



**Influência dos adjuvantes no comportamento de um  
endurecedor de superfície de quartzo aplicado em  
diferentes betões de base**

**Ana Rita da Silva Sequeira**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**

**Orientadora: Doutora Maria Teresa Guerra Pinheiro Alves**

**Outubro de 2011**



**Influência dos adjuvantes no comportamento de um  
endurecedor de superfície de quartzo aplicado em  
diferentes betões de base**

**Ana Rita da Silva Sequeira**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**

**Orientadora: Doutora Maria Teresa Guerra Pinheiro Alves**

**Outubro de 2011**

*Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito do projecto PTDC/ECM/105075/2008.*

## **Agradecimentos**

Fica uma palavra de gratidão a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, à minha orientadora, Professora Teresa Pinheiro Alves, não só por todo o empenho e incentivo na realização deste trabalho, mas também pela transmissão de conhecimentos, proporcionando-me esta enriquecedora experiência.

Ao Engenheiro Bettencourt Ribeiro por toda a disponibilidade, sabedoria e valiosa ajuda que prestou no decorrer da campanha experimental.

Aos meus amigos e companheiros André Fernandes e Maria João Marques, pela entreajuda e pelo espírito de equipa que partilhámos nas árduas e longas horas de laboratório.

À empresa Britobetão por todo o material que disponibilizou para o fabrico das lajetas, em especial ao Sr. Luís Nunes que sempre se mostrou disponível.

À minha família e aos meus amigos, pela permanente motivação que me deram em concluir esta etapa.

Por último, e o mais importante agradecimento, aos meus pais, que sempre acreditaram nas minhas capacidades e me proporcionaram esta a formação académica.

A todos, obrigada!



## Resumo

A precoce fissuração e delaminação de pavimentos de betão com endurecedor de superfície são uma crescente problemática em Portugal.

Como principais causas para a ocorrência destas anomalias, são apontadas, na literatura, as operações de acabamento e a composição do betão que, por sua vez, está directamente relacionada com o aumento da finura do cimento, com a quantidade de silicato tricálcico do cimento e com a crescente introdução de adjuvantes no betão.

A presente dissertação apresenta um estudo desenvolvido em laboratório sobre a influência que plastificantes e superplastificantes podem ter no comportamento de um endurecedor de superfície de quartzo quando aplicado em diferentes betões de base.

Os resultados obtidos mostram que os adjuvantes adicionados ao betão de base têm uma grande influência no controlo do chamado “tempo aberto”, que é essencial para evitar a fissuração e delaminação do endurecedor de superfície.

**Palavras-Chave:** endurecedor de superfície, exsudação, fissuração, delaminação.

## **Influence of admixtures on the behavior of a quartz surface hardener applied in different base concrete**

Precocious cracking and delamination of concrete pavements with surface hardener are a growing problem in Portugal.

As main causes for the occurrence of these abnormalities are noted, in literature, the finishing operations and the composition of concrete, which in turn is directly related to the increase of the fineness of cement, with the amount of tricalcium silicate cement and with the increasing introduction of admixtures in concrete.

This dissertation presents a study developed in the laboratory about the influence that plasticizers and behavior of superplasticisers may have in a quartz surface hardener when applied in different concrete base.

The results obtained show that the basic concrete admixtures added to have a great influence on the control of the so-called "open time", which is essential to avoid cracking and delamination of surface hardener.

**Keywords:** surface hardener, exudation, cracking, delamination.





# Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento geral .....	1
1.2 Objectivo .....	2
1.3 Estrutura da dissertação .....	2
2. Antecedentes.....	4
2.1 Principais diferenças entre cimentos antigos e actuais .....	4
2.2 Endurecedores de superfície .....	4
2.2.1 Aplicação.....	5
2.2.2 Problemas .....	7
2.3 Efeito dos adjuvantes nas misturas cimentícias.....	10
2.3.1 Plastificantes.....	11
2.3.2 Superplastificantes.....	12
2.4 Limitação do uso de adjuvantes em pavimentos de betão com endurecedor de superfície .....	13
3. Materiais.....	14
3.1 Cimento .....	14
3.2 Areia.....	16
3.2.1 Granulometria .....	16
3.2.2 Massa volúmica, absorção de água e humidade.....	16
3.3 Brita.....	17
3.3.1 Granulometria.....	17
3.3.2 Massa volúmica, absorção de água e humidade .....	19
3.4 Água.....	19
3.5 Adjuvantes.....	19
3.5.1 Adjuvante 390NP.....	19
3.5.2 Adjuvante 540.....	20
3.5.3 Adjuvante 898.....	20
3.5.4 Adjuvante 561.....	21
3.6 Endurecedor de superfície.....	21
4. Metodologia .....	23
4.1 Betão de base .....	29

