agora enunciar os correntes tipos de cofragem de permeabilidade controlada que se distinguem entre si nos materiais que os constituem e consequentemente na forma como são aplicados e respectivo funcionamento. A classificação mais usual é a seguinte:

- Tipo I – Este tipo de CPF é constituído por duas camadas de filtro que são colocadas sobre o suporte estrutural e tensionado “in situ”. Este tipo de cofragem de permeabilidade controlada pode ser reutilizada se for devidamente limpa após a sua utilização com jacto de água de alta pressão. Um exemplo deste tipo de CPF é o molde têxtil. (Ciria 2000)
- Tipo II – Este tipo de CPF é em tudo semelhante ao anterior, distinguindo-se apenas, pelo número de filtros usados. Enquanto que o tipo I é constituído por duas camadas de filtro, este tipo de CPF contempla apenas um filtro. Em geral não são reutilizáveis. São exemplos deste tipo o Formtex e o Zemdrain (ciria)
- Tipo III- A constituição deste tipo de CPF consiste na combinação de filtro e um dreno. Este dreno, que é o que distingue esta solução das outras, é em geral uma superfície texturada em forma de grelha. Devido à sua rigidez, a fixação ao suporte estrutural não necessita de tensionamento, uma vez que já foi pré-tensionado aquando do seu fabrico, sendo este tensionamento mantido pela superfície do dreno. O Zemdrain MD referido anteriormente é um exemplo deste tipo de cofragem de permeabilidade controlada

Na realização deste projecto utilizou-se uma solução de CPF do tipo III, (Zemdrain MD) idêntico ao ilustrado na Figura 13.



Figura 13 – Cofragem de permeabilidade controlada do tipo III

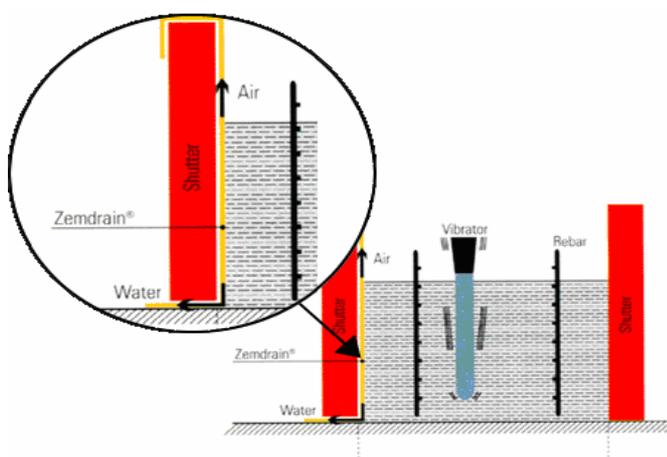
2.3.3 FUNCIONAMENTO DO CPF

Os sistemas CPF, como já foi referido, consistem no revestimento interno de uma cofragem por um têxtil permeável especialmente desenvolvido. Estes têxteis apresentam como principal característica um estrutura contínua de múltiplos microporos que lhes confere um certo grau de permeabilidade. Do lado da cofragem, O CPF tem como principal função a drenagem da água em excesso, assegurando por um lado a sua expulsão e simultaneamente das bolhas de ar e por outro lado tem a função de armazenamento de água para garantir a continuação do processo de hidratação do cimento. Junto à superfície do betão, este filtro/dreno retém os finos do cimento, controlando assim a estrutura porosa conferindo-lhe uma superfície mais densa e menos porosa

Na Figura 14 a) é elucidativa a expulsão da água em excesso numa cofragem utilizando CPF, enquanto na figura b) se encontra esquematizado o funcionamento deste tipo de cofragem.



a)



b)

Figura 14 – a) Parede betonada com CPF b) Esquema de funcionamento do CPF

A água é removida por gravidade, assegurando uma razão água/cimento ideal nos primeiros 20mm da zona de recobrimento e a quantidade de água drenada encontra-se entre os 0.5 a 3 litros de água por metro cúbico de betão (Price,2000). Entende-se por razão ideal de

água/cimento a quantidade mínima de água necessária à hidratação de cimento que é geralmente de 0.23. É precisamente esta característica particular do CPF, de garantir uma razão água/cimento na superfície do betão diferente da relação A/C inicial da composição do betão que confere a este tipo de cofragem um conjunto de vantagens que se verá mais pormenorizadamente no sub-capítulo posterior.

Com o uso deste tipo de filtro/dreno, verifica-se uma mais rápida hidratação do cimento reduzindo assim a formação de poros. Obtém-se assim uma superfície de recobrimento mais densa, mais compacta e durável que protege o núcleo do betão e as armaduras do ataque dos agentes agressivos presentes no meio ambiente.

Para confirmar o que foi atrás dito, pode-se referir que estudos comprovam que superfícies de betões cofrados com CPF apresentam índices de cimento superiores a 75 kg/m^3 que são valores naturalmente maiores que os verificados em superfícies de betões cofrados tradicionalmente. (DuPont, 1996)

Testes realizados em laboratório por parte da equipa DuPont revelaram uma redução de cerca de 40% na carbonatação e penetração de cloretos quando comparados um betão cofrado com CPF e um betão cofrado tradicionalmente. Estes ensaios indicaram ainda um aumento da dureza superficial em 20% um aumento de resistência aos ciclos gelo/degelo na ordem dos 40%. O uso do CPF permite também uma redução do período de cura em cerca de três dias, com a vantagem adicional de não se ter que recorrer ao uso de óleos descofrantes (DuPont, 1996).

Na figura que se segue são percéptíveis também os efeitos estéticos da superfície de um betão cofrado tradicionalmente em comparação com um betão onde foi utilizado uma cofragem de permeabilidade controlada.

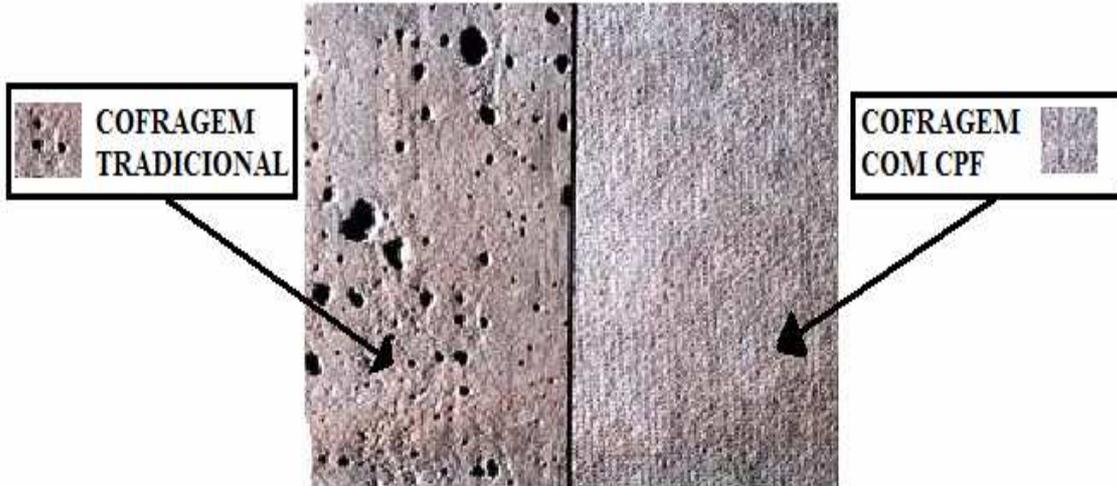


Figura 15 – Diferenças de superfície entre dois betões cofrados com cofragem tradicional e com CPF respectivamente

2.3.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CPF

Enunciam-se agora de uma forma resumida as vantagens e desvantagens da aplicação de CPF a estruturas de betão: Como vantagens teremos então benefícios económicos para a construção e benefícios estruturais para os materiais.

Benefícios económicos

Apesar de ser comum os agentes ligados à indústria da construção civil analisarem exclusivamente os custos de investimento inicial de uma determinada estrutura, a verdade é que os custos de manutenção e reparação dessas mesmas estruturas ao longo do seu tempo de vida útil, significa uma percentagem considerável do custo total associado a uma obra. Assim sendo, facilmente se percebe que ao melhorar significativamente os parâmetros de durabilidade de uma determinada estrutura, o CPF contribui sobremaneira para o prolongamento do tempo que ocorre entre o início de vida útil dessa construção e o momento da primeira intervenção de reparação. Estudo económicos realizados pelo Prof. Seyfried na Universidade de Hannover, indicam uma redução de custos na ordem dos 45% ao fim de 35 anos de vida útil de uma dada estrutura onde foi aplicado CPF em comparação com estrutura semelhante em que se usou cofragem tradicional.

Benefícios estruturais para os materiais

Como ficou demonstrado no sub-capítulo referente ao funcionamento do CPF, o uso deste tipo de cofragem confere ao betão um conjunto de melhorias na camada superficial dos elementos estruturais que acabam por definir as vantagens da utilização desta solução técnica. Assim temos:

- Colocação e compactação: A compactação tem como funções obter um betão o mais denso possível, particularmente à volta das armaduras e cantos das cofragens e expelir as bolhas de água para o exterior, em particular na zona de recobrimento das armaduras, sendo essa tarefa facilitada pelo uso do CPF.
- Cura : para que se realize um boa cura, deve evitar-se a secagem prematura das superfícies de forma a não impedir as reacções de hidratação do cimento. O uso do CPF promove uma cura mais rápida e eficaz nas primeiras horas quando comparado com a cura em cofragem tradicional.
- Óleos descofrantes: o contacto entre as superfícies de betão e os óleos descofrantes tornam as camadas superficiais mais vulneráveis e mais susceptíveis ao desenvolvimento de microrganismos. Além disso os óleos descofrantes são agressivos para o meio ambiente obrigando a uma exigente gestão de resíduos. A utilização do CPF dispensa o uso de óleos descofrantes traduzindo-se numa economia de custos.
- Presença de ar e água entre a cofragem e estrutura do betão: O ar e a água que ficam presos na superfície do betão, conduzem à formação de poros que enfraquecem a superfície do betão em termos de durabilidade. O uso do filtro/dreno permite a drenagem da água e a extracção do ar entre a cofragem e a superfície de betão.
- Razão água/cimento: O uso do CPF assegura, independentemente da composição inicial do betão, uma relação água cimento baixa na superfície que confere como se viu no ponto 2.2.3 uma superfície mais resistente aos agentes agressivos.
- Recobrimento: A cofragem de permeabilidade controlada para além de reduzir significativamente a porosidade na superfície do betão, confere a esta uma resistência elevada ao crescimento de microrganismos.

Como principais desvantagens da utilização dos sistemas CPF temos o custo dos materiais, a utilização de processos modernos que implicam o uso de mão-de-obra especializada e consequentemente custos superiores, a construção e manutenção da cofragem e uma reutilização limitada.

2.4. BETÃO COM FIBRAS

2.4.1 GENERALIDADES

Por serem materiais que apresentam baixa resistência à tracção, os compósitos desde o início da sua utilização, tenderam para incorporar na sua matriz materiais complementares, que permitissem um desempenho mais constante para os vários tipos de solicitação de acções. Estes materiais são em geral de natureza metálica, tais como varões de aço, fios, malhas, cabos ou mesmo fibras de vários tipos.

Desde o tempo dos egípcios, que se incluíam fibras para reforçar materiais compósitos. Eram então na altura, incorporada palha e crinas de cavalo para garantir ao barro características de resistência à tracção. No entanto, é já em pleno século XX que se dá um desenvolvimento acentuado no conhecimento do comportamento dos compósitos cimentais reforçados com fibras. As primeiras fibras a serem experimentadas em betão foram fibras de aço e datam da década de 60. O seu uso tem aumentado significativamente nos últimos anos, e novos tipos de fibras tem também aparecido como são o caso de fibras poliméricas. Fibras de vidro e fibras de carbono. Na Figura 16 podemos ver vários tipos de fibras existentes no mercado (Li, 2000)

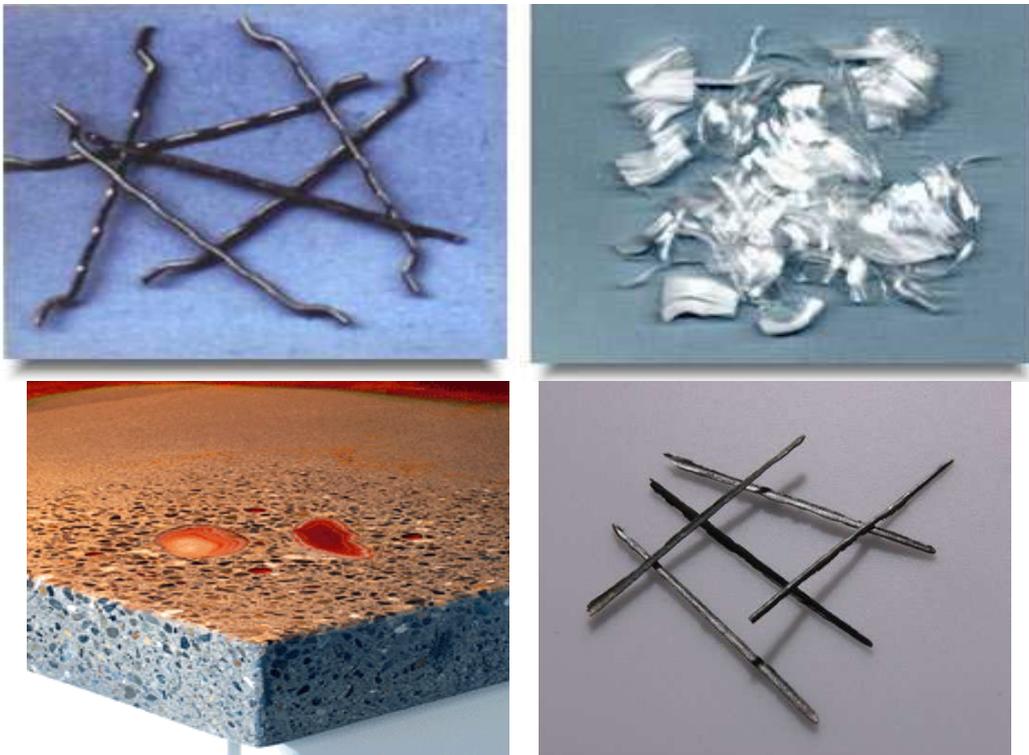


Figura 16 – Vários tipos de fibras

Está estimado um consumo de 300000 toneladas de fibras por ano. Este número apesar de apresentar tendência para aumentar, a verdade é que podemos concluir que o BRF representa uma pequena percentagem da produção de betão em todo o mundo.

Acredita-se que esta pequena fracção de BRF aplicado nas estruturas de betão se deve sobretudo ao facto de este tipo de compósito só permita substituir a armadura convencional em elementos que estejam sujeitos a cargas menores ou então que apresentem um nível de confiança elevado como por exemplo uma laje de pavimento térreo que está naturalmente apoiada no solo.

O custo associado a uma obra de construção civil é um parâmetro que normalmente engloba várias vertentes e por isso mesmo torna-se complexa a sua avaliação. É vulgar as pessoas envolvidas nesta indústria atenderem a custos directos e facilmente calculáveis como volumes de betão e densidade de armadura e esquecerem custos indirectos que apresentam uma maior dificuldade na sua definição e que são por exemplo, o tempo de execução, a exigência de mão de obra qualificada ou ainda a complexidade do processo construtivo. O estudo contínuo do BRF poderá conduzir a uma solução alternativa às estruturas tradicionais em betão armado que implicam normalmente prazos superiores e um elevado numero de mão-de-obra. Acredita-se por isto que uma substituição total ou parcial da armadura convencional resulta numa solução mais eficaz economicamente.

No que diz respeito ao desempenho estrutural, a resposta à fractura apresenta-se melhorada no BRF e isto justifica-se através de uma eficaz distribuição da fendilhação, tanto em abertura de fendas como em espaçamento entre elas. Em termos de estado limite último, obtém-se maior resistência à flexão e maior ductilidade para mecanismos de rotura por esforço transversal e punçoamento.

Tem-se provado através de estudos de betão reforçado com fibras, que este tipo de material pode melhorar o comportamento de vigas e lajes tanto em estado limite de serviço como em estado limite último. No entanto, a utilização de BRF (sobretudo betões reforçados com fibras metálicas) encontra-se limitada na Europa muito por culpa de falta de regulamentação, que permita um dimensionamento exacto das peças estruturais que contemplam este tipo de betão. Esta limitação deve-se sobretudo à imprevisibilidade na distribuição das fibras na matriz do betão que pode conduzir a secções mais resistentes que outras. Sendo as fibras responsáveis por absorver a totalidade das tensões de tracção no momento pós-fendilhação, poderão existir zonas mais fragilizadas em secções com menor densidade das fibras.

2.4.2 APLICAÇÃO DO BETÃO COM FIBRAS

Segundo o comité 544 do ACI, as aplicações do BRFA dependem “da capacidade do projectista e do construtor em tirar partido das resistências à tracção (estáticas ou dinâmicas), das características de absorção de energia, da tenacidade e da resistência à fadiga deste material compósito. A distribuição uniforme das fibras no betão proporciona propriedades resistentes isotrópicas que não são comuns ao betão armado” (Li, 2000).

As fibras diferem da armadura convencional no seu desempenho estrutural, pois embora não sejam tão eficientes na resistência aos esforços de tracção, têm um papel muito significativo no controlo da fendilhação. Esta diferença deve-se sobretudo à distribuição espacial das fibras na matriz cimentícia, uma vez que não é previsível a contribuição das fibras para as tensões de tracção e corte, pois é desconhecida a sua localização no betão.

Por tudo isto deve-se distinguir o reforço por fibras e por armadura, assimilando o facto de um não ser substituto do outro mas eventualmente soluções complementares. Assim sendo facilmente se entende que a aplicação das fibras terá uma maior eficiência consoante o elemento estrutural em questão. Enunciam-se de seguida as soluções construtivas onde é usual observar o recurso a betão reforçado com fibras:

- Estruturas esbeltas – elementos onde varão de aço não pode ser utilizado;
- Estruturas onde existem cargas e conseqüentemente deformações locais muito elevadas – como são exemplo revestimentos em túneis, estruturas que exijam resistência a explosão, estacas...etc
- Elementos horizontais sujeitas a humidade ou diferenças de temperatura – Lajes ou pavimentos

Pode-se assim resumir a grande vantagem do uso de fibras ao aumento da ductilidade do material compósito, devido à sua capacidade em absorver energia. Resistência ao impacto, fadiga e abrasão são também parâmetros que normalmente são melhorados em betões reforçados com fibras (BRF).

A Figura 17 mostra duas aplicações de betão com fibras: uma laje mista reforçada com fibras metálicas e um túnel com o mesmo tipo de reforço.



Figura 17 – a) Betão com fibras aplicado num pavimento b) Betão com fibras aplicado num túnel

As fibras, embora possam apresentar efeitos estruturais, são desconsideradas na sua contribuição às resistências mecânicas dos BRF. Deste modo, é vulgar atribuir às fibras de reforço a função exclusiva de controlo de fendilhação por retracção do betão. São normalmente estruturas com grandes dimensões com grandes superfícies expostas e com movimento restringido que recorrem a este tipo de reforço. São facilmente identificáveis as vantagens do uso de fibras em lajes, pavimentos e depósitos de grandes dimensões:

- Distribuição uniforme no que respeita à localização e orientação;
- Resistência a corrosão, especialmente nas fibras sintéticas, de carbono ou metal amorfo;
- Redução de mão-de-obra, evitando a necessidade da dobragem dos varões de aço e posicionamento relativamente à cofragem, conduzindo à redução do tempo execução dos elementos estruturais.

A reparação de estruturas de betão parece ser também uma vantagem apresentada pelo uso de fibras no reforço do betão uma vez que ao controlar a fendilhação, reduzem a deterioração das estruturas e atrasam os mecanismos de agressão a que as estruturas estão sujeitas. Por este motivo, entende-se ser uma boa solução o recurso a BRF quer em estruturas novas, quer em reabilitações de edifícios já existentes. Parâmetros de qualidade mais exigentes têm permitido um aumento significativo da aplicação deste tipo de tecnologia, sobretudo nos países mais industrializados.

O valor monetário criado pela durabilidade das estruturas é difícil de quantificar, mas a necessidade de estruturas duráveis representa claramente a grande razão do uso de fibras (Li, 2000).

O uso das fibras como materiais com funções estruturais é além de muito recente, extremamente rara. Apesar de algumas tentativas na Europa a verdade é que não existem ainda regulamentos em Portugal que nos permitam um dimensionamento estrutural tendo em conta a contribuição das fibras na resistência às acções de sollicitação das peças com BRF. No entanto a investigação tem estabelecido que a inclusão de fibras melhora o comportamento dos materiais em relação a:

- Ductilidade
- Resistência a fissuração
- Resistência ao corte
- Resistência ao impacto;

2.4.3 NATUREZA, SECÇÃO, FORMA E SUPERFÍCIE DA FIBRA

São os processos de interacção entre a fibra e a matriz que definem o comportamento dos compósitos reforçados com fibras. São estes mecanismos de ligação que garantem uma melhor capacidade em absorver energia, ductilidade e resistência. Este processo individual referente a cada fibra pode ser enunciado da seguinte forma (Kanstad, 2004):

- fibra actuando como ponte de transferência de tensões (fibre-bridging)
- desligamento da fibra (fibre debonding)
- arrancamento da fibra ou deslizamento (fibre pullout)
- rotura da fibra

Ainda que a quantidade de energia de absorção instalada em cada fibra individualmente seja desprezável, o elevado número de fibras que actua numa determinada zona de influencia, contribui para um mecanismo de reforço considerável (Lofgren, 2005). Os processos de absorção de energia encontram-se ilustrados na Figura 18.