4.2	Aplicação do endurecedor .....	33
4.3	Afagamento .....	34
4.4	Determinação da taxa de evaporação .....	35
4.5	Ensaio no estado fresco.....	35
4.5.1	Ensaio de consistência .....	35
4.5.2	Determinação da resistência à penetração.....	36
4.6	Ensaio no estado endurecido.....	38
4.6.1	Ensaio de resistência à compressão .....	38
4.6.2	Ensaio de arrancamento por pull-off .....	43
4.6.3	Determinação da massa volúmica e porosidade aberta.....	44
4.6.4	Determinação da dureza pelo índice esclerométrico.....	46
5.	Resultados.....	47
5.1	Temperaturas e taxa de evaporação .....	47
5.2	Água adicionada na aplicação do endurecedor .....	48
5.3	Instantes de aplicação do endurecedor .....	48
5.4	Composição base.....	49
5.4.1	Resistência à compressão.....	49
5.4.2	Massa volúmica e porosidade aberta .....	50
5.5	Adjuvante 390NP.....	50
5.5.1	Resistência à compressão.....	50
5.5.2	Arrancamento por pull-off .....	52
5.5.3	Massa volúmica e porosidade aberta .....	52
5.5.4	Índice esclerométrico.....	53
5.6	Adjuvante 540.....	54
5.6.1	Resistência à compressão.....	54
5.6.2	Arrancamento por pull-off .....	55
5.6.3	Massa volúmica e porosidade aberta .....	56
5.6.4	Índice esclerométrico.....	56
5.7	Adjuvante 898.....	57
5.7.1	Resistência à compressão.....	57
5.7.2	Arrancamento por pull-off .....	58
5.7.3	Massa volúmica e porosidade aberta .....	59

5.7.4	Índice esclerométrico.....	59
5.8	Adjuvante 561.....	60
5.8.1	Resistência à compressão.....	61
5.8.2	Arrancamento por pull-off .....	62
5.8.3	Massa volúmica e porosidade aberta .....	63
5.8.4	Índice esclerométrico.....	63
6.	Análise de resultados .....	65
7.	Conclusões.....	70
8.	Sugestões para desenvolvimentos futuros.....	72
	Bibliografia.....	73
	Anexo .....	75
	Anexo 1 – Dados de fabrico das lajetas .....	i
	Anexo 2 – Resistência à compressão dos provetes cúbicos de 15 cm.....	vi

## Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Curva granulométrica da areia .....	16
Gráfico 2 - Curva granulométrica da brita 1 .....	18
Gráfico 3 - Curva granulométrica da brita 2 .....	18
Gráfico 4 - Resistência à compressão do betão com composição base .....	49
Gráfico 5 - Resistência à compressão do 390NP .....	51
Gráfico 6 - Resistência à compressão do 540 .....	54
Gráfico 7 - Resistência à compressão do 898 .....	57
Gráfico 8 - Resistência à compressão do 561.....	61
Gráfico 9 - Evolução da resistência à compressão das várias composições .....	66
Gráfico 10 - Resistência à compressão das várias composições aos 64 dias .....	67
Gráfico 11 - Porosidade aberta das diferentes composições .....	67
Gráfico 12 - Resistências resultantes do ensaio esclerométrico .....	69

## Índice de Quadros

Quadro 1 - Composição do CEM II/A-L 42,5 R .....	14
Quadro 2 - Análise química do CEM II/A-L 42,5 R .....	14
Quadro 3 - Ensaio físicos ao CEM II/A-L 42,5 R .....	15
Quadro 4 - Ensaio mecânicos ao CEM II/A-L 42,5 R .....	15
Quadro 5 - Propriedades mecânicas e físicas do endurecedor de superfície .....	22
Quadro 6 - Composição base do betão inicialmente estabelecida.....	24
Quadro 7 - Composição base do betão .....	30
Quadro 8 - Composições dos betões de base das amostras .....	30
Quadro 9 – Temperatura e evaporação no interior dos túneis .....	47
Quadro 10 – Quantidade de água adicionada na aplicação do endurecedor .....	48
Quadro 11 – Instantes em que foram colocados os endurecedores .....	48
Quadro 12 - Massa volúmica e porosidade aberta do betão com composição base .....	50
Quadro 13 – Resistência à compressão do 390NP aos 64 dias .....	51
Quadro 14 – Resistência por pull-off no 390NP .....	52
Quadro 15 – Massa volúmica e porosidade aberta do 390NP .....	53
Quadro 16 – Resistência à compressão da superfície do 390NP .....	53
Quadro 17 – Resistência à compressão do 540 aos 64 dias .....	55
Quadro 18 – Resistência por pull-off no 540 .....	55
Quadro 19 – Massa volúmica e porosidade aberta do 540 .....	56
Quadro 20 – Resistência à compressão da superfície do 540 .....	56
Quadro 21 - Resistência à compressão do 898 aos 64 dias .....	58
Quadro 22 – Resistência por pull-off no 898 .....	58
Quadro 23 - Massa volúmica e porosidade aberta do 898 .....	59
Quadro 24 - Resistência à compressão da superfície do 898 .....	60

Quadro 25 – Resistência à compressão do 561 aos 64 dias .....	62
Quadro 26 – Resistência por pull-off no 561 .....	62
Quadro 27 – Massa volúmica e porosidade aberta do 561 .....	63
Quadro 28 – Resistência à compressão da superfície do 561 .....	64
Quadro 29 – Quantidade de água disponível por composição .....	65

## Índice de Figuras

Figura 1 – Pavimento de um pavilhão industrial .....	6
Figura 2 – Pavimento de um parque de estacionamento .....	6
Figura 3 – Aproveitamento de ar e água sob a camada superficial .....	8
Figura 4 – Efeito dispersante de um plastificante .....	11
Figura 5 – Moldes de madeira .....	24
Figura 6 – 2º Protótipo .....	25
Figura 7 – 3º Protótipo .....	25
Figuras 8 – 4º Protótipo .....	26
Figura 9 – 5º Protótipo .....	26
Figura 10 – 1ª Campânula .....	27
Figura 11 – Interior da 2ª campânula .....	27
Figuras 12 – Túnel 1 .....	28
Figura 13 – Túnel 2 .....	28
Figura 14 – Pesagens para o fabrico do betão .....	31
Figuras 15 – Fabrico do betão .....	31
Figura 16 – Vibração do betão de base .....	32
Figuras 17 – Nivelamento do betão de base .....	32
Figura 18 – Aplicação do endurecedor de superfície .....	33
Figura 19 – Afagamento das lajetas .....	34
Figura 20 – Superfície obtida depois do acabamento .....	34
Figura 21 – Cone de Abrams .....	35
Figura 22 – Medição do abaixamento .....	36
Figura 23 – Peneiração do betão de base .....	36
Figura 24 – Equipamento de medição do índice de presa .....	37
Figura 25 – Medição do índice de presa .....	37

Figura 26 – Máquina de ensaio à compressão dos provetes cúbicos .....	39
Figuras 27 - Rotura satisfatória de um provete cúbico .....	39
Figura 28 – Caroteamento .....	40
Figura 29 – Máquina de corte .....	41
Figura 30 – Rectificação dos provetes .....	41
Figura 31 – Máquina de ensaio à compressão dos provetes cilíndricos .....	42
Figura 32 – Provede cilíndrico depois de ensaiado à compressão .....	42
Figura 33 – Colagem das bolachas na lajeta .....	43
Figura 34 – Ensaio de arrancamento por pull-off .....	43
Figura 35 – Estufa .....	44
Figura 36 – Pesagem do provede imerso .....	44
Figura 37 – Esclerómetro .....	46



## Índice de Quadros em Anexo

Quadro A.1 – Dados de fabrico das lajetas com o 390NP .....	i
Quadro A.2 – Dados de fabrico das lajetas com o 540 .....	ii
Quadro A.3 – Dados de fabrico das lajetas com o 898 .....	iii
Quadro A.4 – Dados de fabrico das lajetas com o 561 (8,5 MPa 8,5 MPa+45).....	iv
Quadro A.5 – Dados de fabrico das lajetas com o 561 (4,0 MPa e 5,3 MPa) .....	v
Quadro A.6 – Resistência à compressão do betão com composição base .....	vi
Quadro A.7 – Resistência à compressão do 390NP .....	vi
Quadro A.8 – Resistência à compressão do 540 .....	vi
Quadro A.9 – Resistência à compressão do 898 .....	vii
Quadro A.10 – Resistência à compressão do 561 .....	vii

## **Abreviaturas**

A/C – água/cimento;

# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento geral

Actualmente, é prática corrente em pavimentos sujeitos a rigorosas solicitações mecânicas e elevados níveis de desgaste, optar por pavimentos em betão com endurecedor de superfície.

No entanto, é crescente o registo de anomalias neste tipo de elementos construtivos que se manifestam essencialmente na fissuração e na delaminação do endurecedor. Esta problemática acarreta graves implicações económicas uma vez que a sua correcção envolve grandes áreas de reconstrução, por vezes com recurso a materiais dispendiosos, e também porque pode implicar um atraso no período de construção da infra-estrutura.

São já conhecidas e relatadas algumas causas que podem provocar este tipo de anomalias, como o uso de ligantes cada vez mais finos e com maior conteúdo de silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e também o recurso cada vez mais frequente aos adjuvantes no fabrico do betão. Estes factores podem traduzir incompatibilidade na execução dos acabamentos das superfícies com os métodos tradicionais, como o aprisionamento de água e ar na camada inferior ao endurecedor e a disseminação de argamassa macia em áreas em que a camada subjacente se encontra já endurecida.

Na presente dissertação são referidos alguns nomes comerciais, no entanto, os mesmos não devem ser interpretados como uma recomendação da autora, orientadora ou Universidade de Évora.

O estudo em causa está inserido no âmbito do projecto de investigação PTDC/ECM/105075/2008 e toda a campanha experimental decorreu no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Évora.