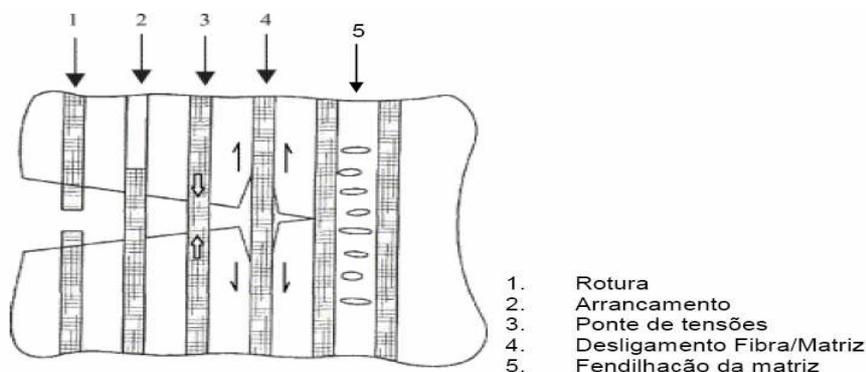


Figura 18 –Processos de absorção de energia pelas fibras

A característica de ductilidade presente nos BRF, é altamente influenciada pela ligação entre as fibras e a matriz cimentícia. Esta ligação deverá ser assegurada pelas características da matriz em si e a secção, forma e superfície da fibra. Garantidos um bom funcionamento da ligação em causa, pode-se obter um betão de elevado desempenho e alta ductilidade.

Se tomarmos em conta a natureza das fibras disponíveis no mercado (aço, polímero, vidro, carbono...etc) e as suas formas geométricas, é importante definir as propriedades que mais podem influenciar a ligação entre fibra e matriz. Se analisarmos o comportamento de um betão reforçado com fibras a um esforço de tracção, rapidamente identificamos o ponto em que a resistência da matriz deixa de ser o factor que condiciona a própria resistência do BRF, e passam a ser as fibras e a sua tensão de adesão à matriz, a condicionar o comportamento do compósito reforçado com fibras. Esse ponto é o ponto de fendilhação do betão.

É por tudo isto que se torna essencial estudar as características geométricas das fibras tais como a forma, secção, e superfície da fibra. São estes parâmetros que condicionam a ligação das fibras ao betão e consequentemente a sua tensão de adesão.

Existe um conjunto de pressupostos que se devem verificar de forma a garantir um reforço real e eficiente das fibras quando integradas no betão :

- tensão de tracção entre 2 a 4 vezes mais que a tensão de tracção do betão
- tensão de aderência ao betão pelo menos da mesma ordem de grandeza que a tensão de tracção do próprio betão
- módulo de elasticidade significativamente mais elevado, pelo menos 3 vezes maior .
- coeficiente de Poisson e coeficiente de expansibilidade térmica da mesma ordem de grandeza

Todos estes aspectos, podem ser ultrapassados através de vários métodos, que podem ser aplicados tanto a fibras de aço como a fibras sintéticas, e que se baseiam no aumento da área de contacto entre as fibras e o betão (Singh, 2004) :

- aumentar a rugosidade da fibra
- torcer a fibra ao longo do seu comprimento
- deformar a fibra para obter amarração mecânica nas extremidades (zona de ancoragem)
- deformar ao longo do comprimento (indentar, frisar...etc)
- tratar micromecanicamente a superfície (cauterização química, tratamento por plasma)

No presente estudo foram ensaiados betões que contemplavam os seguintes tipo de fibras: fibras metálicas (arredondadas com gancho) do tipo dramix 65/60 e dois tipos de fibras sintéticas da marca Durofibril e da marca Fisipe. Na figura abaixo apresentam-se fotografias das fibras metálicas consideradas para o trabalho. Apresentam-se ainda na Figura 19 vários tipos de perfis de aço usadas em betão.

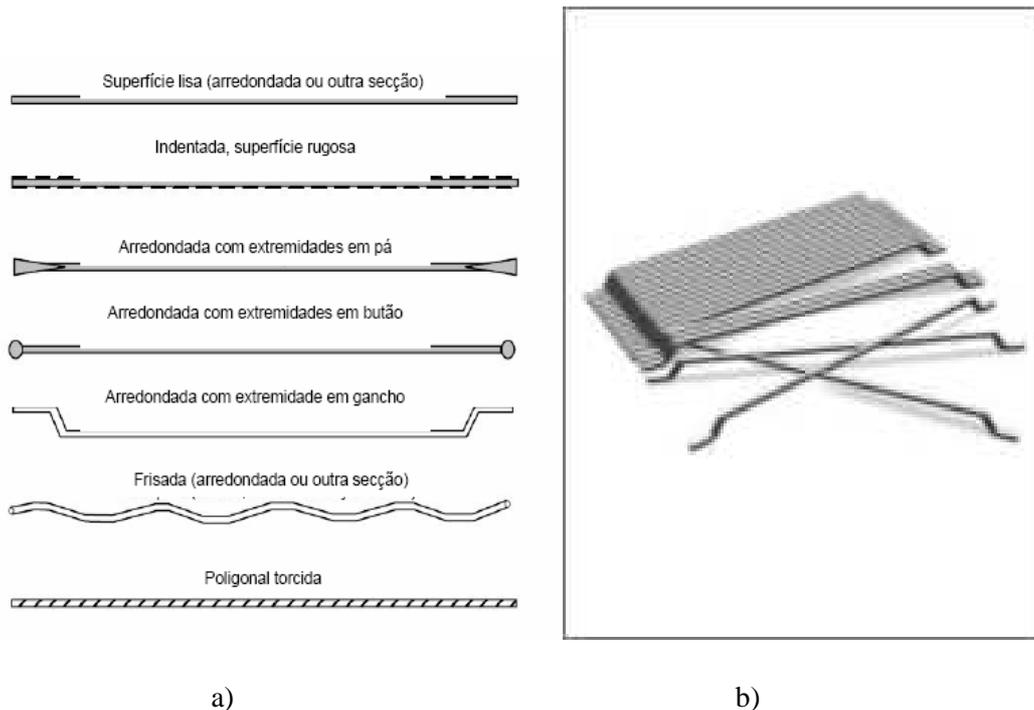


Figura 19 – a) Tipos de fibras comercializados b) fibras Dramix usadas no presente ensaio

De referir ainda que estudos anteriormente realizados por Won, Lim e Park (2006) indicam a deformação ao longo do seu comprimento como o método mais eficaz na promoção da aderência fibra-matriz. De facto a fibra frisada (crimped) apresenta melhores resultados a nível da aderência na interface e na carga de arrancamento, quando comparadas com as fibras torcidas, com extremidades alargadas, sinusoidais, com gancho, double duoform ou lisas. A optimização da geometria está apresentada na Figura 20 onde se pode ler uma amplitude de $\lambda=6\text{mm}$ e uma altura $a_0=1.8\text{mm}$ (Ferreira, 2008).

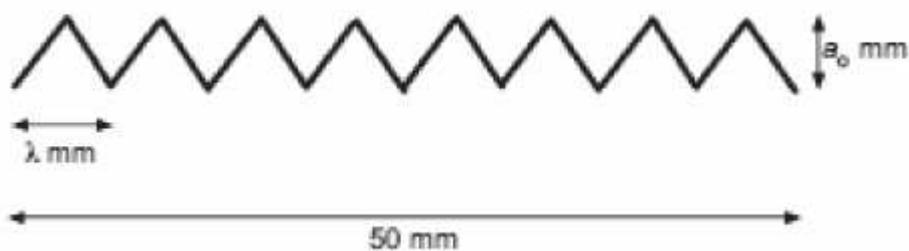


Figura 20 – Esquema de fibra sintética

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

No decorrer do projecto acima apresentado, foi elaborado um plano de trabalhos que engloba um conjunto de ensaios e pesquisas que visam a análise dos pressupostos do presente estudo. A metodologia do programa foi definida tendo em conta projectos de investigação anteriormente realizados, assim como práticas comuns.

As pesquisas feitas, reportam sobretudo à caracterização dos materiais constituintes das matrizes dos betões em estudo, assim como, à observação em microscópio electrónico de amostras dos mesmos.

O programa experimental foi determinado com base em critérios de avaliação das características dos betões pretendidas para o estudo, sendo naturalmente os parâmetros de durabilidade, os mais visados no conjunto de ensaios que se passa a indicar:

- Ensaio de “*Slump test*” (NP EN 12350-2);
- Ensaio de *resistências superficial* (NP EN 12504-2);
- Ensaio de *resistencia à compressão* (NP EN 12390-3)
- Ensaio de *resistencia à flexão* (NP EN 12390-5)
- Ensaio de *carbonatação acelerada* (E 391);
- Ensaio de *absorção de água por capilaridade* (E 393 e RILEM TC 116 PCD);
- Ensaio de *penetração acelerada por cloretos* (E463);
- Ensaio de *resistividade eléctrica* (RILEM TC 154-EMC).
- Ensaio de *penetração de água sob pressão* (NP EN 12390-8).

De forma a facilitar a compreensão dos trabalhos realizados, entendeu-se dividir este capítulo em três pontos essenciais, que são apresentados nos sub-capítulos que se seguem.

- Metodologia dos trabalhos;
- Caracterização dos materiais; (Capítulo referente às betonagens e ao microscópio electrónico)
- Ensaios: descrição e resultados;

Como é vulgar em qualquer pesquisa científica, importa referir que se pretende enunciar neste capítulo, além da descrição dos trabalhos, justificações para o programa escolhido assim como, as suas limitações, erros e obstáculos encontrados no estudo em questão.

3.2. METODOLOGIA DOS TRABALHOS

3.2.1. INTRODUÇÃO

De forma a realizar o presente estudo foi idealizada uma estratégia cujo principal objectivo era obter o máximo de provetes possíveis para ensaiar, ao mesmo tempo que se rentabilizavam os recursos ao nosso dispor.

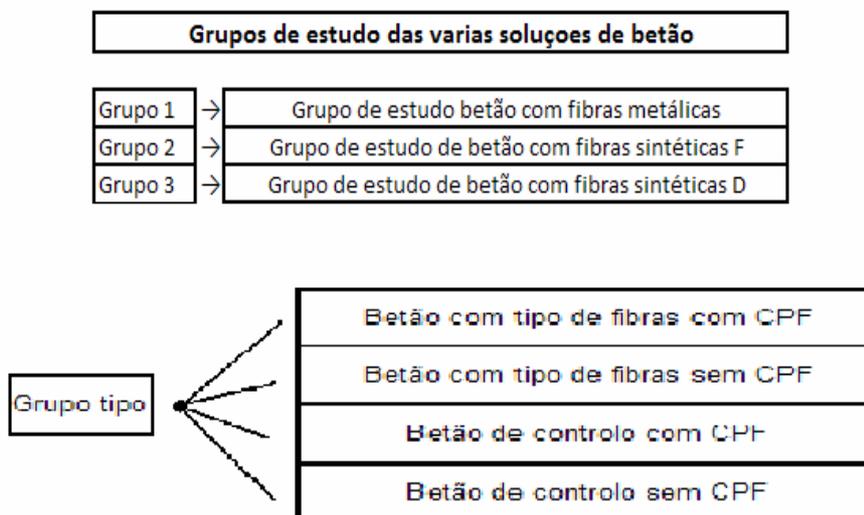
Como se descreve no próximo ponto, foi essencial conformar a nossa investigação aos meios existentes, sendo disso exemplo certas adaptações a normas de ensaios. Estes ajustes não desvirtuam o espírito do trabalho uma vez que todos os parâmetros analisados, visam valores relativos e não valores absolutos, ou seja, mais importante que obter valores absolutos e normativos, o que se pretendeu foi comparar provetes de características diferentes mas ensaiados em condições idênticas e daí extrair valores que exprimem as diferenças entre as várias soluções.

Pode-se dizer que o projecto incidiu em três grandes grupos, proporcionando cada um destes grupos 4 tipos de soluções distintas:

- Betão com fibras metálicas;
- Betão com fibras sintéticas durofibril;
- Betão com fibras sintéticas fisipe;

Cada um destes grupos forneceu um estudo comparativo do betão em estudo com um betão de controlo com igual composição, usando-se para cada um dos 2 betões, 2 soluções de cofragem diferentes: Cofragem com CPF e cofragem sem CPF. O quadro seguinte ilustra as diferentes amostras obtidas para cada grupo acima enunciado.

Quadro 2 – Grupos de betão estudados



3.2.1. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

De forma a reunir o conjunto de provetes necessários para o presente projecto, optou-se por uma solução que consiste em moldar paredes e obter posteriormente provetes através de uma caroteadora ou de uma serra de corte. Além destes provetes que como se verá adiante, interessaram sobretudo para avaliação de parametros de durabilidade, produziram-se também um conjunto de cubos e prismas normalizados de forma a aferir das resistencias mecanicas dos betões em estudo.

Em relação aos provetes incorporando as fibras metálicas e as fibras sintéticas houve diferenças no método escolhido, devido sobretudo às limitações de recursos existentes para os vários trabalhos. Assim nos pontos seguintes descreve-se sumariamente as opções preconizadas para os diferentes grupos de betonagem.

3.2.1.1 Fibras metálicas

O grupo de betão com fibras metálicas foi betonado segundo a seguinte disposição:

- Uma parede betonada com betão com fibras metálicas. Cada face das paredes apresentou duas formas distintas de cofragem: uma face de cofragem com CPF e outra face sem CPF;
- Uma parede betonada com betão de controlo de composição idêntica à do betão com fibras excluindo, naturalmente as fibras metálicas e apresentando a mesmas soluções de cofragem enunciada no ponto anterior;
- Tres provetes cúbicos com betão com fibras, de dimensões - 0.15m X 0.15m X 0.15m
- Três provetes cúbicos com betão de controlo, de dimensões - 0.15m X 0.15m X 0.15m
- Um prisma de betão com fibras de dimensao - 0.15m X 0.15m X 0.55m
- Um prisma de betão de controlo de dimensão – 0.15m X 0.15m X 0.55m



Figura 21 –Provetes de betão com fibras

3.2.1.2 Fibras sintéticas

Neste tipo de fibras, de forma a otimizar o uso dos materiais previstos, optou-se por dividir em duas, cada parede de dimensões originais semelhantes às das utilizadas no betão com fibras metálicas, conseguindo assim em cada parede preconizar os quatro modelos em estudo, ou seja utilizar uma parede para cada grupo.

A Figura 22 ilustra os dois tipos de cofragem utilizados na betonagem das paredes que deram origem ao conjuntos provetes usados no programa experimental. Assim, facilmente se vê que numa das faces interiores da cofragem foi incorporado CPF enquanto que na face oposta, a superfície de contacto foi o molde original.



Figura 22 – a) Parede betonada b) esquema de parede betonada

A Figura 23, complementa a anterior, ao representar o tipo de betão usado em cada uma das meias paredes. Assim cada um dos volumes foi cheio de betão com o tipo de fibras pré-definido e o respectivo betão de controlo. O volume de cada meia parede é de aproximadamente de 54 litros.

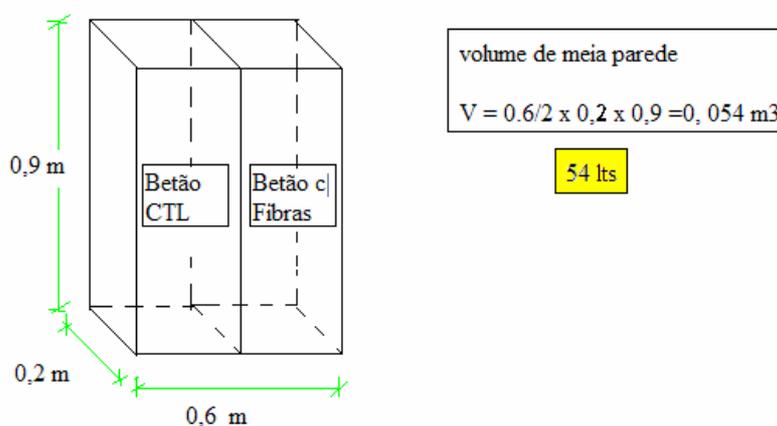


Figura 23 – Esquema de parede betonada com fibras sintéticas

Na figura que se segue está representado o esquema de carotes e provetes serrados que se obtiveram a partir da parede betonada.

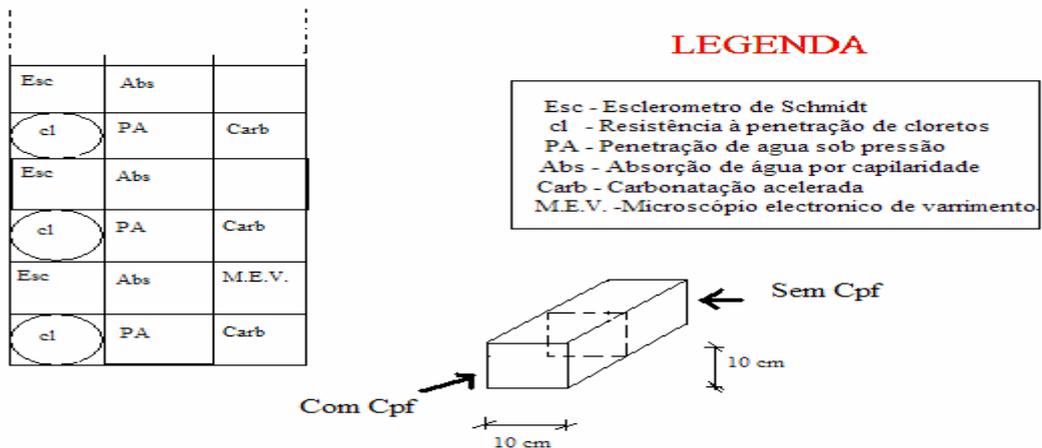


Figura 24 – Esquema de carotes e provetes serrados por cada meia parede.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.3.1. INTRODUÇÃO

O primeiro grupo de betões a ser produzido foi o de fibras metálicas. Procurou-se que estes betões tivessem composição idêntica excepto no que respeita às fibras. Em relação ao 2ª e 3ª grupo, correspondentes a grupos de fibras sintéticas, foi garantida uma mesma composição entre eles, mas não foi possível manter a composição do 1º grupo. Isto ficou-se a dever ao facto de as betonagens terem ocorrido com um intervalo elevado de tempo, não havendo na altura da segunda e terceira betonagem os mesmos materiais disponíveis.

Nos grupos de fibras sintéticas, visto haver uma menor necessidade de volume de betão, conseguiu-se com apenas duas betonagens satisfazer o pretendido. Com o objectivo de evitar que pequenas diferenças nas betonagens pudessem influenciar os resultados, recorreu-se ao seguinte método:

- Realizou-se uma amassadura de 80 litros;
- Encheram-se 2 baldes com 40 litros cada;
- Encheu-se uma das meias paredes com um dos baldes (Betão sem fibras);
- Colocou-se o conteúdo do segundo balde na betoneira e juntaram-se as fibras;
- Encheu-se a outra meia parede com o betão do segundo balde (Betão com fibras)
- Repetiu-se todo o processo com uma nova amassadura.
- Encheram-se as respectivas meias paredes e o conjunto de provetes correspondentes.

Através deste processo garantiu-se que qualquer diferença possível na altura da betonagem não influenciaria os resultados finais, pois cada tipo de betão surge como uma mistura de duas amassaduras.

No grupo de fibras metálicas não se usou este método, por limitações de volumes de betão usado, obrigando-nos por isso, a ter maior atenção a todos os condicionantes que podem levar a diferenças no betão como por exemplo , o tempo de amassadura.

3.3.2. COMPOSIÇÃO DO BETÃO

Apresenta-se de seguida a composição dos betões para o estudo presente. Perante a infinidade de possíveis quantidades e diversidade de materiais constituintes de um betão, optou-se pelas composições traduzidas no Quadro 3, de forma a garantir à partida um betão de franca qualidade que como já se viu no capítulo 2, sofre teoricamente uma melhoria menos acentuada com a presença do CPF. Além disso foi necessário garantir que as composições eram adequadas ao uso de fibras.

Quadro 3 – Composição dos betões estudados

Composição betão						
Materiais	Betão 1		Betão 2		Betão 3	
	Com fibras	sem fibras	Com fibras	sem fibras	Com fibras	sem fibras
Cimento	35,7 kg	35,7 kg	32,00 kg	32,00 kg	32,00 kg	32,00 kg
Água	12,17 kg	12,17 kg	16,40 kg	16,40 kg	16,40 kg	16,40 kg
brita grauda	43,23 kg	43,23 kg	35,92 kg	35,92 kg	35,92 kg	35,92 kg
brita pequena	45,47kg	45,47kg	37,84 kg	37,84 kg	37,84 kg	37,84 kg
areia grossa	27,77 kg	27,77 kg	32,24 kg	32,24 kg	32,24 kg	32,24 kg
areia fina	31,73 kg	31,73 kg	34,16 kg	34,16 kg	34,16 kg	34,16 kg
silica	0,674 kg	0,674 kg	-	-	-	-
Superplastificante	0,643kg	0,643kg	-	-	-	-
fibras	2,38 kg	-	0,024 kg		0,024 kg	
Amassadura	85 l	85 l	80 l	80 l	80 l	80 l

3.3.3. MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE VARRIMENTO (M.E.V.)

No decorrer dos trabalhos deste projecto foram realizadas várias visitas ao microscópio electrónico de varrimento que se encontra na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Pretendeu-se sobretudo avaliar e comparar dois pormenores estruturais dos betões acima apresentados: O aspecto da superfície de contacto entre o betão e a cofragem e ainda a aderência das fibras à matriz do betão.