## **1.2 Objectivo**

Baseada numa campanha experimental em laboratório, a presente dissertação tem como objectivo avaliar a influência que adjuvantes, com efeito superplastificante e plastificante, podem ter no comportamento de um endurecedor de superfície de quartzo aplicado em diferentes betões de base.

Foram fabricadas várias lajetas com diferentes composições base com a aplicação de um único endurecedor de superfície de quartzo em diferentes instantes, com constante controlo de temperatura e humidade.

Diferentes ensaios foram realizados, tais como: ensaios de consistência (abaixamento pelo cone de Abrams), resistência à compressão, resistência ao arrancamento por pull-off, índice esclerométrico e porosidade aberta, foram efectuados para todas as amostras.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

Este documento possui oito capítulos distintos com os conteúdos que se descrevem em seguida.

O 2º capítulo resulta de uma revisão bibliográfica com descrição de alguns conceitos fundamentais relacionados com endurecedores de superfície e sua aplicação. São referidas as principais diferenças entre os cimentos antigos e os que se usam actualmente e mencionam-se ainda os efeitos que os adjuvantes têm nas misturas cimentícias.

No 3º capítulo estão referidos os materiais utilizados nos ensaios laboratoriais e descritas as suas características relevantes para este trabalho.

Toda a metodologia da campanha experimental e procedimentos seguidos nos ensaios, realizados segundo as normas em vigor, encontram-se descritos no 4º capítulo.

É no 5º capítulo que se apresentam todos os resultados obtidos ao longo do programa experimental.

No 6º capítulo faz-se a análise comparativa dos resultados que revelam a influência que os vários adjuvantes têm no comportamento do endurecedor de superfície aplicado ao betão de base.

As conclusões finais do trabalho desenvolvido apresentam-se no 7º capítulo.

Ficam no 8º capítulo algumas sugestões para desenvolvimentos futuros que possam surgir na sequência deste estudo.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Principais diferenças entre cimentos antigos e actuais

A referência a inúmeros casos de deterioração precoce de estruturas de betão (fissuras, eflorescências, deformações), executadas com cimento Portland, o ligante mais utilizado nos últimos 100 anos, surge normalmente associada à fraca durabilidade deste.

Sabe-se que nas primeiras décadas dos anos 90 o cimento Portland era moído em grossos grãos, a sua hidratação era morosa, desenvolvia muito lentamente a sua resistência e continha uma quantidade de  $C_3S$  relativamente pequena, menos de 30%. Com a evolução do mercado e com as suas crescentes exigências, procurou-se um ligante que se ajustasse aos curtos prazos da indústria da construção, deixando para trás os de endurecimento lento.

No sentido de se obter altas resistências nas primeiras idades do betão e para ir de encontro aos curtos prazos de construção, foram feitos progressivos aumentos na finura e no teor de silicato tricálcico do cimento Portland, podendo encontrar-se na actualidade cimentos com este teor acima dos 60% e com uma finura superior a  $400m^2/kg$  [2]. Estes cimentos sofrem um acelerado processo de hidratação que liberta calor, aquecendo o betão, que ao arrefecer rapidamente acaba por fissurar, comprometendo, por vezes, a sua durabilidade.

Segundo Thomaz [2], a construção não acompanhou as mudanças ocorridas no cimento, *“ou mudam os cimentos, ou mudam os métodos de execução das obras, ou as obras continuarão a deteriorar-se”*.

### 2.2 Endurecedores de superfície

O endurecedor de superfície é um produto que apresenta sob a forma de pó uma mistura de cimento, agregados de alta dureza ou agregados metálicos e por vezes aditivos químicos que podem conter sílica activa na sua formulação. Com a introdução de pigmentos, os endurecedores podem apresentar-se em cores diversas.

A sua origem remonta ao início do século XX nos Estados Unidos. Depois de dois mestres de obra observarem como facilmente se desgastava um pavimento de betão sujeito a tráfego de equipamentos com rodas metálicas, viram a necessidade de contornar esta situação, o que levou á formulação de um produto à base de cimento e de agregados metálicos para ser aplicado sobre o betão de modo a que o pavimento correspondesse e resistisse aos esforços que o solicitavam [3].

Sendo o pavimento uma das estruturas mais utilizadas e solicitadas, estando sujeito a esforços dinâmicos, estáticos ou até mesmo acções químicas, no caso de lavagens periódicas, a solução mais frequente é a sua construção em betão com endurecedor de superfície. Chega-se a estimar que esta solução represente a maior percentagem de utilização, entre 75 e 80% [4].

### **2.2.1 Aplicação**

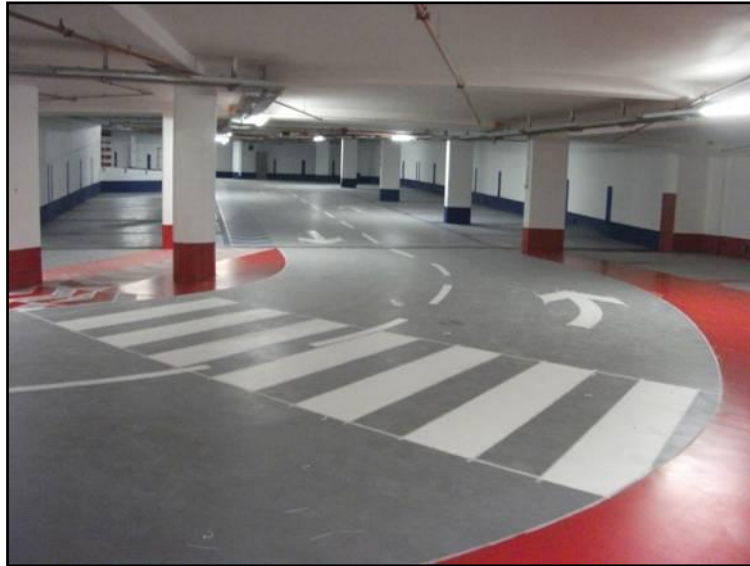
A utilização de um endurecedor de superfície num pavimento com base de betão reduz a razão a/c superficial, pela incorporação do ligante que contém. Por outro lado, melhora a matriz superficial do betão uma vez que é esta a zona mais solicitada ao desgaste por abrasão. A incorporação de agregados de alta dureza por parte dos endurecedores de superfície também facultam aos pavimentos características que os tornam mais resistentes [4].

Posto isto, os endurecedores de superfície são indicados para pavimentos sujeitos a altas solicitações mecânicas e elevados níveis de desgaste como:

- pavilhões industriais (Fig.1);
- cais de carga;
- oficinas;
- parques de estacionamento (Fig.2);
- garagens;
- áreas públicas no geral.



**Figura 1** – Pavimento de um pavilhão industrial [23].



**Figura 2** – Pavimento de um parque de estacionamento [24].

A aplicação destes produtos sobre o betão pode ser feita tanto manualmente como mecanicamente. No caso de obras pequenas, o endurecedor é de modo geral, espalhado manualmente com a ajuda de uma pá, desde que este fique homogeneamente distribuído. Já em obras em que o pavimento apresenta elevadas dimensões procede-se à distribuição homogénea do endurecedor mecanicamente. Em relação às dosagens de aplicação, estas são indicadas geralmente pelos fornecedores dos produtos.



O bom acabamento de pavimentos com endurecedor de superfície é considerado como sendo fundamental para o desempenho das suas funções. Assim, para que o endurecedor ligue convenientemente ao betão de base, depois da sua distribuição, deve ser afagado sucessivamente por intermédio de talochas mecânicas com o objectivo de conseguir uma camada superficial lisa, densa e resistente ao desgaste. Inicialmente recomenda-se a utilização de pás finas e depois mais rígidas e até com uma certa inclinação. A inclinação, o tamanho e a velocidade das pás devem ser reguladas à medida que a superfície ganha rigidez. A duração desta actividade de afagamento não tem tempo estipulado. É referido que deve ser realizada até a superfície apresentar o aspecto pretendido: totalmente liso e homogéneo [3].

São conhecidas como características gerais ou até mesmo como vantagens da aplicação de endurecedores de superfície em pavimentos de betão:

- elevada resistência à abrasão;
- elevada resistência ao impacto;
- maior resistência a óleos e gorduras;
- diminuição de poeiras;
- fácil limpeza;
- redução da prática de fibras no betão.