No conjunto de imagens que se segue é facilmente perceptível a diferença entre as superfícies de dois betões com soluções de cofragem diferentes. O betão da Figura 25 a) corresponde a uma superfície com cofragem tradicional enquanto que o betão da Figura 25 b) representa um material cofrado com CPF.

A diferença que é também perceptível à vista desarmada, consiste sobretudo na regularização da superfície em questão. Um betão cofrado com um molde tradicional sem CPF apresenta um conjunto de imperfeições de superfície quer ao nível macro estrutural (visível a olho nu) quer ao nível micro-estrutural (apenas visível com auxílio do microscópio). O betão cofrado com CPF apresenta uma estrutura muito mais regular como se pode confirmar na Figura 25 b). isto ilustra desde logo as vantagens apresentadas no capítulo 2: redução de custos em acabamentos, e qualidade da superfície de contacto com os agentes agressivos melhorada.

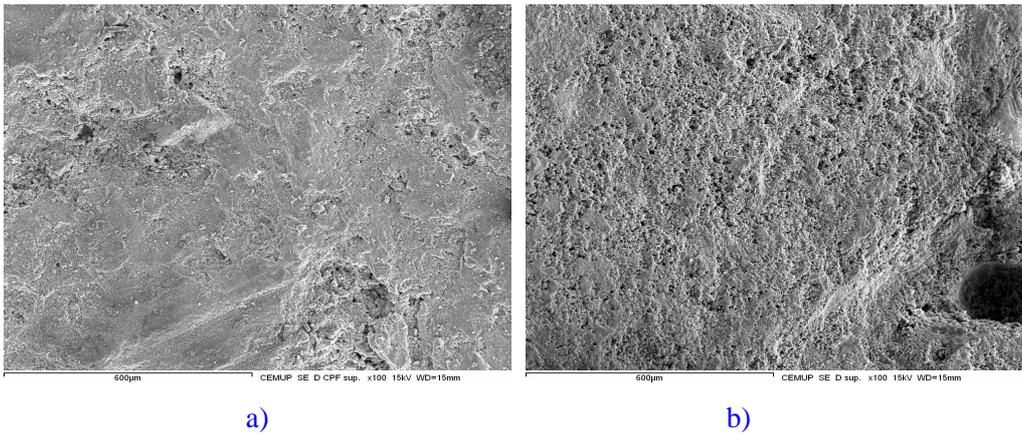


Figura 25 – a) Amostra da superfície do betão cofrado com CPF visto no microscópio electrónico
b) Amostra da superfície do betão cofrado tradicionalmente visto no microscópio electrónico

O outro aspecto estrutural que se mostrou útil analisar foi a aderência das fibras ao betão. Tendo as amostras levadas ao M.E.V, resultado de um rotura com o material inicial, é natural que as fibras tenham quebrado, ficando por isso com uma extremidade solta da matriz. A Figura 26 mostra dois planos das amostras analisadas, sendo 26 a) correspondente a um betão com fibras metálicas e 26 b) a um betão com fibras sintéticas. Em ambos os casos vê-se claramente a ligação do material às fibras, aspecto fundamental no comportamento estrutural de um betão com fibras como já foi anteriormente falado no capítulo 2.

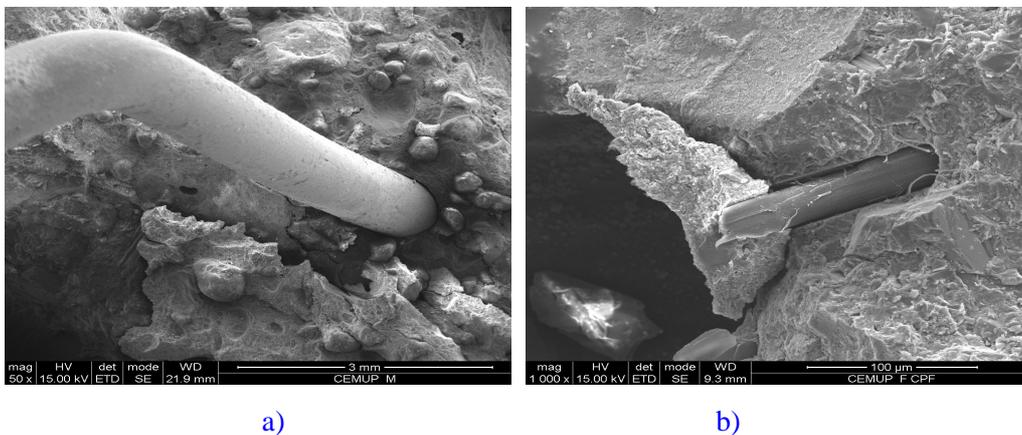


Figura 26 – a) Amostra da superfície do betão com fibras metálicas visto no microscópio electrónico
b) Amostra da superfície do betão com fibras sintéticas visto no microscópio electrónico

3.4. ENSAIOS

3.4.1. INTRODUÇÃO

Neste projecto foram realizados vários ensaios que se passam a descrever nos sub-capítulos que se seguem. Devido ao número elevado de provetes ensaiados, enunciam-se, em forma de resumo, as quantidades e os tipos de amostras usados em cada um dos ensaios.

- Ensaio de trabalhabilidade: amostras de betão fresco com um volume igual ao do cone de Abrahams cuja a descrição se encontra no sub-capítulo 3.4.2.1;
- Ensaio de resistencia superficial : 12 faces de paredes onde no total foram ensaiados 324 pontos para avaliação do índice esclerométrico;
- Ensaio de resistencia à compressão: 18 Provetes cúbicos de 15 cm de aresta;
- Ensaio de resistencia à flexão: 6 provetes prismáticos de dimensoes iguais a 15x15x55 cm;
- Ensaio de Carbonatação: 16 provetes cubicos de fibras sintéticas e respectivo controlo, resultantes da serração das paredes e ainda 8 provetes cilindricos de fibras metálicas e o seu betão de controlo correspondente de dimensões iguais a metade das carotes extraidas das paredes iniciais;
- Ensaio de penetração de cloretos e Resistividade: 24 provetes cilíndricos de dimensões igual a 10 cm de diametro e 5 cm de altura;
- Ensaio de absorção de água por capilaridade: 36 provetes, sendo 24 destes de qualidade e dimensões iguais aos 16 referidos para o ensaio de carbonatação e naturalmente os 12 restantes iguais aos provetes do grupo de fibras metálicas usados para o mesmo ensaio;
- Ensaio de penetração de água sob pressão: 36 provetes obtidos exactamente do mesmo modo do enunciado no ponto anterior.

Na figura 27 podemos observar parte do conjunto dos provetes ensaiados no decorrer deste projecto de investigação



Figura 27 – Amostra do conjunto de provetes ensaiados durante a realização deste projecto

De forma a tornar mais facil o entendimento do programa experimental, atribuiram-se siglas aos provetes ensaiados. A correspondencia entre cada sigla e o tipo de betão ensaiado pode ser observada no quadro seguinte.

Quadro 4 – Abreviações dos provetes

TIPOS E SIGLAS DOS PROVETES		
	Betão com fibras metálicas Dramix	→ M
Grupo I	Betão com fibras metálicas Dramix com CPF	→ M CPF
	Betão controlo de fibras metálicas Dramix	→ CTL M
	Betão controlo de fibras metálicas Dramix com CPF	→ CTL M CPF
	Betão com fibras sintéticas Fisipe	→ F
Grupo II	Betão com fibras sintéticas Fisipe com CPF	→ F CPF
	Betão controlo de fibras sintéticas Fisipe	→ CTL F
	Betão controlo de fibras sintéticas Fisipe com CPF	→ CTL F CPF
	Betão com fibras sintéticas Durofibril	→ D
Grupo III	Betão com fibras sintéticas Durofibril com CPF	→ D CPF
	Betão controlo de fibras sintéticas Durofibril	→ CTL D
	Betão controlo de fibras sintéticas Durofibril com CPF	→ CTL D CPF

3.4.2. ENSAIOS DE TRABALHABILIDADE

3.4.2.1 “Slump test”

Para cada betonagem, foi realizado um ensaio de abaixamento denominado “slump test”. Este ensaio seguiu os pressupostos da norma NP EN 12350-2. Este ensaio tem como objectivo avaliar a trabalhabilidade um betão fresco, relacionando o abaixamento sofrido por uma amostra de betão contido num molde tronco-cónico (cone de abrahams) no momento em que este é removido e a sua consistencia.

Para se realizar este trabalho procedeu-se da seguinte forma:

- Humedeceu-se previamente um tabuleiro e o cone Abrahams.
- Colocando o molde fixo à superfície encheu-se o cone com três camadas de betão da amassadura, sendo que, cada camada foi consecutivamente apiloada com 25 pancadas e a camada superficial devidamente regularizada.
- Após este procedimento retirou-se o molde tronco-cónico e registou-se a leitura da diferença de altura entre o topo do cone e a altura natural do próprio betão após ter sofrido um abaixamento conforme está esquematizado na Figura 28.

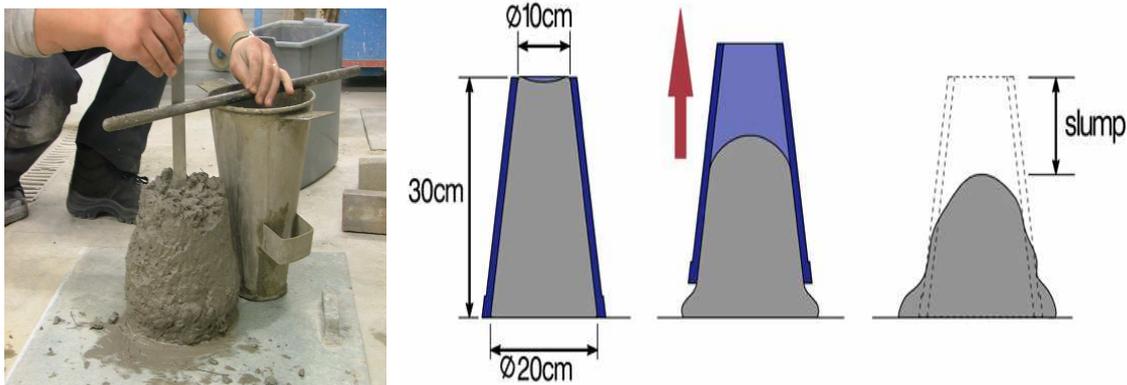


Figura 28 – Ensaio de “slump test” e respectivo esquema

A leitura da diferença de alturas dá-nos o valor do “slump test”. Estes valores registados indicam-nos a classe do Betão em termos de consistência para avaliar a trabalhabilidade. A ferramenta onde podemos relacionar os parametros obtidos do ensaio slump e a sua classe de consistência é o quadro de abaixamento que se encontra em anexo neste trabalho.

De seguida apresentam-se os resultados dos vários betões e a respectiva classe de consistência.

Quadro 5 – Resultado ensaio de abaixamento

		Abaixamento
1º grupo Fibras metálicas	1ª amassadura	190mm
	2ª amassadura	180mm
	3ª amassadura	190mm
	4ª amassadura	190mm
2º grupo Fibras sintéticas D	1ª amassadura	130mm
	2ª amassadura	150mm
3º grupo Fibras sintéticas F	1ª amassadura	140mm
	2ª amassadura	150mm

3.4.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIAS MECANICAS

3.4.3.1 Resistência superficial

Neste ensaio procurou-se avaliar e comparar as resistências superficiais entre cada tipo de betão com fibras e o respectivo betão de controlo.

Para isso seguiu-se a norma NP EN 12504-2 em que está especificado o ensaio esclerométrico que consiste na utilização de um aparelho designado esclerómetro de Schmidt (figura 29), que permite relacionar através de equações algo complexas, o impacto e ressalto de uma massa normalizada contra a superfície do betão. Estes parâmetros fornecem uma leitura no próprio aparelho que será posteriormente analisada num ábaco que correlaciona o índice esclerométrico com a resistência á compressão no betão ensaiado. Este ábaco que depende naturalmente da posição do esclerómetro em relação ao plano horizontal, encontra-se em anexo ao presente trabalho para a devida consulta.



Figura 29 – Esclerómetro de Schmidt

Como já foi referido, este ensaio seguiu as especificações da norma NP EN 12504-2, importando agora descrever o seu procedimento. Com efeito, foram considerados 3 níveis em cada parede ensaiada. Em Cada nível definiu-se uma zona de sensivelmente 10 x 10 cm, na qual se fez 9 leituras, cada uma distanciada da mais próxima pelo menos 2,5 cm. Evitaram-se zonas cujo acabamento pudesse ser irregular tais como superfícies demasiadamente rugosas ou porosas. O esquema da Figura 30 ilustra o procedimento.

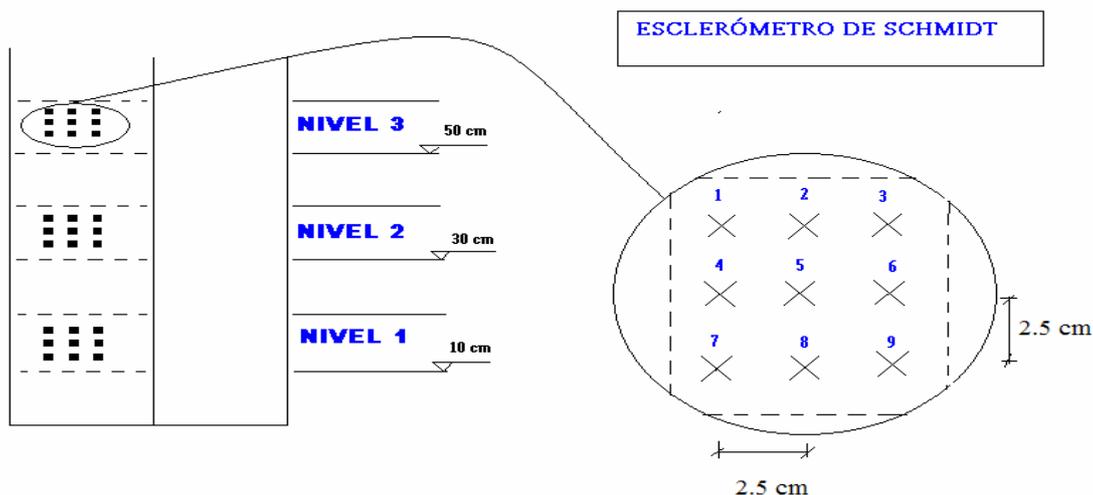


Figura 30 –Esquema de ensaio - Esclerómetro de Schmidt

Para avaliação dos resultados obtidos no ensaio foi necessário estabelecer os seguintes pressupostos:

- O esclerómetro apresentava-se devidamente calibrado no início dos trabalhos e verificou-se a continuidade da eficácia do equipamento no fim do ensaio.
- O esclerómetro manteve a sua inclinação constante em todos os pontos ensaiados, e essa posição foi a de paralela a um plano horizontal.
- O valor considerado para cada zona foi o correspondente à mediana e, no caso de 20% ou mais das leituras diferirem da mediana em mais do que 6 unidades, repetiu-se o conjunto de leituras.

De seguida apresenta-se o quadro resumo com os resultados do ensaio. Em anexo encontram-se os resultados totais que se verificaram na realização dos trabalhos descritos

Quadro 6 – Resultado ensaio de resistência superficial

	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Média	
	Índice esclorométrico	Índice esclorométrico	Índice esclorométrico	Índice esclorométrico	Resistencia compressão MPa
M CPF	44	46	44	44,67	48,00
M	44	42	43	43,00	46,00
CTL M CPF	46	48	48	47,33	55,00
CTL M	42	40	46	42,67	46,00
F CPF	43	45	42	43,33	47,00
F	33	32	30	31,67	26,00
CTL F CPF	47	49	49	48,33	56,00
CTL F	33	33	33	33,00	29,00
D CPF	42	44	43	43,00	46,00
D	33	33	32	32,67	26,00
CTL D CPF	48	51	46	48,33	56,00
CTL D	32	30	32	31,33	25,00

3.4.3.2 Resistência à compressão

Seguiu-se a norma NP EN 12390-3 para avaliar as resistências dos betões obtidos no trabalho. O ensaio de resistência a compressão é provavelmente o ensaio mais realizado até hoje, em estudos das características estruturais de um betão. É por esta razão que a classificação mais usual deste material tem por base a aferição da sua resistência mecânica. Assim, é comum a designação de um betão C x/y Sendo x a sua tensão de rotura num ensaio com cilindros normalizados e y o valor do mesmo parâmetro obtido através do ensaio em cubos.

No presente trabalho, foram utilizados cubos normalizados de 15 cm de aresta submetidos a uma força de compressão uniaxial como mostra a Figura 31 b). Nesse sentido, foi utilizado o equipamento existente no laboratório de ensaio de materiais de construção (LEMC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A Figura 31 a) mostra a prensa mecânica onde foram realizados os ensaios.

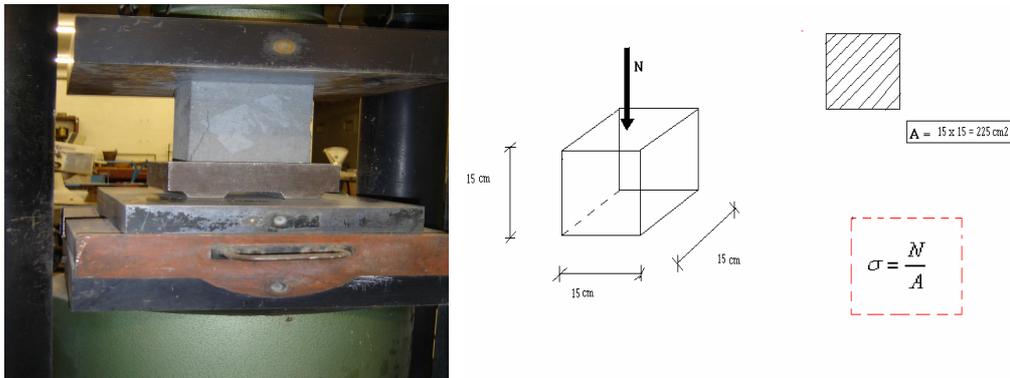


Figura 31 – a) Prensa mecânica do LEMC b) Esquema de ensaio de compressão

Para se proceder a este ensaio foram realizados três provetes para cada tipo de betão com fibras e respectivo betão de controlo. Estes provetes obtidos pelo enchimento de moldes normalizados no momento das amassaduras, foram ensaiados aos 28 dias de idade, tal como está preconizado na norma.

A prensa mecânica faz actuar uma força vertical sobre a secção considerada, fazendo-se a leitura da carga máxima actuante imediatamente antes da rotura do provete. Esta leitura permite obter a resistência a compressão do respectivo betão através da seguinte equação:

$$\sigma_{compressão} = \frac{p}{A} \quad (11)$$

Em que:

p é a carga máxima à rotura, obtida no ensaio, convertida em Newtons e

A é a área em contacto do provete com a prensa, em milímetros quadrados.

De seguida apresentam-se os resultados das tensões de rotura obtidas para os vários provetes ensaiados. Podemos também encontrar em anexo a este trabalho, os valores que resultaram da pesagem dos provetes assim como os valores originais das cargas obtidos pelo equipamento em toneladas.

Quadro 7 – Resultado ensaio de resistência à compressão

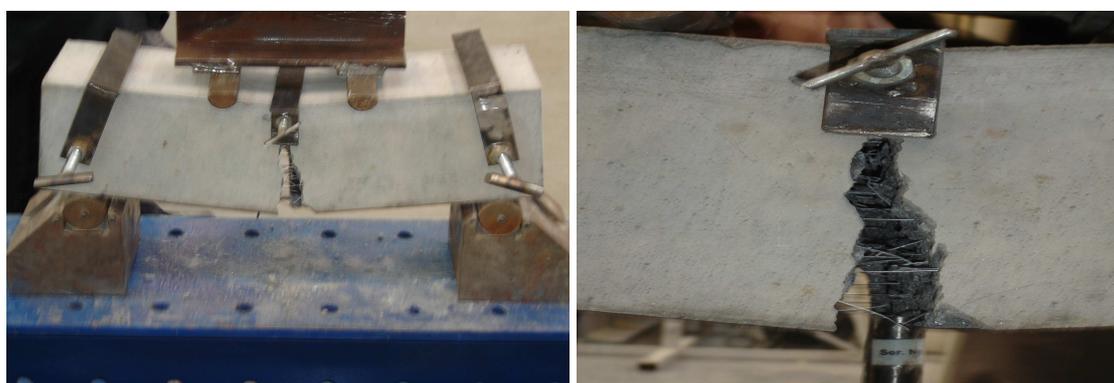
	Provete1 (Mpa)	Provete2 (MPa)	Provete3 (MPa)	Média (MPa)
M	32,7	36,6	47,1	38,80
CTL M	54,1	54,9	55,8	54,90
F	49,7	52,3	50,6	50,87
CTL F	54,1	53,2	51,0	52,76
D	57,1	53,2	51,9	54,06
CTL D	50,1	51,0	49,7	50,29

3.4.3.3 Resistência à flexão

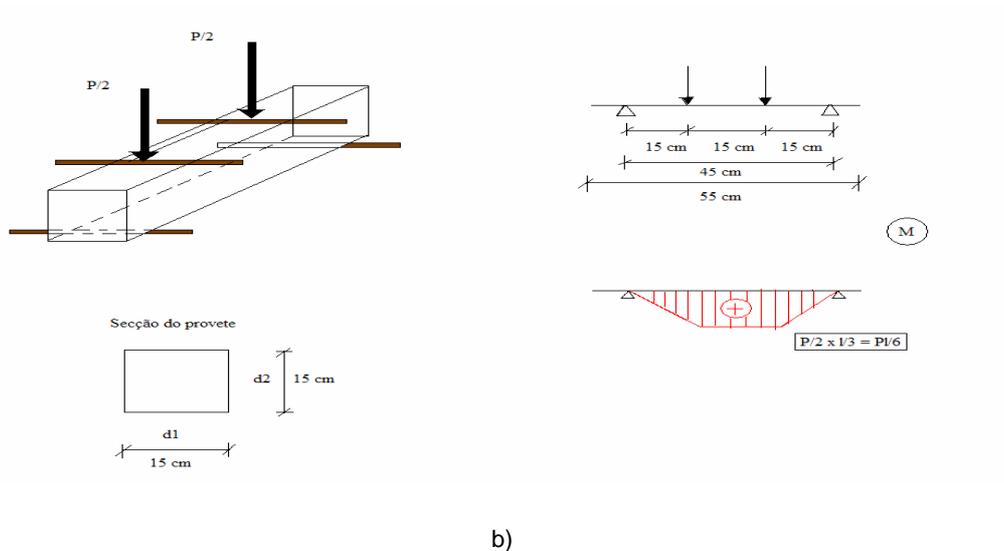
Uma das características mais originais do betão prende-se com a diferença que este material apresenta no que diz respeito à resistência à compressão e à resistência à tracção. Enquanto materiais homogéneos como o aço e a madeira, apresentam tensões de rotura idênticas quer para fibras comprimidas quer para fibras traccionadas, a verdade é que o betão apresenta resistências à tracção na ordem dos 10 % das resistências à compressão. É por este motivo que, muitas vezes para cálculo estrutural nem sequer se considera a contribuição do betão para efeitos de tracção.