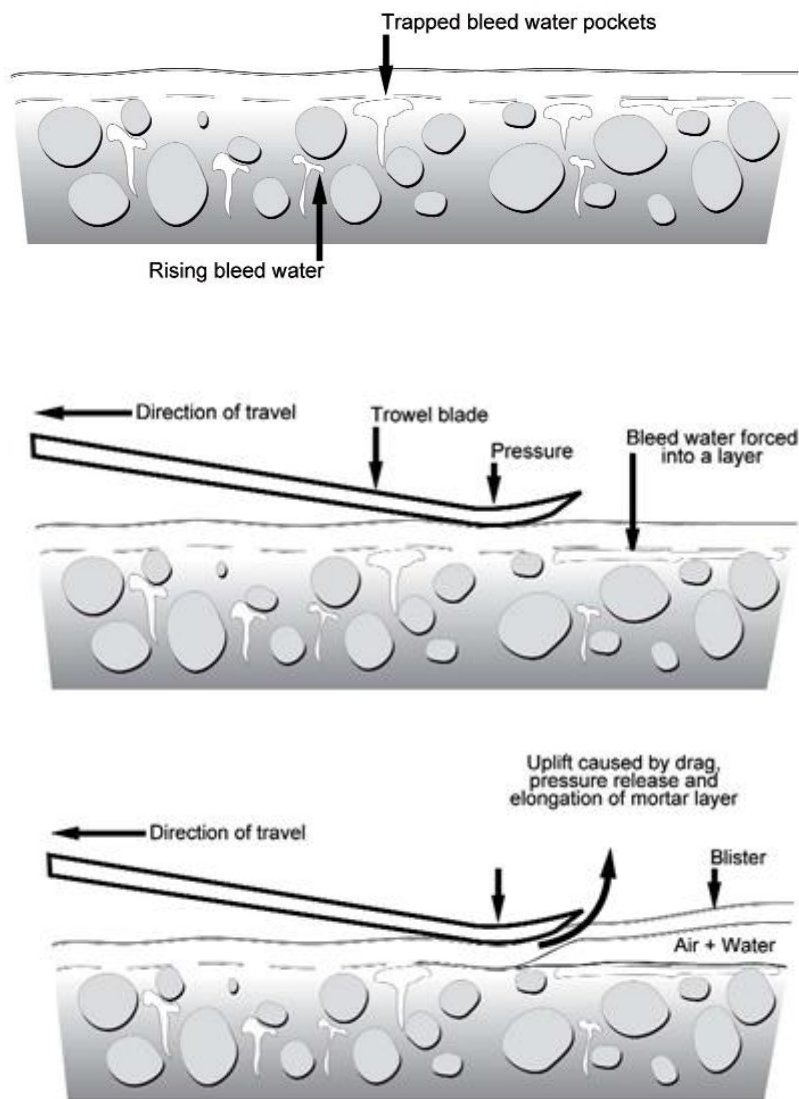
### **2.2.2 Problemas**

São referidas como anomalias frequentes em pavimentos com endurecedor de superfície a sua delaminação e fissuração que, por vezes, ocorrem ainda durante a fase de acabamento manifestando-se em áreas que podem ser de dimensões distintas (pequenas ou extensões consideráveis) [5].

Na literatura [5], apontam-se como causas desta problemática:

- o aprisionamento de ar e água sob a camada superficial da laje, que a torna pouco permeável, devido ao adensamento provocado pelo processo de afagamento;
- o espalhamento da argamassa superficial em zonas já secas e endurecidas.

O caso dominante é o aprisionamento de ar e água sob a camada superficial provocado pelo início prematuro dos trabalhos de acabamento, em áreas onde o betão ainda se pode apresentar plástico o suficiente para continuar a expulsar ar ou água do seu interior. A formação de camadas superficiais mais densas e menos permeáveis aumenta a tendência da laje formar bolhas onde posteriormente vai delaminar. Durante o afagamento, a passagem das talochas mecânicas ajuda a expulsar o ar e a água do interior do betão para a superfície ao mesmo tempo que a adensa, impossibilitando a sua saída [5]. Na Fig.3 é apresentado um esquema ilustrativo de todo este processo.



**Figura 3** – Aprovisionamento de ar e água sob a camada superficial [5].

O caso do espalhamento de argamassa superficial em zonas já secas e endurecidas ocorre, normalmente, quando os trabalhos de acabamento se realizam tardiamente, ou quando é aspergida água sobre a laje para reduzir a fricção das talochas mecânicas e leva à formação de uma pasta superficial que depois é espalhada pelas zonas já endurecidas, não chegando a ligar com o betão de base [12].

Constata-se que para se evitarem situações como as descritas é relevante que se mantenha a uniformidade da consistência e do endurecimento do betão para garantir qualidade do acabamento [5]. Assim, é essencial que as diversas amassaduras para betonagem de uma laje sejam colocadas com abaixamentos aproximadamente constantes e que posteriormente não estejam sujeitas a condições climatéricas agressivas, como chuva, vento ou altas temperaturas, uma vez que são agentes que potenciam o endurecimento, diferenciado do betão. A secagem ou o endurecimento superficial da laje tem como consequência a sua fissuração que pode ocorrer durante a talochagem mecânica ou posteriormente. As elevadas temperaturas levam a um acelerado processo de hidratação provocando no betão exposto uma perda da fluidez e um endurecimento mais rápido que o betão interior.

Conjuntamente as dimensões das lajes e os atrasos prolongados na colocação do betão são referidos como factores importantes, pois podem levar à formação de juntas entre zonas com betões de idades distintas com possibilidade de fissuração deste nas suas proximidades [6].

É considerado como fundamental que os trabalhos de acabamento se iniciem no momento apropriado em cada zona da laje e que tenha também uma adequada duração, no entanto, aparecem regularmente limitações resultantes do rácio nº de trabalhadores/dimensão das lajes [12].

Menciona-se com frequência [12] que a composição dos betões utilizados é também preponderante, nomeadamente a constituição dos cimentos que têm mudado ao longo dos anos, como já foi referido neste capítulo e também, a escolha de uma granulometria uniforme dos agregados. Estes podem ser determinantes na formação de bolhas que leva à posterior delaminação.

### 2.3 Efeito dos adjuvantes nas misturas cimentícias

Segundo Sousa Coutinho [7], designa-se por adjuvante a substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa do cimento, adicionada antes ou durante a amassadura dos componentes das argamassas e betões, com o fim de modificar certas propriedades desses materiais, quer no estado fluido, quer no estado sólido, quer ainda no momento da transição de um estado ao outro.

A utilização dos adjuvantes remonta ao tempo dos romanos que utilizavam o sangue, o leite, a banha ou até mesmo a clara de ovo no betão de pozolana com o intuito de melhorar a sua trabalhabilidade. Posteriormente, perto de 1850, com o objectivo de obter presas mais regulares recorreu-se a gesso e cloreto de cálcio e mais tarde com fim a diminuir a permeabilidade e a fissuração do betão e das argamassas empregou-se a cal aérea [8].

A comercialização dos adjuvantes teve início por volta de 1910, como produtos que visavam melhorar certas características do betão. No entanto, eram ainda encarados com algumas suspeitas. Só em 1938, nos Estados Unidos da América todas as dúvidas se desvaneceram, quando foi descoberta a possibilidade de aumentar a resistência do betão à acção da congelação da água pela criação deliberada de bolhas de ar no seu interior, utilizando substâncias especiais para esse efeito. A partir de então, emprega-se em grande escala os adjuvantes originando a intensa comercialização que vem até aos dias de hoje [8].

Actualmente, é grande a variedade dos produtos que têm a finalidade de modificar as propriedades tecnológicas do betão, o que acaba por tornar difícil a sua classificação. No entanto o que tem maior interesse é os efeitos que estes proporcionam quando utilizados, sendo os principais [9]:

- melhorar a trabalhabilidade;
- retardar a presa;
- acelerar a presa;
- acelerar o endurecimento nas primeiras idades;
- aumentar a resistência aos ciclos de gelo-degelo;
- diminuir a permeabilidade;
- criar uma ligeira expansão;
- ajudar a bombagem
- inibir a corrosão de armaduras;

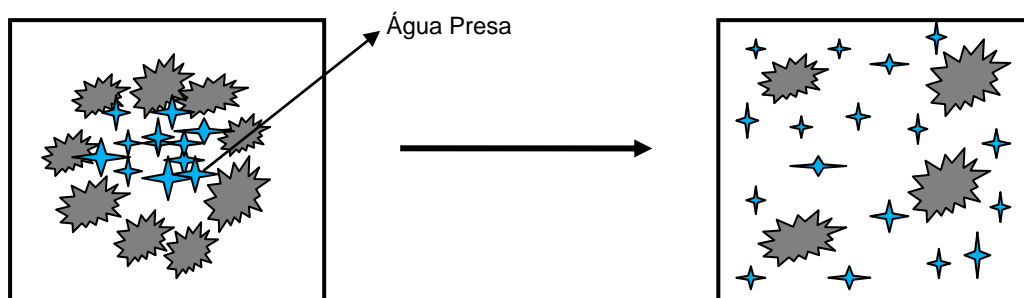
### 2.3.1 Plastificantes

Os adjuvantes que têm a capacidade de reduzir a água da amassadura são denominados por plastificantes. A designação de plastificante deriva das primeiras adições que se fizeram aos betões e argamassas de produtos pulverulentos e de grande finura que se lhes juntavam em quantidade muito reduzida, como 2 a 3% da massa do cimento, permitindo diminuir a água da amassadura mantendo ou até aumentando a trabalhabilidade desejada [8].

Actualmente, os plastificantes redutores de água são empregados no betão com as seguintes finalidades [9]:

- aumentar a tensão de rotura;
- reduzir a dosagem de cimento, mantendo a tensão de rotura e a trabalhabilidade;
- aumentar a trabalhabilidade, mantendo as dosagens de água e cimento;
- diminuir a permeabilidade.

O plastificante é uma substância que funciona como dispersante e provoca dois efeitos fundamentais. O primeiro é expor maior área superficial do cimento à hidratação que progride a uma velocidade mais elevada obtendo-se também uma distribuição de cimento mais uniforme por todo o betão. Assim, verifica-se um aumento na tensão de rotura, quando comparada com a de um betão com a mesma razão a/c mas sem adjuvante. O outro efeito é permitir a redução da água da amassadura mantendo a trabalhabilidade igual à do betão sem esse tipo de adjuvante, a água que antes separava os grãos de cimento quando não havia dispersante, fica agora disponível. No entanto, a absorção das moléculas do adjuvante pelos grãos de cimento atrasa o contacto com a água, promovendo um atraso da precipitação dos primeiros componentes hidratados e por isso retarda a presa [10].



**Figura 4** – Efeito dispersante de um plastificante. *Adaptado de [10].*

Consideram-se bons redutores de água de amassadura os que permitem retirar 5 a 15% da água mantendo a trabalhabilidade constante (em relação à do betão sem adjuvante). As tensões de rotura 24 horas e 3 dias depois podem ser um pouco mais baixas mas aos 28 dias são pelo menos 10 a 20% mais elevadas. O aumento das tensões de rotura à flexão não é, por vezes, tão pronunciado como na compressão [9].

Como precaução, estes adjuvantes devem ser previamente sujeitos a ensaios com o cimento e com os agregados que vão ser usados para que seja determinada a melhor dosagem. Uma vez que são utilizados em quantidades muito pequenas é necessário ter bastante cuidado na sua pesagem e na sua adição na betoneira [10].