No entanto não deixa de ser importante aferir das características deste material quando traccionado, sobretudo quando estamos a falar de betão com fibras, cujo papel estrutural está intimamente relacionado com forças de tracção. É ainda essencial analisar um parâmetro fundamental no desempenho estrutural de um betão: a ductilidade. É exactamente o aumento de ductilidade que é garantido pela inclusão das fibras na matriz de um betão.

Este comportamento é muito mais significativo nas fibras metálicas que têm um papel macro-estrutural do que nas fibras sintéticas que têm um papel micro-estrutural como já foi referido no capítulo 2. No presente ensaio, tal como no ensaio a compressão, foram preparados provetes prismáticos aquando da realização das amassaduras. Provetes esses, que foram ensaiados com 28 dias de idade. Os ensaios foram realizados usando o equipamento para o efeito existente no LEMC. A figura 32 a) corresponde a uma fotografia tirada no local ao equipamento enquanto a figura 32 b) traduz o esquema do ensaio.



a)



b) Figura 32 – Ensaio a flexão de um provete com fibras metálicas b) Esquema de ensaio à flexão
 Obtidos os valores da carga p, para a qual o provete entrou em rotura pode-se facilmente chegar à resistência através das fórmulas abaixo descritas:

$$\sigma = \frac{M}{I} \times y \quad (12) \quad \text{com,} \quad M = \frac{p \times l}{6} \quad (13) \quad , \quad I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (14) \quad \text{e} \quad y = \frac{h}{2} \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{\frac{p \times l}{6}}{\frac{d1 \times d2^3}{12}} \times \frac{d2}{2} \Leftrightarrow \sigma_{flexao} = \frac{p \times l}{d1 \times d2^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{flexao} = \frac{p \times l}{d1 \times d2^2} \quad (17)$$

Em que:

p - é a carga máxima à rotura, obtida no ensaio, convertida em Newtons;

l - é a distancia entre os apoios

d1 e d2 - são os lados da secção que no presente ensaio são iguais (d1=d2)

No caso do ensaio das fibras metálicas, a carga foi aplicada a meio vão tendo-se por isso que substituir o valor do momento por P*l/4. assim teremos :

$$\sigma_{flexao} = \frac{1,5 \times p \times l}{d1 \times d2^2} \quad (18)$$

Apresenta-se seguidamente o quadro com os resultados encontrados neste ensaio

Quadro 8 – Resultado ensaio de resistência à flexão

Provete	Resultado ensaio		TENSOES
	Peso (kg)	Carga(ton)	MPa
M	29,9	4,8	9,6
CTL M	30,1	4,1	8,2
F	29,5	4,3	6,9
CTL F	30,0	4,2	6,7
D	29,3	3,6	5,8
CTL D	29,5	3,4	5,4

3.4.4. ENSAIOS DE DURABILIDADE

3.4.4.1 Carbonatação Acelerada

Como já foi explicado no capítulo 2.2, uma redução do pH do betão tem consequências nefastas para um estrutura, uma vez que promove a despassivação da armadura e consequentemente contribui para o processo de corrosão das mesmas. Quando a alta alcalinidade se perde pela acção do gás carbónico pode-se afirmar que estamos perante um fenómeno de carbonatação.

É por este motivo, que se tem vindo cada vez mais, a recorrer ao ensaio de carbonatação acelerada para avaliar os parâmetros de durabilidade dos betões, ensaio esse descrito na especificação do LNEC E 391

O ensaio de carbonatação acelerada simula num tempo mais curto, o processo lento e contínuo que uma estrutura de betão armado está sujeito quando em exposição directa com o espaço ambiental.

Neste trabalho usou-se a camara de carbonatação existente no Laboratório de Estruturas (LABEST) da F.E.U.P.. Foram colocados 2 amostras de cada um dos tipos de betões constituintes dos grupos a estudar, dentro da câmara onde permaneceram cerca de 2 meses. A Figura 33 a) corresponde ao equipamento usado para o efeito, enquanto que na Figura 33 b) se pode observar os provetes que se colocaram dentro da camara de carbonatação.



Figura 33 – a) Câmara de carbonatação b) Provetes na câmara de carbonatação

O aparelho referido garante o contacto dos provetes com uma humidade relativa (HR) de 65%, sendo a temperatura aproximadamente de 20°C, e ainda com uma concentração de CO₂ de 5%. Estes parâmetros são controlados por sensores localizados no interior do aparelho.

Após os 60 dias, os provetes foram retirados da câmara de carbonatação, sendo de seguida abertos ao meio com recurso a prensa existente no LEMC. Assim, pode-se avaliar a profundidade de carbonatação dos provetes ensaiados.

Para aferir da profundidade de carbonatação resultante do ensaio foi necessário recorrer a uma solução de fenoftaleína que quando em contacto com um betão são e um betão carbonatado assume diferentes colorações. É exactamente esta diferença de cor que nos permite observar a que distancia da superfície o betão já se encontra carbonatado.

A Figura 34 demonstra um grupo de provetes ensaiados e o respectivo esquema de leitura dos dados observados.

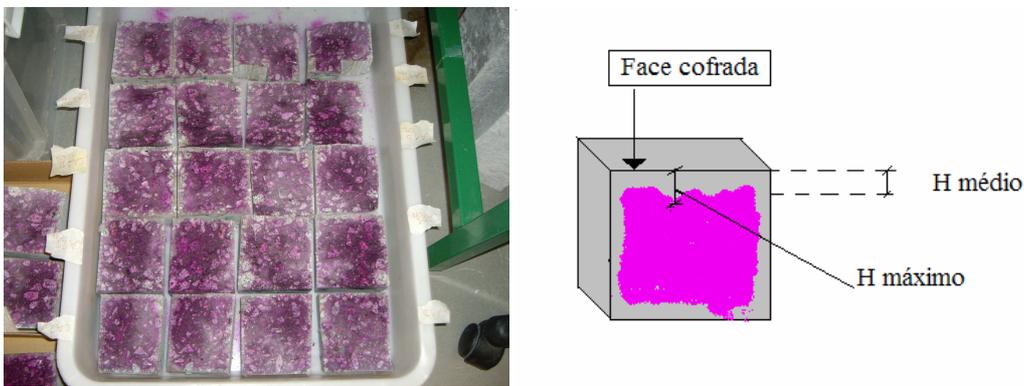


Figura 34- Provetes pulverizados com fenoftaleína e esquema de leitura da profundidade de carbonatação

O Quadro 9 apresenta o resumo dos resultados obtidos neste ensaio de carbonatação acelerada. Em anexo ao presente trabalho podem ser encontrados os resultados totais do ensaio

Quadro 9 – Resultado ensaio de carbonatação

	Profundidade de carbonatação (mm)
	Média
D	7,0 ± 1,4
D CPF	1,3 ± 1,1
CTL D	7,8 ± 3,5
CTL D CPF	1,2 ± 0,0
F	7,8 ± 1,1
F CPF	1,2 ± 0,0
CTL F	8,5 ± 0,7
CTL F CPF	2,0 ± 1,4
M	11,5 ± 0,7
M CPF	4,3 ± 1,0
CTL M	12,0 ± 1,4
CTL M CPF	5,5 ± 0,7

3.4.4.2 Cloretos

A penetração de cloretos numa estrutura de betão armado é bastante prejudicial, pois tal como o fenómeno de carbonatação, contribui para um processo de corrosão, ainda que não generalizado na armadura.

Por tal motivo, entendeu-se fundamental a realização do ensaio de penetração de cloretos descrito na norma E463 . Este ensaio decorreu no laboratório de durabilidade da FEUP

O ensaio de migração acelerado, que se baseia em relações teóricas de fenómenos de difusão e migração, consiste em submeter um provete de forma cilíndrica, com medidas normalizadas (altura de 5,0 cm e diâmetro de 10,0 cm) a uma diferença de potencial de 30 V durante 24 horas. Os cloretos são obrigados a migrar de uma solução de cloreto de sódio, sujeita a uma carga negativa, através do betão saturado até a face oposta do provete em contacto com uma solução de hidróxido de sódio carregada positivamente. Neste trabalho foi usada uma solução de 3% de NaCl para o cátodo enquanto para o ânodo foi utilizada uma solução de 12g de NaOH por litro de água destilada.

Após termos obtido os provetes cilíndricos com as dimensões normalizadas (figura 35 a) , estes foram introduzidos num equipamento de saturação por vácuo que é constituído por um recipiente com campânula, uma bomba de vácuo, um manómetro e um recipiente para água. Este equipamento está documentado na Figura 35 b).



Figura 35 – a) Provette de ensaio aos cloretos b) Equipamento de saturação por vácuo

Para aplicação de diferença de potencia aplicou-se o equipamento ilustrado na Figura 36 a) e 36 b) e que é formado por uma fonte de alimentação, células acrílicas com anéis de estaquidade, cabos condutores e termómetros eléctricos.



Figura 36 – a) Células acrílicas do ensaio aos cloretos b) Equipamento de registo de resultados

Seguidamente, os provetes foram abertos por compressão linear, tendo sido as superfícies de fractura pulverizadas com uma solução de nitrato de prata que, quando em contacto com o betão apresenta diferentes colorações consoante está na presença de cloretos ou não. Fizeram-se então 7 leituras espaçadas de 1 mm em cada metade dos provetes iniciais e registou-se o seu valor.

É este valor que ao ser relacionado com outros parâmetros permite obter o valor do coeficiente de difusão em regime não estacionário (DNS) . Na Figura 37 podemos observar um conjunto de provetes ensaiados assim como o respectivo esquema para a obtenção dos valores atrás referidos.

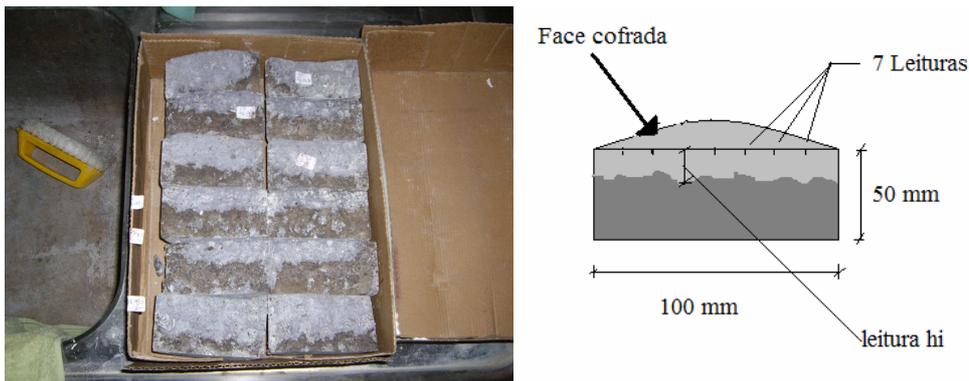


Figura 37 – Provetes ensaiados e respectivo esquema de ensaio

Como já foi referido o valor pretendido neste ensaio é o valor de DNS. Este valor é calculado com base na seguinte equação

$$D = \frac{0,0239 \times (273 + T) \times L}{(U - 2) \times t} \left(x_d - 0,0238 \times \sqrt{\frac{(273 + T) \times L \times x_d}{U - 2}} \right) \quad (19)$$

Em que:

D é o coeficiente de difusão no estado não estacionário, em $\times 10^{-12} m^2/s$;

U é o valor da voltagem aplicada, em volts;

T é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, em °C;

L é a espessura do provete, em milímetros;

X_d é o valor médio da profundidade de penetração, em milímetros e

t é a duração do ensaio, em horas.

Através da equação 19 foi possível calcular os valores do DNS que estão apresentados no quadro resumo (Quadro 10). Uma folha de cálculo com os vários resultados observados no presente ensaio encontra-se em anexo ao presente trabalho

Quadro 10 – Resultado ensaio de cloretos - DNS

Provetes	Média DNS ($\times 10^{-12} m^2/s$)
D	17,4 \pm 0,76
D CPF	10,4 \pm 0,93
CTL D	17,8 \pm 2,16
CTL D CPF	9,5 \pm 1,82
F	17,1 \pm 0,61
F CPF	10,9 \pm 0,34
CTL F	16,2 \pm 1,14
CTL F CPF	9,6 \pm 0,47

Como se explicará no espaço da análise dos resultados, os provetes com fibras metálicas não foram sujeitos a este ensaio por questões da própria natureza das fibras.

3.4.4.3 Resistividade

A importância da resistividade como parâmetro da durabilidade do betão tem se tornado cada vez mais evidente e tem sido progressivamente inserida pelos meios científicos europeus. Segundo a recomendação RILEM TC 154-EMC, de um processo eletroquímico natural da corrosão, é de esperar uma relação entre a resistividade do betão e a velocidade de corrosão de um elemento de reforço após a sua despassivação. Utilizando uma simplificação baseada em estudos realizados, a velocidade de corrosão num aço despassivado deve ser inversamente proporcional a resistividade de um betão.

O cálculo da resistividade eléctrica foi possibilitada pela realização dos ensaios de penetração de cloretos em condições de saturação total do provete uma vez que, os poros do betão quando totalmente saturados, permitem, dependendo objectivamente da sua natureza e conectividade da rede porosa, que a corrente eléctrica possa fluir com maior ou menor facilidade através da matriz do betão.

De seguida, apresenta-se a fórmula que permite relacionar a resistividade com os parâmetros presentes no ensaio de penetração de cloretos:

$$\rho = R \times \frac{A}{L} = \frac{V \times A}{L \times I} \quad (20)$$

Em que:

ρ é a resistividade eléctrica, em $\Omega.m$;

R é a resistência eléctrica em Ω (Ohms);

I é a corrente em amperes;

V é a diferença de potencial em volts;

L é o comprimento do provete em metros e

A é a área transversal do provete atravessado pela corrente em m^2 .

O quadro 11 apresenta os resultados da resistividade calculados de acordo com a equação 20.

Quadro 11 – Resultado ensaio de cloretos - Resistividade

Provetes	Média resistividade ($\Omega.m$)
D	60,49±3,75
D CPF	80,23±5,04
CTL D	57,55±7,00
CTL D CPF	81,17±10,8
F	58,13±3,34
F CPF	72,60±4,83
CTL F	60,08±7,03
CTL F CPF	75,06±1,57

Tal como no ensaio da penetração dos cloretos, neste ensaio não foram considerados nenhuns provetes do grupo das fibras metálicas.

3.4.4.4 Penetração de água sob pressão

O coeficiente de permeabilidade é uma característica inerente a qualquer material poroso e que se define como a maior ou menor permeabilidade que este material apresenta quando em contacto com um fluido e devido a existencia de forças de pressão. O coeficiente de permeabilidade pode ser expresso por uma profundidade em relação a um período de tempo.

Neste projecto adoptou-se a norma NP EN 12390-8 para se realizar o ensaio de penetração de água sob pressão. Foi utilizado o equipamento existente no LEMC, local onde os provetes

permaneceram 3 dias. Para a realização do ensaio de penetração de água sob pressão seguiu-se o seguinte procedimento:

- Colocaram-se os provetes no equipamento de penetração de água sob pressão;
- Manteve-se o equipamento em funcionamento durante 3 dias a pressão constante;
- No fim desse período de tempo os provetes foram levados à rotura por um ensaio de compressão linear obtendo-se assim 2 metades de cada provete
- Foram registadas a profundidade máxima de penetração de água assim como a profundidade média (Figura 38)

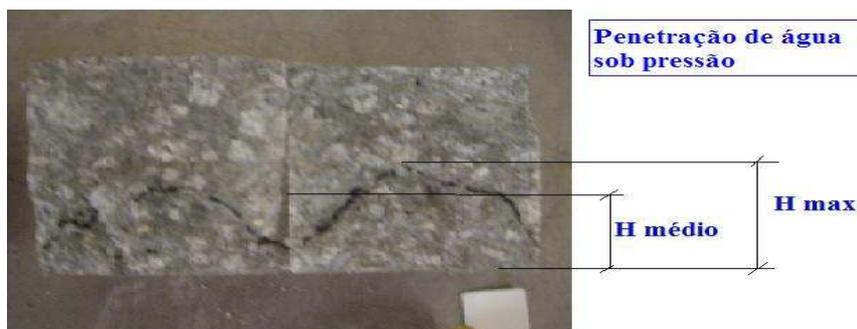


Figura 38 – Provetes ensaiados á penetração de água sob pressão

Apresentam-se de seguida os resultados do ensaio no Quadro 12. A totalidade dos valores obtidos pode ser uma vez mais encontrada em anexo no presente trabalho.

Quadro 12 – Resultado ensaio de penetração de água sob pressão

Provete	Profundidade de penetração de água sob pressão (cm)
D	4,1 ± 0,7
D CPF	1,0
CTL D	4,3 ± 0,6
CTL D CPF	0,8 ± 0,2
F	2,9 ± 0,0
F CPF	1,2 ± 0,7
CTL F	2,5 ± 0,4
CTL F CPF	0,3 ± 0,1
CTL M	3,5 ± 0,8
CTL M CPF	0,4 ± 0,07
M	3,4 ± 0,07
M CPF	1,3 ± 1,69

3.4.4.5 Absorção

Como já foi visto no sub-capítulo respeitante à durabilidade, a água embora sendo um elemento constituinte do próprio betão apresenta-se como um elemento nocivo ao betão, no sentido que representa um mecanismo de transporte para os mais variados agentes agressivos. A absorção de água pelo betão ocorre devido a forças capilares que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares. Este fenómeno que é função do diâmetro capilar ocorre sobretudo quando o betão está sujeito a ciclos de molhagem e secagem .

Um dos ensaios usados em estudos de betões, é o ensaio de absorção de água por capilaridade cujos pressupostos e procedimentos se podem encontrar na norma E 393 e RILEM TC 116 PCD.

Neste trabalho, entendeu-se por bem, ensaiar 3 provetes de cada um dos quatro betões presentes em cada grupo tipo. Com efeito foram realizados 36 provetes.

Para se realizar este ensaio foi necessário antes de mais secar completamente os provetes, sendo o controlo do seu peso, o factor indicador da perda de água. Assim pode-se estabelecer que os provetes no momento do ensaio encontravam-se com um peso próximo do peso que teriam caso não tivessem água no seu interior. Este pressuposto denomina-se “massa constante” e consiste em garantir que num espaço de tempo de 24 horas, um provete de betão colocado numa estufa a 40°, não varia a sua massa em mais de 0,1 % do seu peso observado no início desse intervalo de tempo.

Assim os 36 provetes foram colocados numa estufa do LABEST, e foram registados os seus pesos até se observarem as condições anteriormente referidas. A Figura 39 a) mostra a estufa mencionada, e a Figura 39 b) o seu interior com os provetes a ensaiar.



Figura 39 – a) Estufa do LABEST b) Imagem dos provetes ensaiados

Em anexo podemos encontrar os valores das pesagens iniciais e finais e comprovar a condição de massa constante em todos os provetes ensaiados.

Findo este procedimento preliminar, agruparam-se os conjuntos de provetes e colocaram-se em recipientes devidamente condicionados (Figura 40 a)), com a base da caixa a ser preenchida com uma lamina de água de sensivelmente 5 mm (Figura 40 b)). Foram tomadas todas as precauções durante a realização do ensaio para os provetes não fossem indevidamente

molhados, garantindo assim que apenas a sua base estaria em contacto com água existente no fundo das caixas.



Figura 40 – a) Caixas consideradas para o ensaio de penetração de água sob pressão
b) Indicação dos 5mm de lâmina de água em contacto com o betão

Para a realização deste ensaio foram tomados tempos de referencia, nos quais foram registados os pesos dos provetes para cada espaço de tempo ocorrido. Foram definidos 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180, 240 e 270 minutos, como os momentos de pesagem e leitura da massa de cada provete.

Este ensaio baseia-se na medição da velocidade de absorção da água pelo betão não saturado, imerso em água alguns milímetros. Com isto, tem-se verificado que a absorção capilar é proporcional à raiz do tempo. Com efeito, é necessário interpretar os resultados obtidos, com o auxílio de princípios matemáticos, que no presente caso traduz uma regressão linear.

É exactamente uma linha de tendência linear que se achou, com o conjunto de diferenças de peso lidas durante o ensaio representadas em abcissa e a raiz do tempo em ordenadas. A equação que ilustra a equivalência entre a regressão linear e os parâmetros pretendidos encontra-se exposta de seguida. Também se pode ver as curvas de absorção linear no gráfico 41, 42 e 43 do presente trabalho.

$$A = a_0 + S \cdot \sqrt{t} \quad (21)$$

Em que:

A é a quantidade de água absorvida por unidade de área da secção em contacto com a água desde o início do ensaio, em mg/mm^2 ;

a_0 é a quantidade de água inicialmente absorvida pelos poros em contacto com a água, em mg/mm^2 ;

S é o coeficiente de absorção do material, em $\frac{\text{mg}}{\text{mm}^2 \cdot \sqrt{\text{min}}}$;

e t é o tempo a contar deste o instante inicial do ensaio, em minutos.

Em anexo ao presente trabalho podem-se encontrar os resultados completos do ensaio descrito.. Apresenta-se ainda no quadro 13 o resumo dos resultados obtidos e os gráficos com as curvas de absorção obtidas por regressão linear.

Quadro 13 – Resultado ensaio de absorção de água por capilaridade

Provetes	Média coeficiente de absorção $\frac{mg}{mm^2 \cdot \sqrt{min}}$
D	0.108±0.011
D CPF	0.074±0.006
CTL D	0.112±0.006
CTL D CPF	0.062±0.015
F	0.107±0.010
F CPF	0.076±0.014
CTL F	0.102±0.007
CTL F CPF	0.054±0.005
CTL M	0.078±0.002
CTL M CPF	0.056±0.002
M	0.064±0.002
MCPF	0.058±0.004

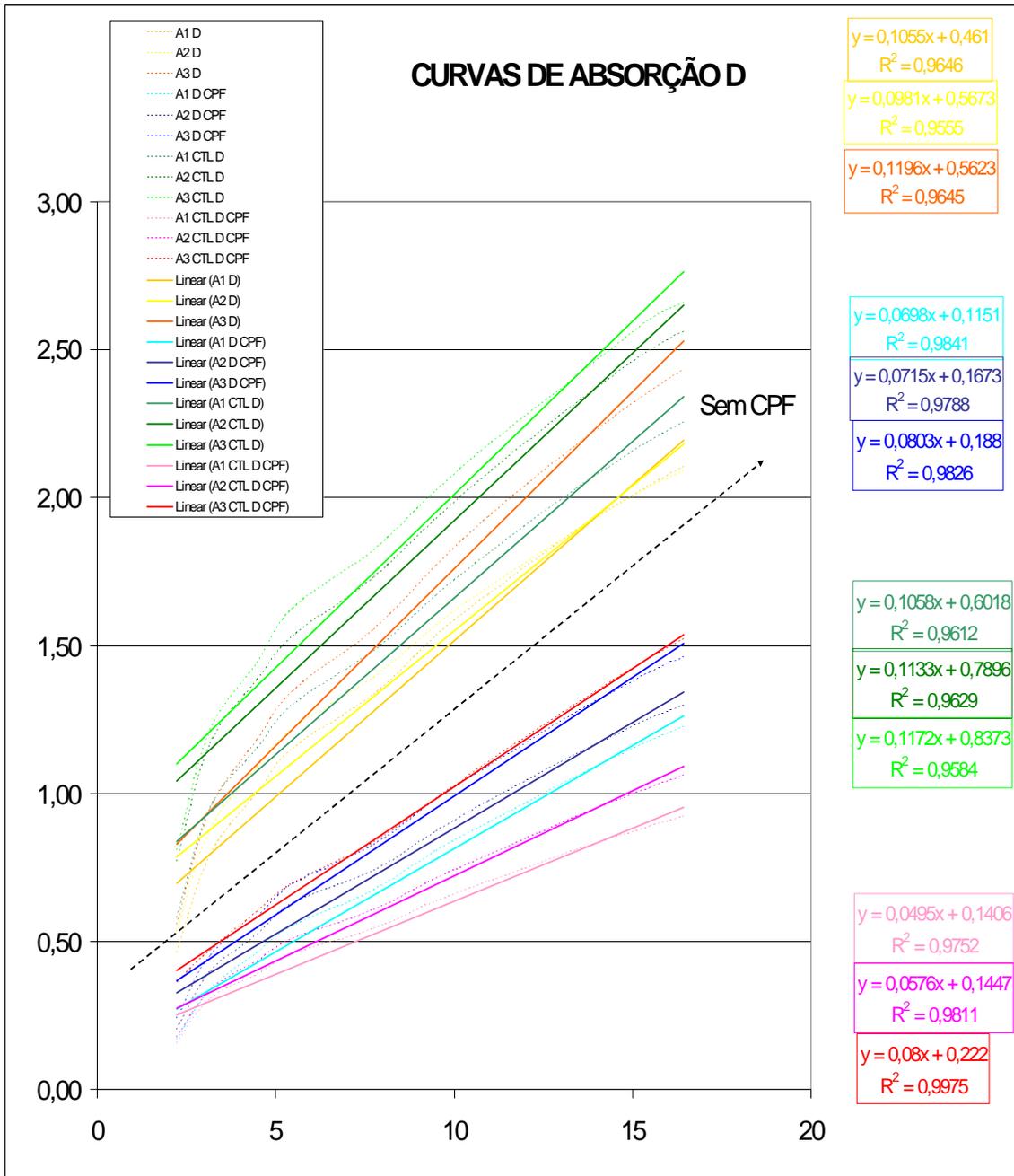


Figura 41 - Gráfico relativo ao coeficiente de absorção dos betões com fibras D

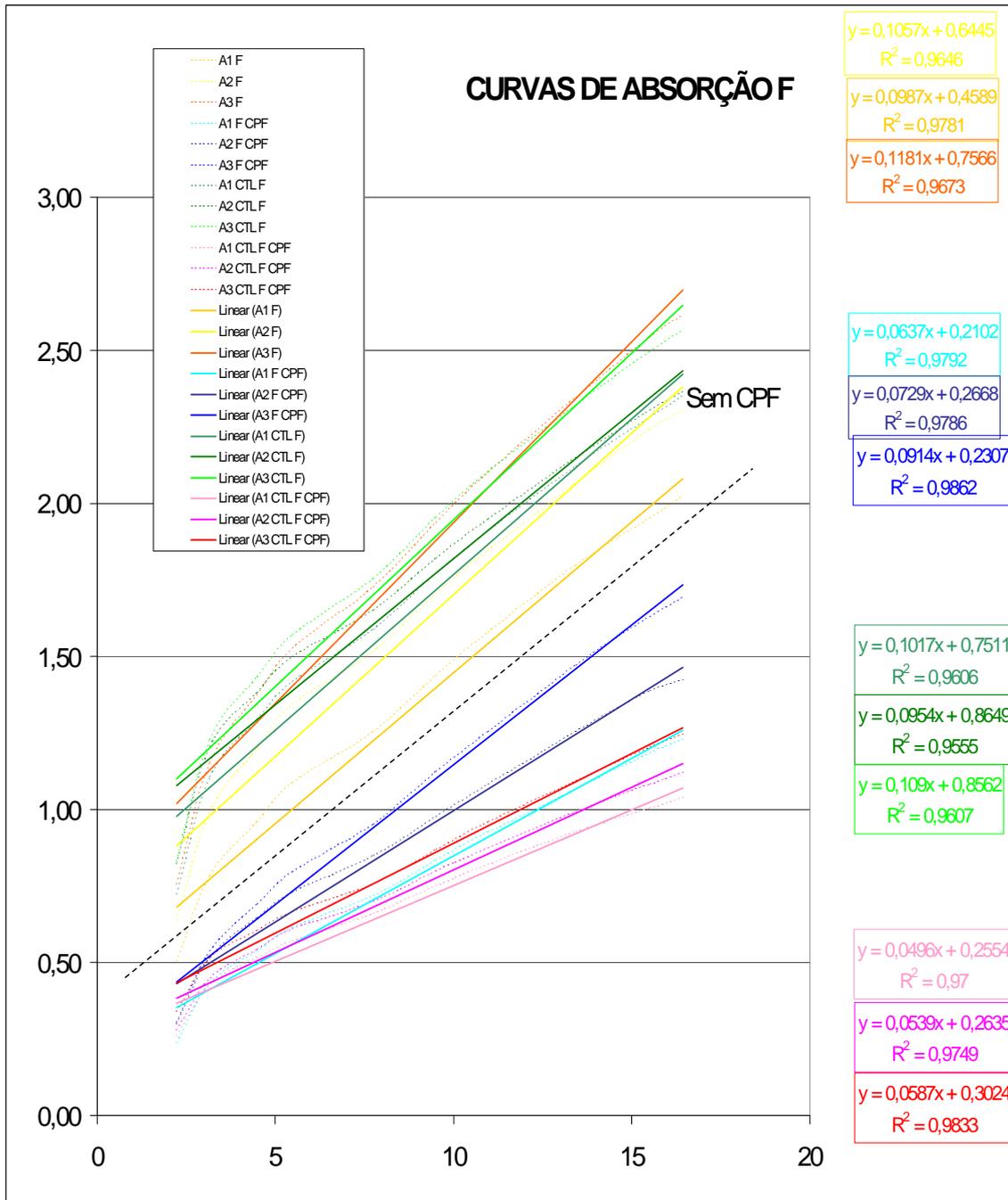


Figura 42 - Gráfico relativo ao coeficiente de absorção dos betões com fibras F

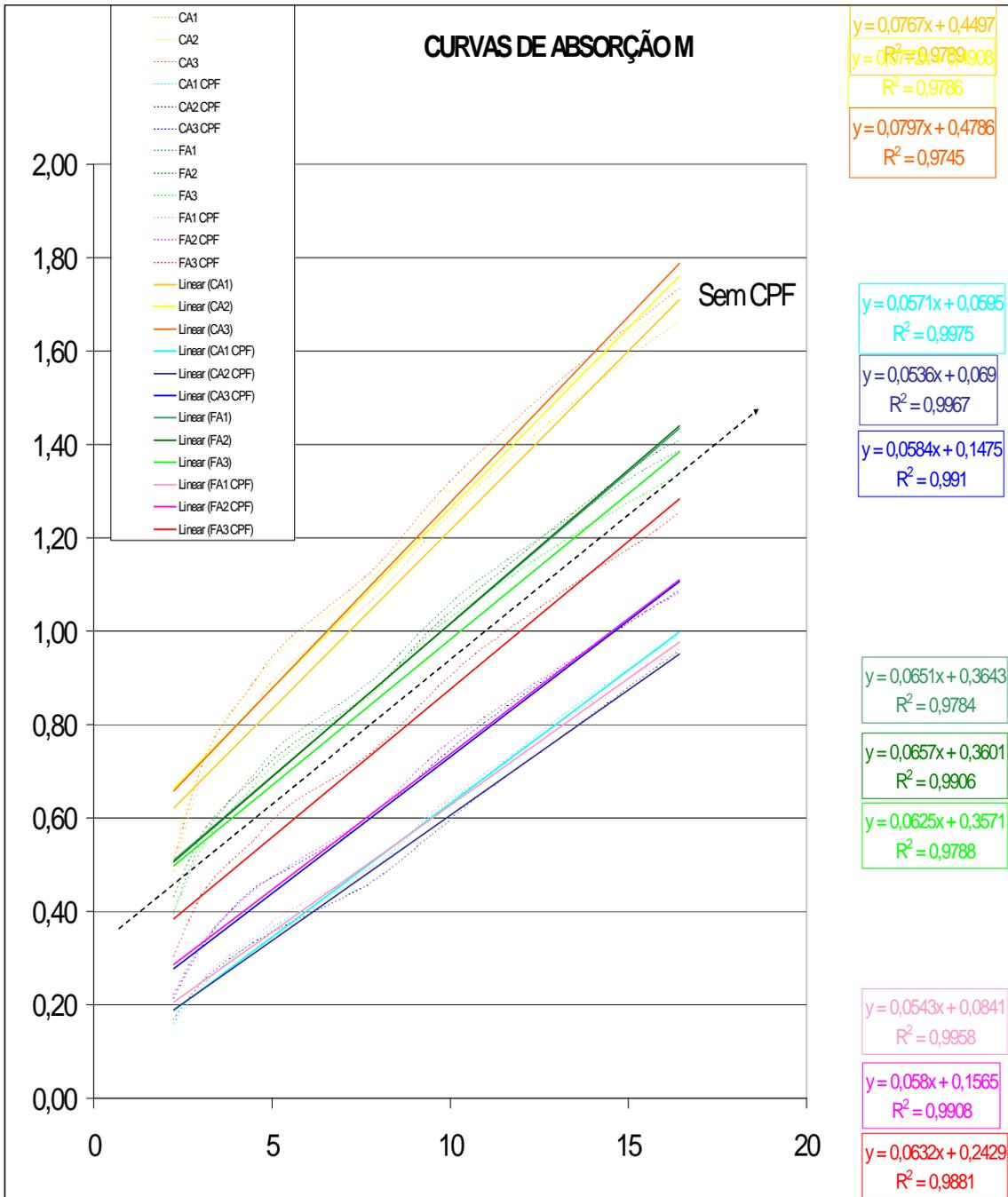


Figura 43 - Gráfico relativo ao coeficiente de absorção dos betões com fibras M

4

CONCLUSÕES

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se analisar em forma de conclusões todos os resultados obtidos durante os ensaios realizados. Por ser o tema do projecto, naturalmente que se pretendeu dar maior relevância, à análise dos valores obtidos, nos betões em que foi aplicada cofragem de permeabilidade controlada em comparação com os betões cofrados tradicionalmente.

No entanto, e devido à quantidade de ensaios realizados achou-se por bem, correlacionar outros tipos de betões, comparando-os no seu desempenho. Para isso estabeleceram-se os parâmetros exigíveis para ser possível analisar os comportamentos dos betões entre si. Temos assim, que todos as amostras comparadas possuem a mesma composição e foram ensaiadas nas mesmas condições.

Com isto definiram-se três análises diferentes:

- Comparação entre o desempenho dos betões com CPF e sem CPF;
- Comparação de comportamento entre betões com fibras e respectivos betões de controlo
- Comparação entre as duas fibras cujo a composição do betão foi idêntica (fibras F e fibras D)

È oportuno neste momento relembrar uma vez mais que o facto de as fibras metálicas e das fibras sintéticas terem composições diferentes, levam naturalmente a desempenhos diferentes. É expectável que o betão de controlo das fibras metálicas apresente uma qualidade superior ao betão de controlo das fibras sintéticas uma vez que foram utilizados materiais que em muito contribuem para uma melhoria nas características de durabilidade, como é o caso da sílica de fumo. Por isso mesmo também se compreende que o efeito do CPF num betão melhorado seja menos visível.

Por não se enquadrar em nenhuma das análises anteriormente referidas, começamos por fazer apenas uma breve referência ao ensaio de trabalhabilidade levado a cabo no programa experimental – O ensaio de abaixamento de cone “slump test”.

Em anexo ao presente trabalho podemos ver o quadro com as classes de abaixamento. Os valores do ensaio e respectiva classe de abaixamento apresentam-se já de seguida no quadro 14.

Quadro 14 – Conclusões “test slump”

		Slump Test	
		Abaixamento	Classe
1º grupo Fibras metálicas	1ª amassadura	190mm	S4
	2ª amassadura	180mm	S4
	3ª amassadura	190mm	S4
	4ª amassadura	190mm	S4
2º grupo Fibras sintéticas F	1ª amassadura	130mm	S3
	2ª amassadura	150mm	S3
3º grupo Fibras sintéticas D	1ª amassadura	140mm	S3
	2ª amassadura	150mm	S3

Este ensaio apresentou valores claramente diferentes para o grupo de betões com fibras metálicas e os grupos das outras fibras. Isto explica-se facilmente pela diferença na composição do betão. Apesar dos betões dos grupos de fibras sintéticas apresentarem uma razão A/C mais elevada que o grupo de betão com fibras metálicas, o uso do superplastificante terá conferido uma classe de abaixamento maior a este 1º grupo.

4.2. BETÕES COM CPF VS BETÕES SEM CPF

O conjunto de ensaios realizados revelou-se elucidativo da eficiência do uso de CPF no betão. Na análise que se segue, apenas são considerados os parâmetros de durabilidade considerados no programa experimental. Parâmetros de resistência mecânica não são considerados, uma vez que os provetes obtidos para este tipo de ensaios não foram produzidos com CPF. Além disso como se explicou no capítulo 2, O CPF não tem como função aumentar a resistência dos betões.

Foram assim considerados além dos ensaios de penetração dos agentes agressivos no betão a resistência superficial. Este ensaio permite aferir dos parâmetros de resistência à abrasão, a compactidade, e da estrutura porosa que são indicadores do comportamento do betão em relação à sua resistência aos agentes agressivos.

Pretende-se agora analisar ensaio a ensaio, os valores obtidos e assim definir o desempenho de um betão quando comparado ao outro. Para cada ensaio foi elaborado um quadro com os resultados e respectiva melhoria de comportamento. O valor de melhoria é dado por uma das duas fórmulas:

$$+ \frac{V_{\text{controlo}} - V_{\text{betão CPF}}}{V_{\text{controlo}}} \times 100\% \quad (22) \quad ; \quad - \frac{V_{\text{controlo}} - V_{\text{betão CPF}}}{V_{\text{controlo}}} \times 100\% \quad (23)$$

Em que:

V_{controlo} – Valor obtido no ensaio para o betão de controlo

$V_{\text{betão CPF}}$ - Valor obtido no ensaio para o betão em que foi utilizado CPF

Chama-se a atenção para o facto de se usar a fórmula (22) nos parâmetros em que um valor mais baixo representa uma melhoria, sendo naturalmente usada a fórmula (23) nos ensaios em que o resultado maior corresponde a um melhor desempenho.

4.2.1.RESISTÊNCIA SUPERFICIAL

No Quadro 15 podemos avaliar o desempenho do CPF no que diz respeito ao aumento de resistência superficial

Quadro 15 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF em Resistência superficial

		Desempenho – resistência superficial		
		Com CPF	Sem CPF	Melhoria
Fibras M	Betão com fibras	44.7	43.0	4%
	Betão controlo	47.3	42.7	11%
Fibras F	Betão com fibras	43.3	31.7	37%
	Betão controlo	48.3	33.0	46%
Fibras D	Betão com fibras	43.0	32.7	30%
	Betão controlo	48,3	31,4	54%

É bastante percéptivel, a melhoria que o CPF induz no betão em relação à sua resistência superficial, principalmente nos betões com fibras sintéticas. Os valores médios não andam longe dos 40%, excepção feita aos resultados dos betões do grupo das fibras metálicas. Apresenta-se agora o gráfico que traduz os valores obtidos no ensaio.

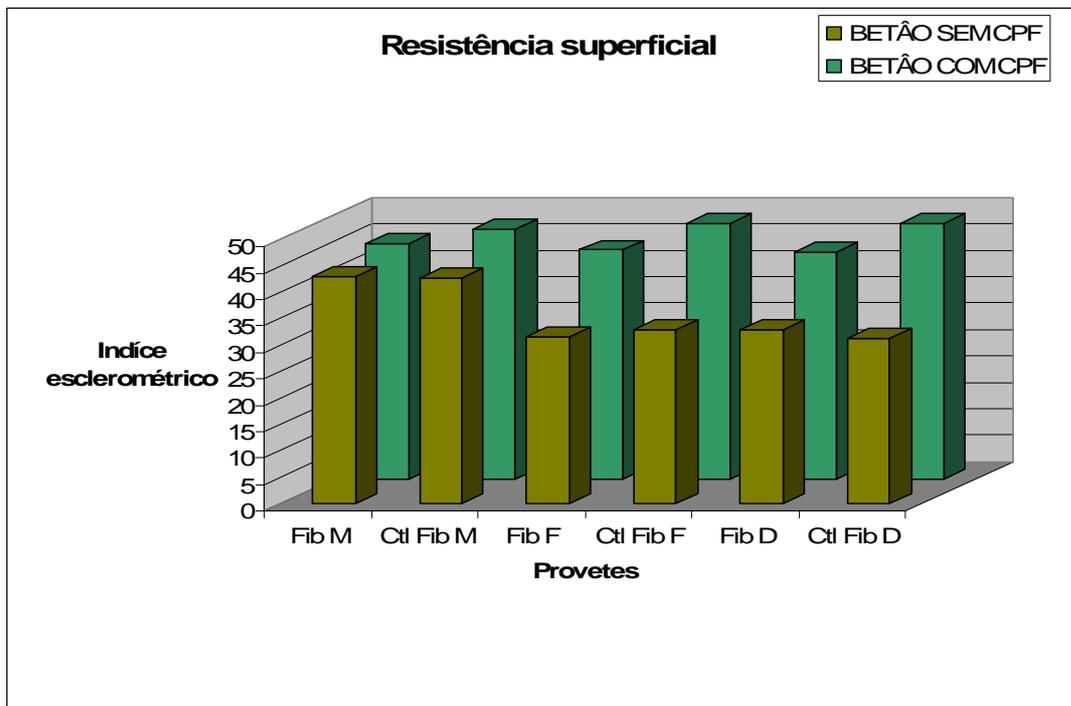


Figura 44. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF em resistência superficial

4.2.2 CARBONATAÇÃO

Para o ensaio de carbonatação foram obtidos os resultados que se podem observar no Quadro 16. Uma vez mais são apresentados os valores de melhoria do desempenho verificado nos betões com CPF em comparação com os betões sem CPF.

Quadro 16 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na carbonatação

Desempenho - Carbonatação				
		Com CPF	Sem CPF	Melhoria
Fibras M	Betão com fibras	4,3 ± 1,0	11,5 ± 0,7	64%
	Betão controlo	5,5 ± 0,7	12,0 ± 1,4	54%
Fibras F	Betão com fibras	1,2 ± 0,0	7,8 ± 1,1	85%
	Betão controlo	2,0 ± 1,4	8,5 ± 0,7	76%
Fibras D	Betão com fibras	1,3 ± 1,1	7,0 ± 1,4	81%
	Betão controlo	1,2 ± 0,0	7,8 ± 3,53	95%

Neste ensaio verificaram-se valores na ordem dos 80 % para a melhoria do comportamento de um betão quando cofrado com cofragem de permeabilidade controlada. Uma vez mais refira-se o facto de os valores de desempenho serem menores nos betões com fibras metálicas. De seguida apresenta-se o gráfico que traduz os resultados obtidos.

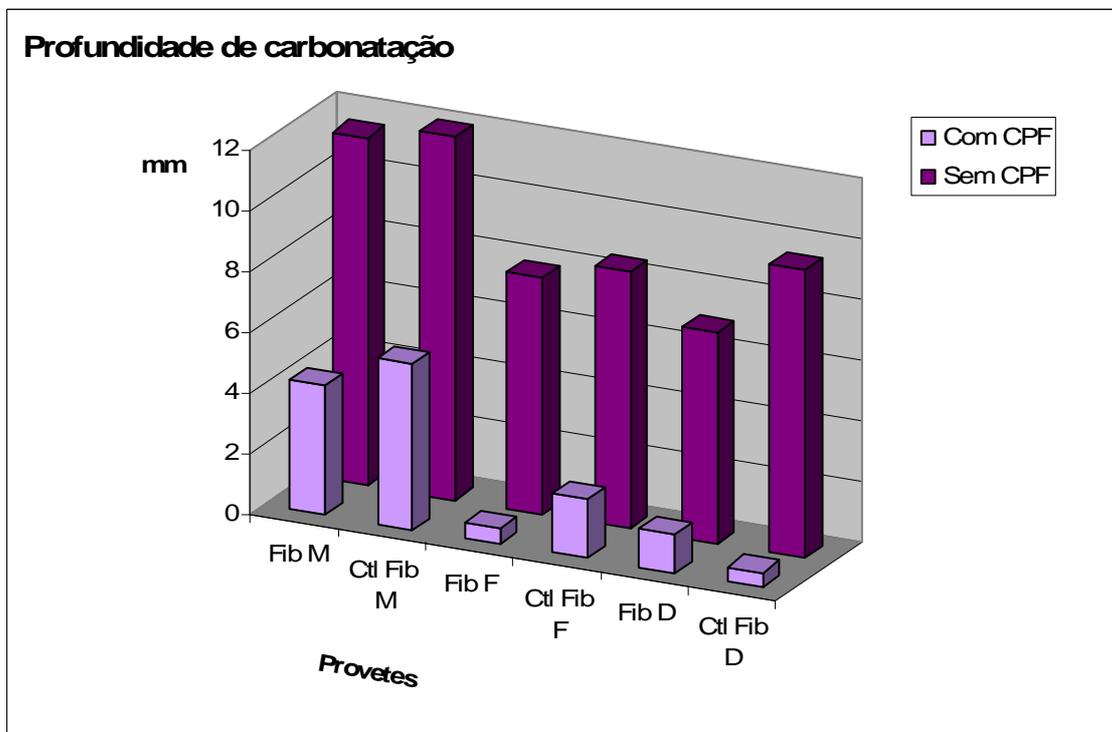


Figura 45. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na carbonatação

4.2.3. PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Devido à grande condutibilidade dos materiais metálicos não é aconselhável ensaiar betões com fibras metálicas aos cloretos. Tendo por base princípios de electricidade uma possível experimentação poderia conduzir à danificação do material de laboratório. No Quadro 17 estão enunciados os valores das melhorias obtidas em relação ao DNS (coeficiente de difusão).

Quadro 17 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na penetração aos cloretos

Desempenho – Cloretos (DNS)				
		Com CPF	Sem CPF	Melhoria
Fibras F	Betão com fibras	10.9±0.3	17.1±0.6	36%
	Betão controlo	9.6±0.5	16.2±1.1	41%
Fibras D	Betão com fibras	10.4±0.9	17.4±0.8	41%
	Betão controlo	9.5±1.8	17.8±2.2	46%

Neste ensaio obtiveram-se valores muito próximos uns dos outros. Todos os provetes ensaiados apresentaram resultados próximos dos 40%. No gráfico da Figura 46 podemos observar os valores do ensaio e verificar a quase constante proporcionalidade entre cada par de provetes realizados com CPF e sem CPF.

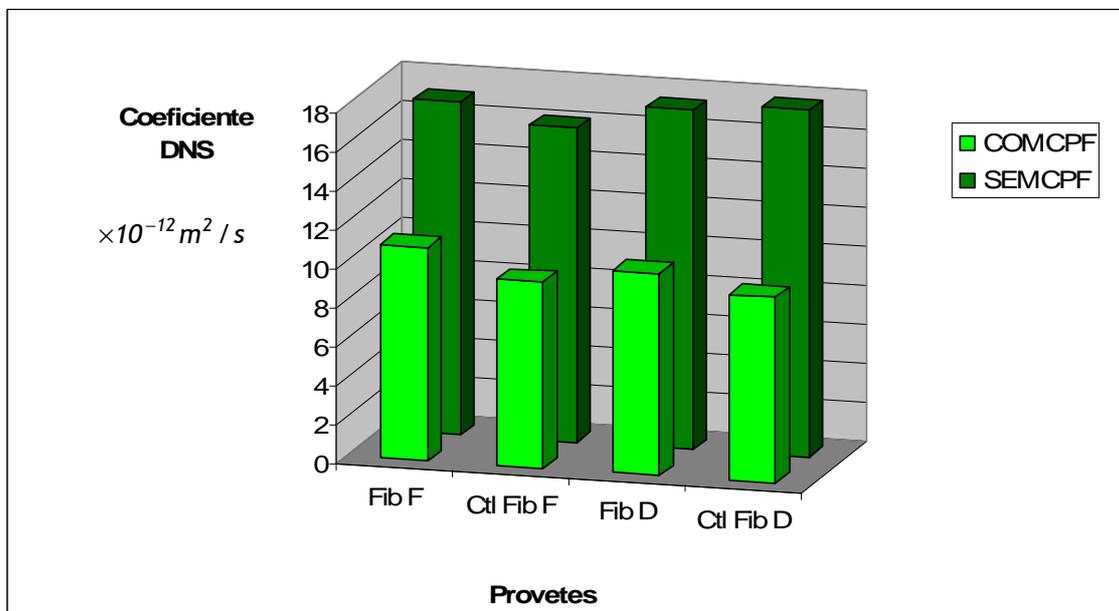


Figura 46. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na penetração aos cloretos

4.2.4. RESISTIVIDADE

Tal como no ensaio anterior, não foram considerados neste ensaio os provetes de fibras metálicas. Por ser um valor que resulta do mesmo procedimento experimental que a penetração dos cloretos, facilmente se compreendem os motivos para este facto. O quadro abaixo retrata os resultados obtidos e o respectivo comportamento dos betões ensaiados.

Quadro 18 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na resistividade

		Desempenho – Resistividade		
		Com CPF	Sem CPF	Melhoria
Fibras F	Betão com fibras	72.6±4.8	58.1±3.3	25%
	Betão controlo	75.1±1.6	60.1±7.0	25%
Fibras D	Betão com fibras	80.2±5.0	60.5±3.7	33%
	Betão controlo	81.2±10.8	57.5±7.0	41%

As melhorias que o CPF introduziu no betão são da ordem dos 30 % sendo aproximadamente de 25 % nos betões do grupo de fibras F e de 35 % nos betões de fibras D. De seguida apresenta-se o gráfico do resumo dos resultados do ensaio de resistividade.

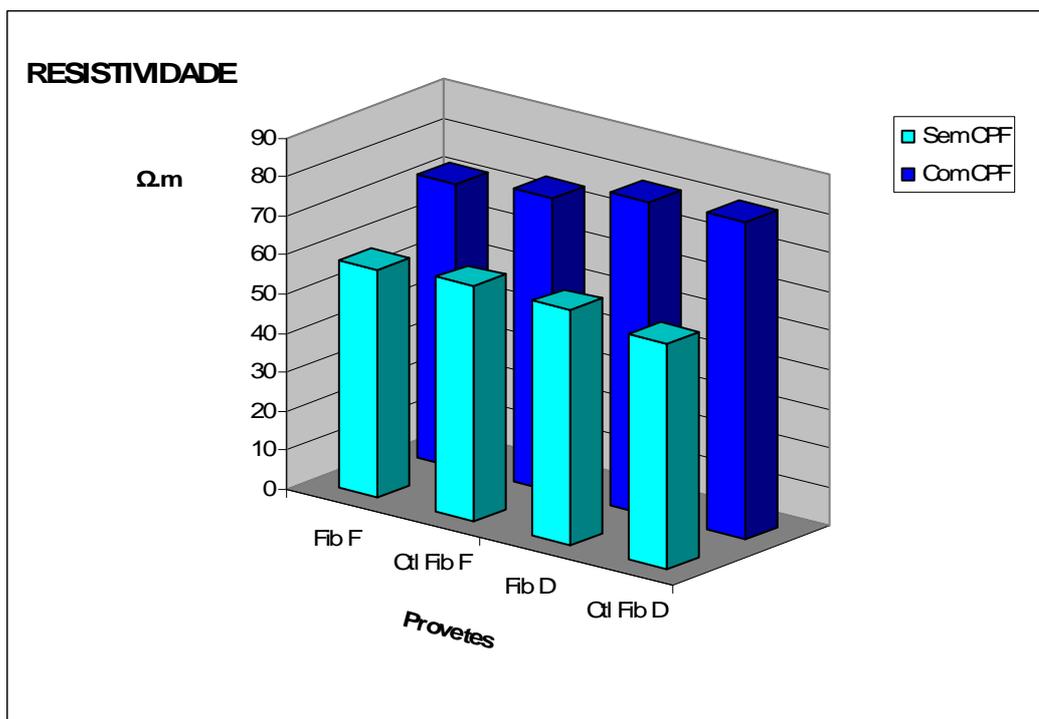


Figura 47. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na resistividade

4.2.5. PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO

Este ensaio, tal como já foi referido aquando da sua descrição apresentou alguns problemas devido a uma avaria no equipamento usado. Relembrem-se os seus resultados no Quadro 19 e apresentam-se os valores de melhoria para serem discutidos já a seguir.

Quadro 19 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na penetração de água sob pressão

Desempenho – Penetração de água sob pressão				
		Com CPF	Sem CPF	Melhoria
Fibras M	Betão com fibras	0.4 ± 0.1	3.5 ± 0.8	89%
	Betão controlo	1.3 ± 1.6	3.4 ± 0.1	62%
Fibras F	Betão com fibras	1.2 ± 0.7	2.9	54%
	Betão controlo	0.3 ± 0.1	2.5 ± 0.4	88%
Fibras D	Betão com fibras	1.0	4.1 ± 0.7	86%
	Betão controlo	0.8 ± 0.2	4.3 ± 0.6	81%

Neste parâmetro o uso do CPF imprimiu melhorias que se situam na ordem dos 80%. Alguns dos resultados podem parecer estranhos pois não são considerados os valores do desvio padrão. Isto deve-se ao facto de dos 36 provetes previstos para ensaio, 8 não terem sido ensaiados. Em anexo podem-se observar os provetes que foram ensaiados. O gráfico seguinte ajuda a ilustrar as melhorias conferidas pelo uso de CPF.

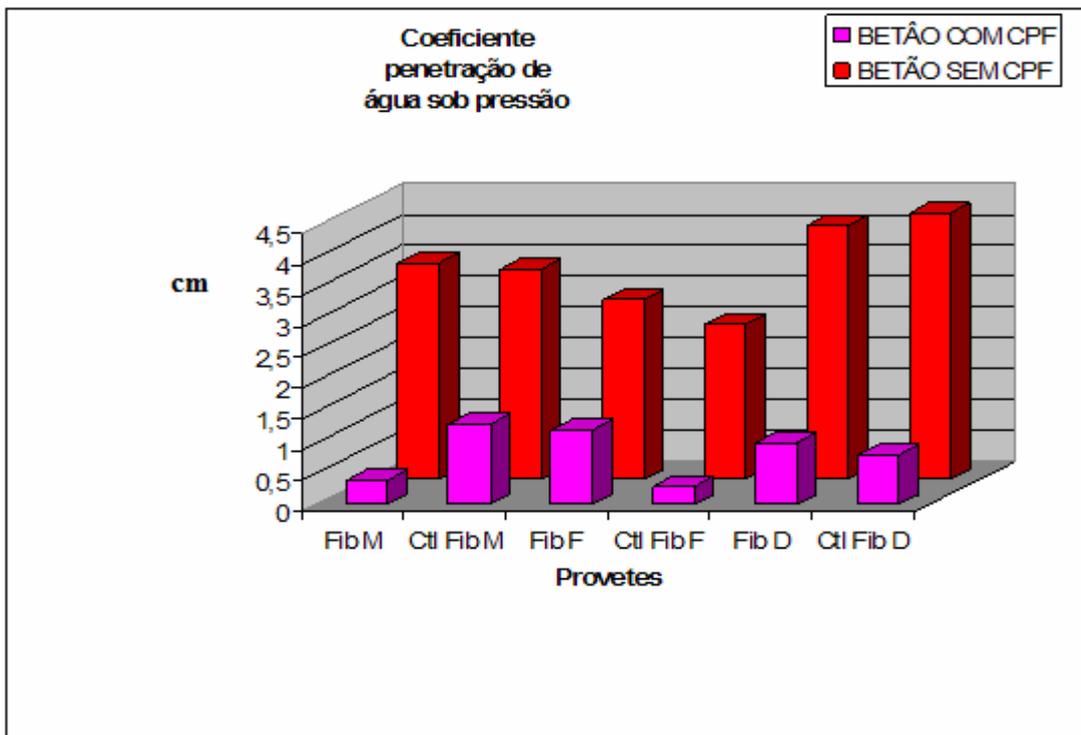


Figura 48. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na penetração de água sob pressão

4.2.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O quadro que se segue, resume os resultados obtidos neste ensaio e ainda apresenta os valores para as melhorias calculadas através da fórmula 21.

Quadro 20 – Conclusões – Desempenho dos betões com CPF na absorção de água por capilaridade

Desempenho - Absorção				
		Com CPF	Sem CPF	Melhoria
Fibras M	Betão com fibras	0.058±0.004	0.064±0.002	9%
	Betão controlo	0.056±0.002	0.077±0.002	28%
Fibras F	Betão com fibras	0.076±0.014	0.107±0.010	29%
	Betão controlo	0.054±0.005	0.102±0.007	47%
Fibras D	Betão com fibras	0.074±0.006	0.108±0.011	31%
	Betão controlo	0.062±0.015	0.112±0.006	44%

Os resultados da absorção mostraram-se bastante coerentes quer em termos de melhoria por uso de CPF quer quando comparado o efeito que o CPF tem em betões com fibras e em betões de controlo situando-se a sua média na ordem dos 30 %. Apresenta-se em seguida o gráfico que traduz os resultados do quadro acima.

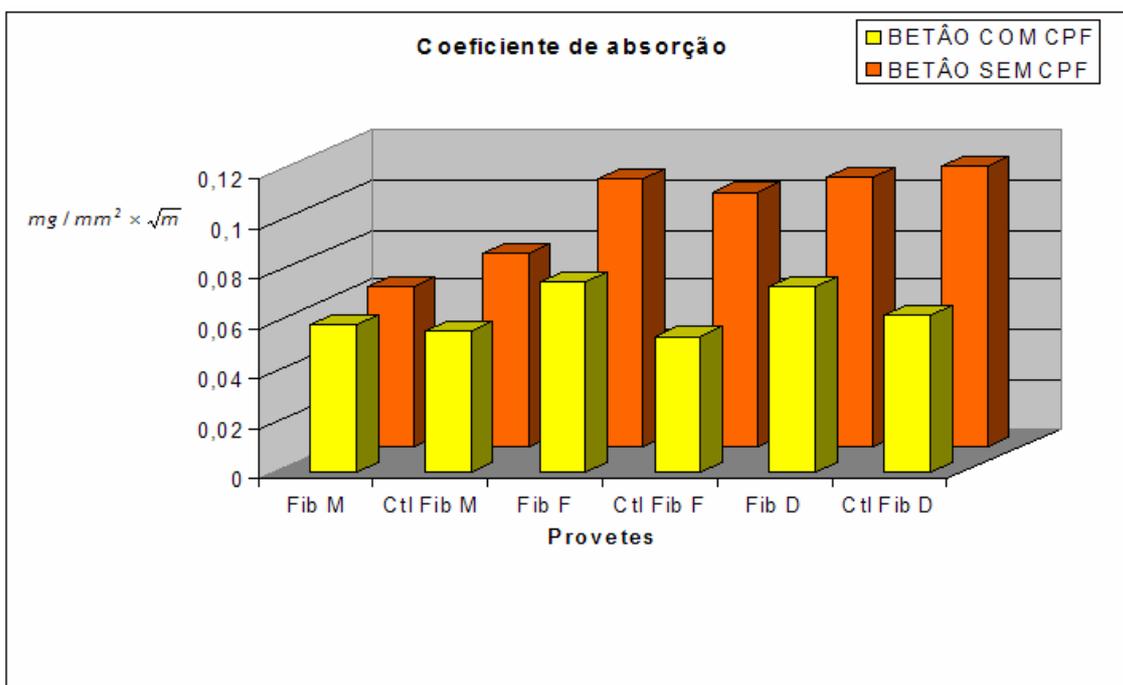


Figura 49. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com CPF na absorção de água por capilaridade

4.3. BETÕES COM FIBRAS VS BETÕES DE CONTROLO

Nesta análise o objectivo é apenas o de fazer uma referência breve aos melhores ou piores desempenhos que os betões preconizados com fibras tiveram perante o respectivo betão de controlo. Nesta análise comparam-se valores obtidos para as resistências mecânicas, uma vez que as fibras poderão alterar os valores característicos de resistência de um determinado betão. Ao contrário do sub-capítulo anterior, a análise será realizada por tipo de fibras, com excepção das resistências mecânicas onde se tenta resumir tudo numa única comparação. De referir que os valores de melhoria foram obtidos da seguinte forma.

$$+ \frac{V_{controlo} - V_{betão\ fibras}}{V_{controlo}} \times 100\% \quad (24) \quad ; \quad - \frac{V_{controlo} - V_{betão\ fibras}}{V_{controlo}} \times 100\% \quad (25)$$

Em que:

$V_{controlo}$ – Valor obtido no ensaio para o betão de controlo

$V_{betão\ fibras}$ - Valor obtido no ensaio para o betão com fibras

Resistências mecânicas

Neste ponto não foram analisados os valores de melhorias uma vez que se entendeu que os valores encontrados para além de não serem relevantes (máximo de 5 %), não seguiam um padrão que fosse conclusivo que a fibras piorem ou melhorem as características dos materiais.

Eis o quadro que melhor ajuda a compreender o que atrás foi dito.

Quadro 21 – Conclusões – Comparação resultados resistências betão com fibras - betão controlo

	Resistência superficial MPa	Resistência à compressão MPa	Resistência à tracção MPa
M	48,0	-	9,6
CTL M	46,0	54,9	8,2
F	26,0	50,9	6,9
CTL F	29,0	52,8	6,7
D	26,0	54,4	5,8
CTL D	25,0	50,3	5,4

Apresenta-se agora um gráfico que resume o comportamento das fibras para cada um dos ensaios de resistências mecânicas aos quais foram submetidos.

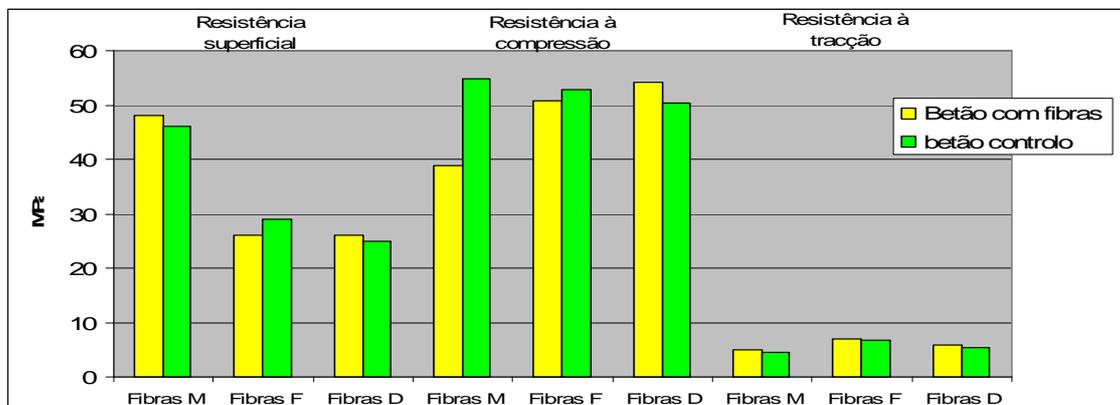


Figura 50. – Gráfico relativo ao desempenho dos betões com fibras em relação aos betões de controlo

Em virtude das fibras conferirem em princípio um comportamento dúctil a um betão sujeito a esforços de tracção apresentam-se os gráficos força/deslocamento dos ensaios de flexão (betão com fibras e respectivo controlo). Os gráficos confirmam a função de garantir ductilidade e controlar a fendilhação não contribuindo assim significativamente para um aumento de resistência mecânica. Estudos realizados por outros autores referem que apenas a partir de uma dosagem de 60 kg/m³ é que este tipo de fibras apresentam aumentos significativos na resistência de um betão.

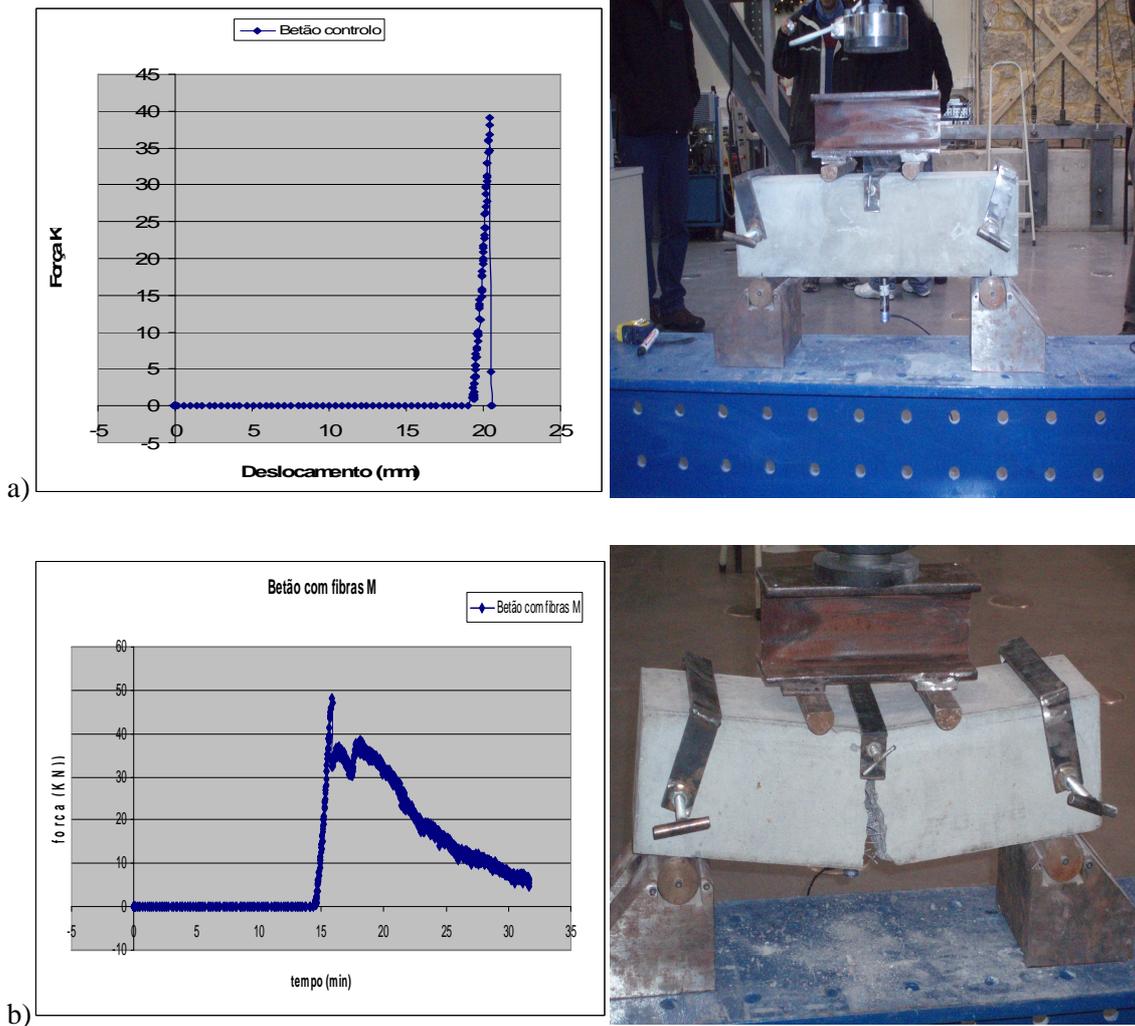


Figura 51. a)– Gráfico relativo ao ensaio de tracção de um betão de controlo
b) Gráfico relativo ao ensaio de tracção de um betão com fibras metálicas

Fibras M

De seguida comparam-se os betões de acordo com a melhoria (ou não) introduzidas pelas fibras metálicas.

Quadro 22 – Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras M com betão de controlo

Desempenho Fibras M				
		Betão com fibras	Betão controlo	Melhoria
Carbonatação	Betão c/ CPF	4.3 ± 1.0	5.5 ± 0.7	21.8%
	Betão s/ CPF	11.5 ± 0.7	12.0 ± 1.4	4.2%
Penetração de água	Betão c/ CPF	0.4 ± 0.1	1.3 ± 1.7	69.2%
	Betão s/ CPF	3.5 ± 0.8	3.4 ± 0.1	-2.4%
Absorção	Betão c/ CPF	0.0585 ± 0.004	0.0564 ± 0.002	-3.6%
	Betão s/ CPF	0.0644 ± 0.002	0.0779 ± 0.002	17.6%

Como se pode verificar, de acordo com os resultados, de um modo geral a introdução de fibras metálicas parece melhorar o desempenho do betão em termos de durabilidade, considerando as propriedades analisadas. Em alguns casos verifica-se uma ligeira perda de desempenho, na realidade insuficiente. O valor de 69 % referente ao ensaio de penetração de água sob pressão nos betões com CPF, parece resultar dos problemas encontrados neste ensaio.

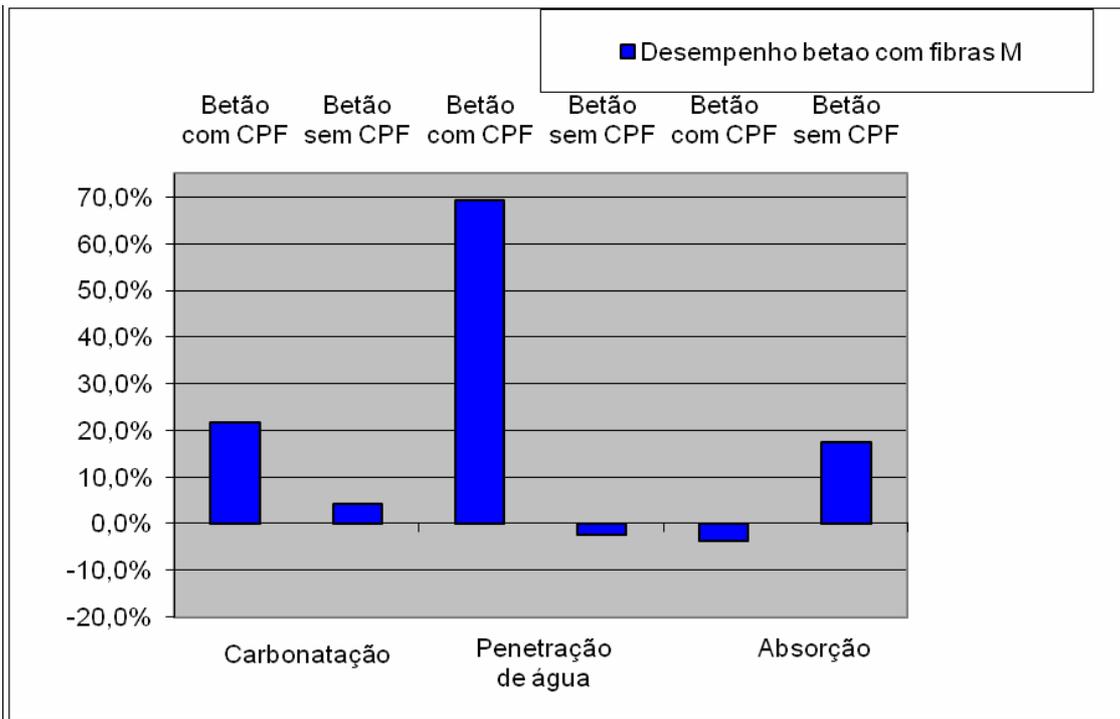


Figura 52 – Comparação de desempenho entre betão com fibras M e o betão de controlo

Fibras F

Apresenta-se agora o quadro com os resultados de desempenho dos betões com fibras F.

Quadro 23 – Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras F com betão de controlo

Desempenho Fibras F				
		Betão com fibras	Betão controlo	Melhoria
Carbonatação	Betão c/ CPF	1.2 ± 0.0	2.0 ± 1.4	40%
	Betão s/ CPF	7.8 ± 1.1	8.5 ± 0.7	8%
Resistividade	Betão c/ CPF	72.6 ± 4.8	75.1 ± 1.6	-3%
	Betão s/ CPF	58.1 ± 3.3	60.1 ± 7.0	-3%
Cloretos - DNS	Betão c/ CPF	10.9 ± 0.3	9.6 ± 0.5	-13%
	Betão s/ CPF	17.1 ± 0.6	16.2 ± 1.1	-5%
Penetração de água	Betão c/ CPF	1.2 ± 0.7	0.3 ± 0.1	-75%
	Betão s/ CPF	2.9 ± 0.0	2.5 ± 0.4	-16%
Absorção	Betão c/ CPF	0.0760 ± 0.014	0.0541 ± 0.004	-41%
	Betão s/ CPF	0.1075 ± 0.010	0.1020 ± 0.007	-5%

Através do Quadro 23, depreende-se que também neste tipo de fibras não existe um padrão de comportamento que nos permita concluir sobre a contribuição das fibras sintéticas F nas características de durabilidade de um betão. No entanto verifica-se que os valores apresentados são quase sempre negativos, podendo assim suspeitar-se que o desempenho destas fibras não seja muito eficaz na resistência aos agentes agressivos provavelmente por constiuirem caminhos de acesso a estes agentes.

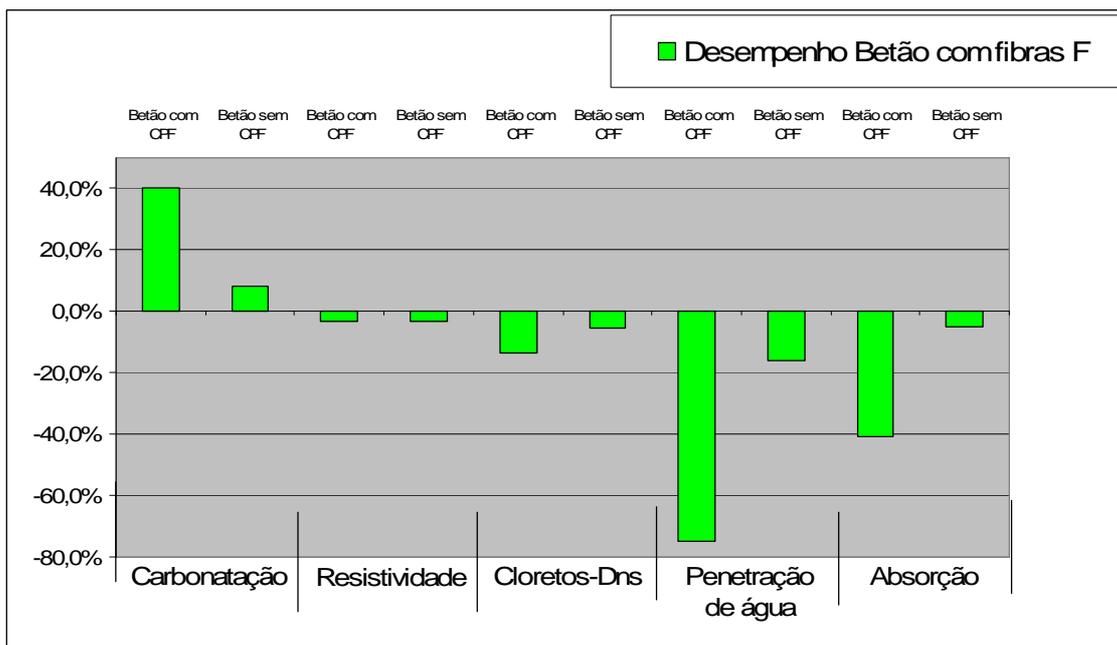


Figura 53 – Comparação de desempenho entre betão com fibras F e o betão de controlo

Fibras D

Repetiu-se o mesmo tipo de análise para os betões com fibras do tipo D e apresenta-se o seguinte quadro.

Quadro 24 – Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras D com betão de controlo

Desempenho Fibras D				
		Betão com fibras	Betão controlo	Melhoria
Carbonatação	Betão c/ CPF	1.3 ± 1.1	1.2 ± 0.0	-8.3%
	Betão s/ CPF	7.0 ± 1.4	7.8 ± 3.5	+10.3%
Resistividade	Betão c/ CPF	80.2 ± 5.0	81.2 ± 10.8	-1.2%
	Betão s/ CPF	60.5 ± 3.7	57.5 ± 7.0	+5.2%
Cloretos - DNS	Betão c/ CPF	10.4 ± 0.9	9.5 ± 1.2	-9.5%
	Betão s/ CPF	17.4 ± 0.8	17.8 ± 2.2	+2.3%
Penetração de água	Betão c/ CPF	1.0 ± 0.0	0.8 ± 0.2	-25.0%
	Betão s/ CPF	4.1 ± 0.7	4.3 ± 0.6	+4.6%
Absorção	Betão c/ CPF	0.0739 ± 0.006	0.06224 ± 0.016	-17.7%
	Betão s/ CPF	0.1077 ± 0.011	0.1121 ± 0.006	4.5%

No caso das fibras D as diferenças pelas introdução de fibras são irrelevantes. O quadro seguinte retrata o desempenho do betão com fibras D.

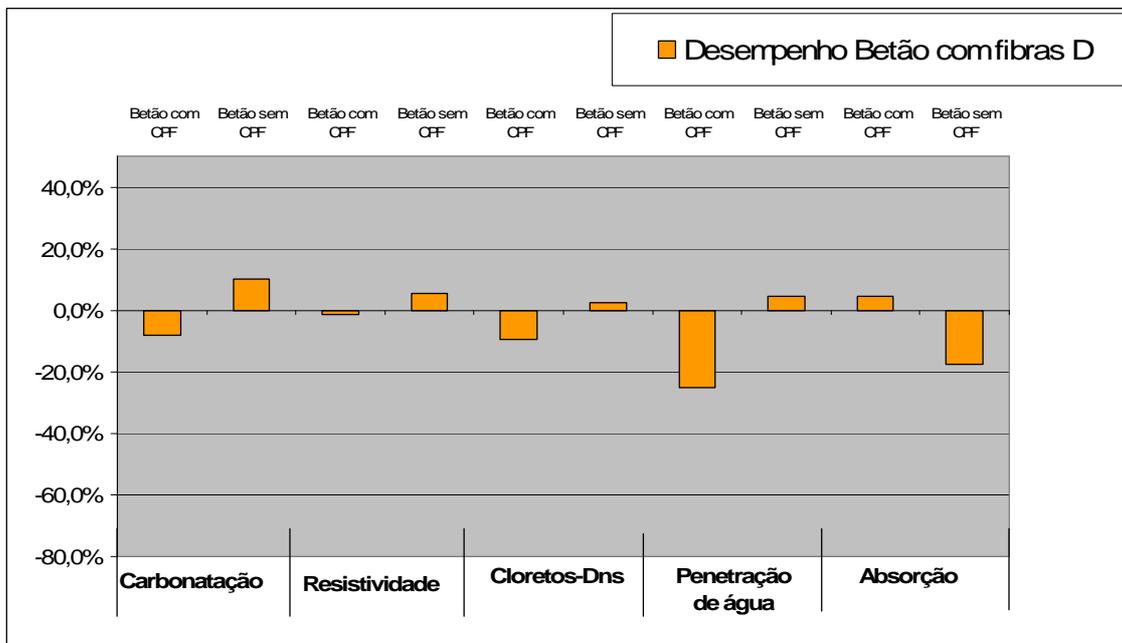


Figura 54 – Comparação de desempenho entre betão com fibras D e o betão de controlo

4.4. BETÕES COM FIBRAS F VS BETÕES COM FIBRAS D

Comparam-se agora os betões com fibras D relativamente aos betões com fibras F como se estes fossem os de controlo.

$$+ \frac{V_{controlo} - V_{betão\ fibras}}{V_{controlo}} \times 100\% \quad (26) \quad ; \quad - \frac{V_{controlo} - V_{betão\ fibras}}{V_{controlo}} \times 100\% \quad (27)$$

Em que:

$V_{controlo}$ – Valor obtido no ensaio para o betão com fibras F

$V_{betão\ fibras}$ – Valor obtido no ensaio para o betão com fibras D

Quadro 25 – Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras D com betão com fibras F

Desempenho – Fibras F vs Fibras D				
		Fibras F	Fibras D	Melhoria
Carbonatação	Betão c/ CPF	100%	91.7%	-8.7%
	Betão s/ CPF	100%	110.3%	+10.3%
Resistividade	Betão c/ CPF	100%	110.5%	+10.5%
	Betão s/ CPF	100%	104.1%	+4.1%
Cloretos – DNS	Betão c/ CPF	100%	105.2%	+5.2%
	Betão s/ CPF	100%	98.0%	-2.0%
Penetração de água	Betão c/ CPF	100%	116.7%	16.7%
	Betão s/ CPF	100%	56.8%	-43.2%
Absorção	Betão c/ CPF	100%	103.9%	3.9%
	Betão s/ CPF	100%	100.0%	0.0%

Verifica-se um comportamento muito homogéneo entre os betões com os dois tipos de fibras sintéticas. Com certeza que esta proximidade dos resultados se deve à natureza das fibras em si e naturalmente das condições de ensaio. Ainda assim, podemos observar uma melhoria, ainda que quase impercível nos betões com fibras D.

O gráfico em baixo apresenta em forma de resumo as várias comparações feitas. De forma a melhor se compreender o gráfico tomaram-se os valores dos betões com fibras F como 100 % variando assim apenas o valor do betão com fibras D.

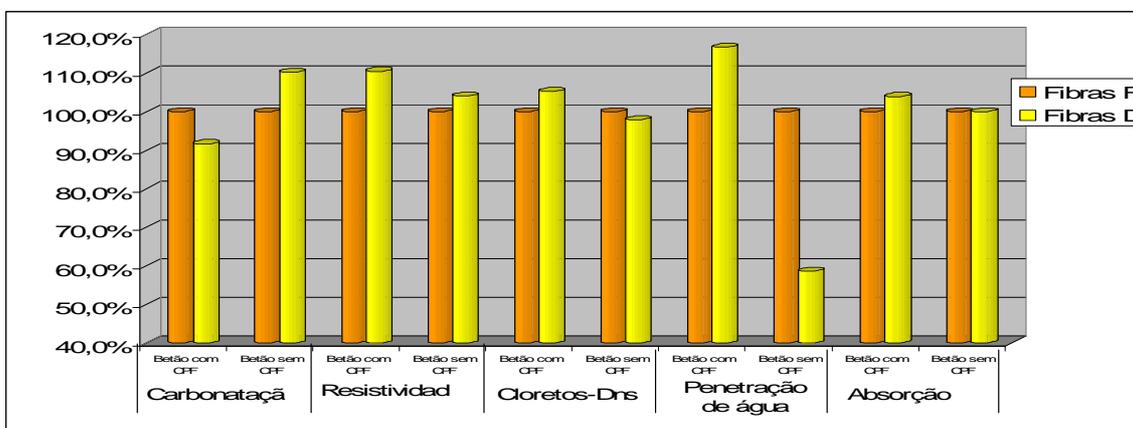


Figura 55– Conclusões – Comparação de desempenho de betão com fibras D com betão com fibras F

4.5. QUADRO RESUMO – EFEITO DO CPF EM BETÕES COM FIBRAS

Como conclusão, apresenta-se o resumo de todos os desempenhos dos betões com fibras cofrados com CPF, em comparação com os betões cofrados tradicionalmente. O Quadro 26 representa esse conjunto de resultados.

Quadro 26 – Conclusões – Quadro resumo de desempenhos dos betões com CPF

Quadro resumo - Desempenho			
	Fibras M	Fibras F	Fibras D
Carbonatação	63.7%	84.6%	81.4%
Resistividade	-	29.3%	31.2%
Cloretos - DNS	-	35.9%	40.4%
Penetração de água	88.6%	53.8%	86.4%
Absorção	9.2%	29.3%	31.4%
Resistência superficial	3.9%	36.2%	30.3%

Pode-se constatar que de facto o CPF imprimiu em todos os provetes ensaiados melhorias significativas. Obteve-se uma melhoria de média entre 30 e 40 % em alguns parâmetros de durabilidade como a resistência superficial, a absorção de água por capilaridade, a penetração de cloretos e a resistividade. A resistência à penetração de água sob pressão e à carbonatação apresentam-se como valores mais elevados em termos de melhoria de desempenho. Pode-se assim concluir com alguma confiança, que os betões ensaiados no presente projecto apresentam muitas vantagens quando cofrados com cofragem de permeabilidade controlada – CPF.

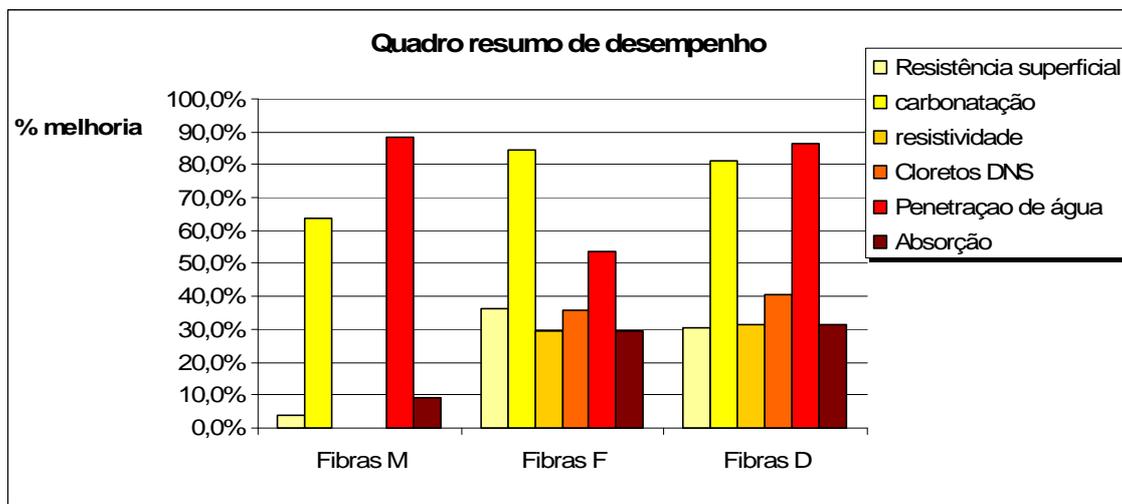


Figura 56 – Conclusões – Gráfico do quadro resumo de desempenhos dos betões com CPF

4.6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Sugere-se prosseguir os estudos para confirmar (ou não) os resultados obtidos, quer em termos de CPF quer em termos de fibras, incluindo fibras de diversas naturezas usadas em betões contribuindo assim para o aperfeiçoamento da nobre arte de construção civil.

BIBLIOGRAFIA

- ACI - *Durable Concrete*. Publications MI, USA, 1994.
- Civitas - Centro de estudos sobre cidades e vilas sustentáveis. (2008). p.
- Cóias, Victor - *Editorial*. 2005.
- Costa, A. - *Durabilidade de estruturas de betão armado em ambiente marítimo*. 1996.
- Coutinho, Agostinho de Sousa - *Fabrico e Propriedades do Betão*. Lisboa: LNEC, 1997.
- Coutinho, Maria Joana Álvares Ribeiro de Sousa - *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*. Porto: FEUP, 1998.
- DuPont - 1996.
- Ferreira, Nuno - *Influencia das características das fibras no desempenho do betão*. Porto: FEUP, 2008.
- Geyer, W. - *Extending the life of the williamsburg bridge*. Lisboa: 1989.
- Harrisson, A. , Varma, S. ,winter,N. - *Alkali-silica gel formation at an early age trought solution*. Detroit: 1987.
- Kanstad, T. - *Design rules for steel fibre reinforced concrete structures*. 2004.
- Li, V. - Large Volume, highperformance applications of fibers in civil engineering. *Journal of applied polymer sciences*. 83:(2000). p.
- Lofgren, I. - *Fibre reinforced concrete for industrial construction*. Gotemburgo: Chalmers University of Technology, 2005.
- Marosszeky, M. - *Textile form method to improve concrete durability*. 1993.
- Masy, M. - *Proteccion y reparacion de estructuras de hormigon. Edificios, obras hidraulicas e viales*. Barcelona: 1996.
- Neville, A. M. - *Properties of Concrete*. Essex, United Kingdom: Longman, 1995.
- Nixon, P. e Page, C - *Pore solution chemistry and alkali-aggregate reaction*. Detroit: 1987.
- Quintela, A.C. - *Contribuição para a História do betão armado - Primeiras obras*. 1989.
- Schiessl, P. - *Influence of the composition of concrete on the corrosion protection of the reinforcement*. Detroit: 1987.
- Singh - Pullout behaviour of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cement and concrete composites*. (2004). p.
- Stanley, C. - *Highlights in the History of concrete*. 1982.
- Stark, D. - *Deterioration due to sulfate reactions in Portland cement stabilized slag aggregate concrete*. Detroit: 1987.
- E 391. [1993]. “Betões. Determinação da resistência à carbonatação”.
- E 392. [1993]. “Betões. Determinação da permeabilidade ao oxigénio”.
- E 393. [1993]. “Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade”.
- E 398. [1993]. “Betões. Determinação da retracção e da expansão”.
- E 463. [2004]. “Betão. Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário”.
- NP EN 206 – 1. [2007]. “Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”.
- NP EN 12350 – 2. [2002]. “Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento”.
- NP EN 12390 – 1. [2003]. “Ensaio do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e moldes”.
- NP EN 12390 – 2. [2003]. “Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica”.

NP EN 12390 – 3. [2003]. “Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”.

NP EN 12390 – 5. [2003]. “Ensaio do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes”

NP EN 12390 – 8. [2003]. “Ensaio do betão endurecido. Parte 8: Profundidade de penetração da água sob pressão”.

RILEM. [2002]. “TC 116 PCD: Recommendation of TC 116 PCD: Test for gas permeability of concrete. Preconditioning of concrete test specimens for the measurement of gas permeability and capillary absorption of water. Measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM.

CEMBUREAU method. Determination of capillarity absorption of water of hardened concrete, RILEM”.

RILEM. [2004]. “TC 154-EMC: Techniques for measuring metallic corrosion”.

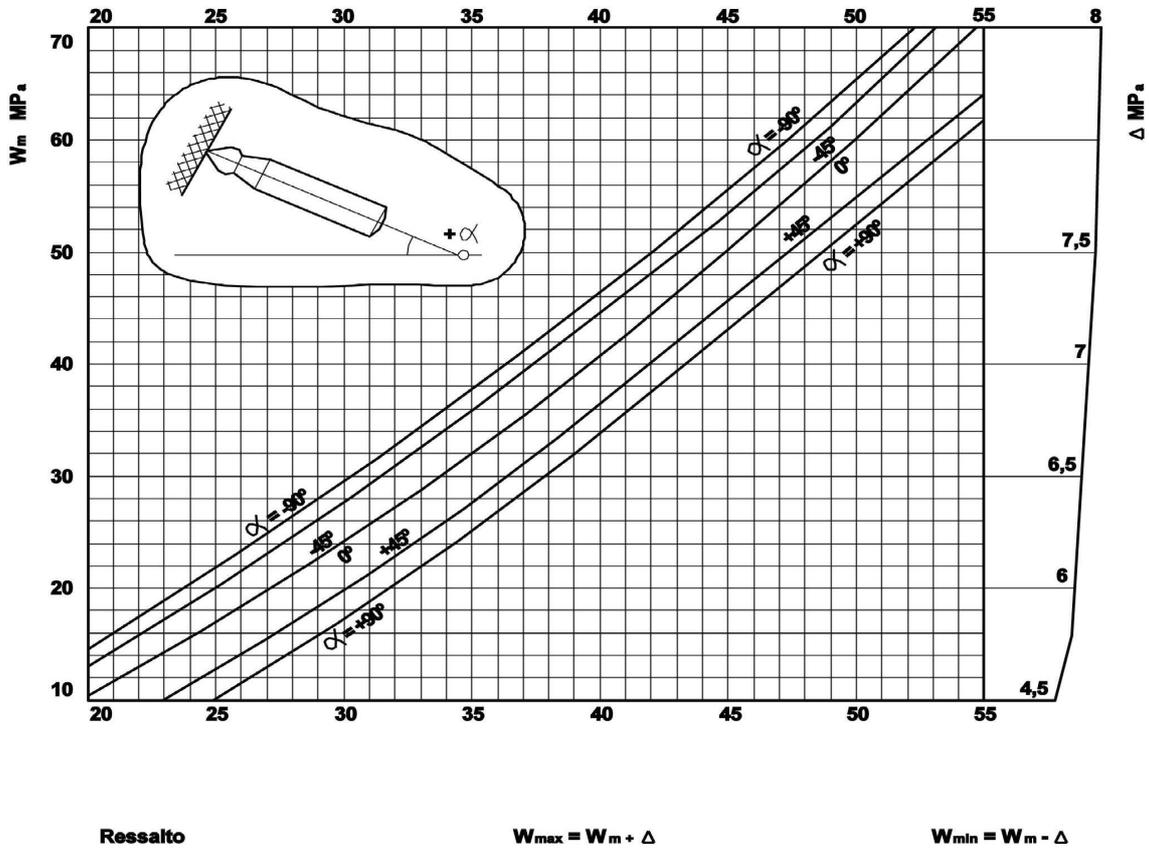
Anexos

Anexo I – Quadros, tabelas e ábacos

Quadro - Classes de abaixamento

Classe	Abaixamento (mm)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	≥160

Ábaco - índice esclorometrico



Anexo II – Resultados de Ensaio

Anexo II.1 – Resultado do ensaio de resistência superficial

		Nível 1			Nível 2			Nível 3			
Parede 1	Betao controlo fibras metalicas	Parede1	37	42	43	43	42	42	42	42	42
Parede 2	Betao com fibras metalicas	Sem	43	44	42	44	37	36	46	38	46
Parede 3	Betao controlo fibras Fisipe	CPF	42	42	42	40	38	38	46	48	48
Parede 4	Betao com fibras Fisipe	Parede1	46	46	44	48	47	46	50	47	50
Parede 5	Betao controlo fibras Durofibril	Com	52	47	42	49	46	53	48	48	48
Parede 6	Betao com fibras Durofibril	CPF	43	44	46	43	48	52	48	47	51
		Parede2	44	44	46	45	42	42	40	48	48
		Sem	43	50	44	42	40	48	48	38	41
		CPF	43	44	42	47	42	43	43	43	42
		Parede2	47	44	45	47	46	46	45	42	44
		Com	44	45	44	47	52	44	44	46	42
		CPF	43	44	42	45	48	44	48	43	45
		Parede3	30	30	38	33	38	32	47	31	33
		Sem	29	36	40	31	37	37	33	42	33
		CPF	30	33	43	30	37	30	30	32	34
		Parede3	49	44	49	48	49	50	50	48	50
		Com	49	47	47	48	52	50	48	52	48
		CPF	48	46	45	52	49	47	48	49	49
		Parede4	33	35	32	30	38	35	34	27	30
		Sem	45	38	33	42	42	30	31	30	39
		CPF	34	29	32	32	30	31	30	30	28
		Parede4	47	43	43	45	46	50	44	42	43
		Com	46	43	42	47	45	44	45	40	43
		CPF	43	43	42	44	42	43	42	40	46
		Parede5	31	33	32	29	30	30	35	39	32
		Sem	34	28	38	30	30	30	32	28	28
		CPF	31	28	35	30	32	30	38	30	29
		Parede5	46	47	49	50	50	52	49	47	46
		Com	48	49	53	51	51	51	53	45	46
		CPF	48	46	47	52	50	50	50	44	46
		Parede6	33	34	30	32	36	32	32	34	32
		Sem	31	40	30	32	35	33	30	33	30
		CPF	32	41	34	33	35	48	32	32	32
		Parede6	42	44	40	41	44	44	43	42	43
		Com	42	43	44	42	44	45	40	43	42
		CPF	42	41	46	40	41	44	42	44	48

Anexo II.2 – Resultado do ensaio de resistência à compressão

Resultados - Ensaio de compressão

	Provete 1		Provete 2		Provete 3	
	Peso (kg)	Carga	Peso (kg)	Carga	Peso (Kg)	Carga
Betao c/ Fibras Fisipe	7,916	114,0	7,946	120,0	7,918	116,0
Betao Ctl Fibras Fisipe	8,066	124,0	8,000	122,0	7,928	117,0
Betao C/ Fibras Durofibril	8,010	131,0	8,135	122,0	7,891	119,0
Betao CTL Fibras Durofibril	7,993	115,0	8,076	117,0	8,016	114,0
Betao C/ Fibras metalicas	7,579	75,0	7,586	84,0	8,106	108,0
Betao CTL Fibras metalicas	8,038	124,0	8,152	126,0	8,065	128,0

Anexo II.3 – Resultado do ensaio de carbonatação

RESULTADOS DO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO				
		Profundidade Carbonatação		Média
		H max	Media	
D	CA1	7,5	7,0	7,0
	CA2	8,5	7,0	
D CPF	CA1	2,0	1,5	1,3
	CA2	1,0	1,0	
CTL D	CA1	8,0	7,5	7,8
	CA2	8,0	8,0	
CTL D CPF	CA1	1,0	1,0	1,2
	CA2	1,5	1,5	
F	CA1	8,5	8,0	7,8
	CA2	8,5	7,5	
F CPF	CA1	1,5	1,0	1,2
	CA2	1,5	1,5	
CTL F	CA1	9,0	8,0	8,5
	CA2	9,0	9,0	
CTL F CPF	CA1	3,0	2,5	2,0
	CA2	2,5	1,5	
M	CA1	19,0	12,0	11,5
	CA2	13,0	11,0	
M CPF	CA1	7,0	3,5	4,3
	CA2	7,0	5,0	
CTL M	CA1	14,0	13,0	12,0
	CA2	15,5	11,0	
CTL M CPF	CA1	8,5	6,0	5,5
	CA2	10,0	5,0	

	Provete	Voltagem (V)	Área transversal (m ²)	Comprimento do provete (m)	Corrente Inicial (mA)	ρ	Média	Desv. Pad	Resultado
F	CL1	-	-	-	-	-	58,13	3,34	58,13±3,34
	CL2	30	0,01	0,05	77,90	60,49			
	CL3	30	0,01	0,05	84,50	55,77			
F CPF	CL1	30	0,01	0,05	61,00	77,25	72,60	4,83	72,60±4,83
	CL2	30	0,01	0,05	64,60	72,95			
	CL3	30	0,01	0,05	69,70	67,61			
CTL F	CL1	30	0,01	0,05	69,60	67,71	60,08	7,03	60,08±7,03
	CL2	30	0,01	0,05	80,30	58,68			
	CL3	30	0,01	0,05	87,50	53,86			
CTL F CPF	CL1	30	0,01	0,05	61,30	76,87	75,06	1,57	75,06±1,57
	CL2	30	0,01	0,05	63,60	74,09			
	CL3	30	0,01	0,05	63,50	74,21			
D	CL1	30	0,01	0,05	72,70	64,82	60,49	3,75	60,49±3,75
	CL2	30	0,01	0,05	80,80	58,32			
	CL3	30	0,01	0,05	80,80	58,32			
D CPF	CL1	30	0,01	0,05	56,30	83,70	80,23	5,04	80,23±5,04
	CL2	30	0,01	0,05	57,10	82,53			
	CL3	30	0,01	0,05	63,30	74,45			
CTL D	CL1	30	0,01	0,05	73,90	63,77	57,55	7,00	57,55±7,00
	CL2	30	0,01	0,05	94,30	49,97			
	CL3	30	0,01	0,05	80,00	58,90			
CTL D CPF	CL1	30	0,01	0,05	50,80	92,76	81,17	10,80	81,17±10,8
	CL2	30	0,01	0,05	59,40	79,33			
	CL3	30	0,01	0,05	66,00	71,40			

Anexo II.4 – Resultado do ensaio de Penetração de Cloretos – Resistividade

		Temperatura							
		Média	Coulomb	T inicial	Tfinal	tempo	Voltagem	Valores	
F	CL1							17,11±,61	
	CL2	37,2	6340	24	27	24	30		17,53
	CL3	35,5	6639	24	27	24	30		16,68
F CPF	CL1	23,3	4938	24	28	24	30	10,62	10,97 ± 0,34
	CL2	24,1	5036,0	24	28	24	30	11,01	
	CL3	24,7	5110	23	27	24	30	11,29	
CTL F	CL1	31,9	6066	23	28	24	30	14,86	16,17 ± 1,14
	CL2	36,1	6764	23	26	24	30	16,91	
	CL3	35,3	7218	25	33	24	30	16,75	
CTL F CPF	CL1	20,7	4944	25	29	24	30	9,38	9,59 ± 0,47
	CL2	22,3	5198	24	28	24	30	10,13	
	CL3	20,5	4426	24	28	24	30	9,25	
D	CL1	37,0	5694	22	27	24	30	17,37	17,45 ± 0,76
	CL2	38,6	6496	23	28	24	30	18,25	
	CL3	35,6	6558	23	29	24	30	16,74	
D CPF	CL1	23,5	4097	23	27	24	30	10,69	10,40 ± 0,93
	CL2	20,8	4447	23	27	24	30	9,36	
	CL3	24,4	4557	23	29	24	30	11,15	
CTL D	CL1	34,9	5827	22	27	24	30	16,30	17,82 ± 2,16
	CL2	42,7	7396	22	29	24	30	20,30	
	CL3	35,9	6174	22	29	24	30	16,86	
CTL D CPF	CL1	17,2	3714	24	27	24	30	7,63	9,544 ± 1,82
	CL2	21,5	4541	24	28	24	30	9,74	
	CL3	24,6	4888	23	27	24	30	11,26	

AnexoII.5–Resultado do ensaio de Penetração de cloretos–DNS

Anexo II.6 Resultado do ensaio de penetração de água sob pressão

Provetes	Profundidade	Média	
P1 D	3,7	4,5	
P2 D	4,3	3,9	4,1
P3 D	5,2	3,8	
P1 D CPF	0,6	1	
P2 D CPF			1,0
P3 D CPF			
P1 CTL D	3,65	4,2	
P2 CTL D	4,6	4,1	4,3
P3 CTL D	4,75	4,6	
P1 CTL D CPF	0,6	0,9	
P2 CTL D CPF	1	0,6	0,8
P3 CTL D CPF	0,7	0,8	
P1 F			
P2 F			2,9
P3 F	2,6	2,9	
P1 F CPF	0,45	0,9	
P2 F CPF	1,2	1,1	1,2
P3 F CPF	1,8	1,5	
P1 CTL F	2,7	2,6	
P2 CTL F	2,8	2,4	2,5
P3 CTL F	2,1	2,5	
P1 CTL F CPF	0,3	0,3	
P2 CTL F CPF	0,25	0,3	0,3
P3 CTL F CPF	0,2	0,2	
P1 CTL M			
P2 CTL M	3,4	4,5	3,5
P3 CTL M	3,3	2,4	
P1 CTL M CPF			
P2 CTL M CPF	0,1	0,1	0,4
P3 CTL M CPF	2,5	0,7	
P1 M	0,3	3,3	
P2 M	2,9	3,4	3,4
P3 M			
P1 M CPF	0,4	0,1	
P2 M CPF	4	2,5	1,3
P3 M CPF			

Anexo II.7 – Resultado do ensaio de Absorção de água

Resultado das pesagens dos provetes de absorção						
Provetes	dia 1	dia 2			ΔM (%)	
A1 D	1,951	1,950			0,051	✓
A2 D	2,171	2,170			0,046	✓
A3 D	1,988	1,987			0,050	✓
A1 D CPF	2,122	2,121			0,047	✓
A2 D CPF	2,028	2,027			0,049	✓
A3 D CPF	2,006	2,006			0,00	✓
A1 CTL D	2,174	2,172			0,092	✓
A2 CTL D	2,175	2,173			0,092	✓
A3 CTL D	2,116	2,116			0,00	✓
A1 CTL D CPF	2,270	2,269			0,044	✓
A2 CTL D CPF	2,275	2,274			0,044	✓
A3 CTL D CPF	2,150	2,149			0,047	✓
A1 F	2,027	2,025			0,099	✓
A2 F	2,166	2,165			0,046	✓
A3 F	2,140	2,138			0,093	✓
A1 F CPF	1,977	1,976			0,051	✓
A2 F CPF	2,117	2,117			0,00	✓
A3 F CPF	2,235	2,233			0,089	✓
A1 CTL F	2,032	2,032			0,00	✓
A2 CTL F	2,058	2,058			0,00	✓
A3 CTL F	2,152	2,152			0,00	✓
A1 CTL F CPF	2,096	2,096			0,00	✓
A2 CTL F CPF	2,103	2,103			0,00	✓
A3 CTL F CPF	2,242	2,241			0,045	✓
A1 CTL M	1,924	1,924			0,00	✓
A2 CTL M	1,939	1,939			0,00	✓
A3 CTL M	1,907	1,907			0,00	✓
A1 CTL M CPF	1,740	1,740			0,00	✓
A2 CTL M CPF	1,703	1,703			0,00	✓
A3 CTL M CPF	1,755	1,755			0,00	✓
A1 M	1,726	1,725			0,058	✓
A2 M	1,819	1,818			0,055	✓
A3 M	1,797	1,796			0,056	✓
A1 M CPF	1,887	1,887			0,00	✓
A2 M CPF	1,788	1,788			0,00	✓
A3 M CPF	1,830	1,830			0,00	✓

Resultado com os coeficientes de absorção $\times 10^3 \frac{mg}{mm^2 \cdot \sqrt{min}}$		
Provetes	Coeficientes da curva	Média
A1 D	105,50	107,7 ± 10,923
A2 D	98,10	
A3 D	119,60	
A1 D CPF	71,50	73,9 ± 5,636
A2 D CPF	80,30	
A3 D CPF	105,80	
A1 CTL D	105,80	112,1 ± 5,794
A2 CTL D	113,30	
A3 CTL D	117,20	
A1 CTL D CPF	49,50	62,24 ± 15.799
A2 CTL D CPF	57,60	
A3 CTL D CPF	80,00	
A1 F	98,70	107,5 ± 9,824
A2 F	105,70	
A3 F	118,10	
A1 F CPF	80,00	76,0 ± 14,108
A2 F CPF	72,90	
A3 F CPF	91,40	
A1 CTL F	101,70	120,0 ± 6,806
A2 CTL F	95,40	
A3 CTL F	109,00	
A1 CTL F CPF	49,60	54,1 ± 4,552
A2 CTL F CPF	53,90	
A3 CTL F CPF	58,70	
CA 1	76,70	77,9 ± 1,607
CA 2	77,20	
CA 3	79,70	
CA 1 CPF	57,10	56,4 ± 2,483
CA 2 CPF	53,60	
CA 3 CPF	58,40	
FA 1	65,10	64,4 ± 1,701
FA 2	65,70	
FA 3	62,50	
FA 1 CPF	54,30	58,5 ± 4,471
FA 2 CPF	58,00	
FA 3 CPF	63,20	