De uma maneira geral, são comercialmente fornecidos em pó ou líquido. Quando em pó devem ser adicionados de preferência ao agregado e no caso de serem solúveis devem ser dissolvidos na água da amassadura, assim que o agregado esteja saturado. No caso dos adjuvantes serem líquidos, é conveniente que não contactem directamente com o cimento para não serem consumidos por este.

Os adjuvantes plastificantes redutores de água podem, por vezes, ser combinados com adjuvantes de outro tipo na mesma amassadura, como um retardador de presa ou um introdutor de ar [9].

### **2.3.2 Superplastificantes**

Os adjuvantes designados por superplastificantes são também considerados fortes redutores de água.

À semelhança dos plastificantes, agem também como dispersantes mas de forma mais pronunciada, produzindo dois efeitos no betão. Por um lado, sem modificarem a sua consistência, permitem reduzir fortemente a dosagem de água (entre 25 a 35%) provocando um aumento nas resistências [8]. Por outro lado, sem modificarem a dosagem de água, aumentam consideravelmente o seu abaixamento ou o espalhamento. No entanto, pode haver casos de se reproduzir a combinação destes dois efeitos [9,11].

O mecanismo de acção dos primeiros superplastificantes era idêntico ao descrito nos plastificantes, mas mais intenso embora muito menos durável. Ao fim de meia a uma

hora o seu efeito tinha desaparecido, mesmo com o betão em movimento, como acontece nas autobetoneiras [8].

Recentemente surgiram superplastificantes com uma eficácia ainda maior que os anteriores, chamados superplastificantes de terceira geração e que não só têm efeito mais prolongado no tempo, como permitem reduzir ainda mais a dosagem de água. Estes adjuvantes combinam um efeito electrostático com um efeito estéreo, que reside no efeito dispersivo associado à impossibilidade de as moléculas ocuparem um mesmo espaço (repulsão) [9].

#### **2.4 Limitação do uso de adjuvantes em pavimentos de betão com endurecedor de superfície**

A recorrente utilização dos adjuvantes referidos em 2.3.1 e 2.3.2 deve-se essencialmente à excelente capacidade de facultar plasticidade ao betão. No entanto, inerente a esta propriedade, existem consequências menos positivas, como o aumento da segregação do betão e a rápida evolução entre as fases de plástico a endurecido, diminuindo desta forma o tempo disponível para realizar operações de acabamento [12].

Em [6], é referido que as misturas cimentícias com mais plasticidade apresentam maior tendência para formar uma crosta superficial no betão por secagem, enquanto o restante betão permanece fluido e com ar preso, que só mais tarde se liberta, por vezes, nos trabalhos de acabamento.

### 3. Materiais

Neste capítulo são referidos e descritos todos os materiais utilizados para o fabrico das lajetas de betão com endurecedor de superfície realizadas em laboratório, na campanha experimental.

#### 3.1 Cimento

Neste trabalho foi utilizado o Cimento Portland de Calcário CEM II/A-L 42,5R. É de cor cinza e tem como principal característica o rápido desenvolvimento da sua resistência. A sua composição apresenta-se no Quadro 1.

**Quadro 1** – Composição do CEM II/A-L 42,5R.

Constituinte	Percentagem (%)
Clínquer Portland	80 a 94
Calcário	6 a 20
Outros	0 a 5

Mostram-se em seguida as características relevantes do cimento utilizado, no Quadro 2 a análise química, no Quadro 3 as suas propriedades físicas e, por fim, no Quadro 4 as mecânicas com a resistência à flexão e à compressão.

**Quadro 2** – Análise química do CEM II/A-L 42,5R.

			Mensal	Anual
<b>Perda ao Fogo</b>	%	P.F.	7,64	7,38
<b>Resíduo Insolúvel</b>	%	R.I.	1,18	1,34
<b>Óxido de Silício</b>	%	SiO <sub>2</sub>	16,36	17,56
<b>Óxido de Alumínio</b>	%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,40	4,00
<b>Óxido de Ferro</b>	%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,81	3,03
<b>Óxido de Cálcio</b>	%	CaO	60,84	60,95
<b>Óxido de Magnésio</b>	%	MgO	0,95	1,35
<b>Sulfatos</b>	%	SO <sub>3</sub>	2,69	2,92
<b>Cloretos</b>	%	Cl <sup>-</sup>	0,09	0,06
<b>Cal Livre</b>	%	–	1,89	1,24



**Quadro 3** – Ensaio físicos ao CEM II/A-L 42,5R.

		<b>Mensal</b>	<b>Anual</b>
<b>Peso Específico (g/cm<sup>3</sup>)</b>		3,05	3,05
<b>Resíduo de Peneiração (%)</b>	45 µm	5,5	4,7
<b>Superfície Específica de Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b> [NP EN 196-6]		4634	4999
<b>Água na Pasta Normal (%)</b> [NP EN 196-3]		28,2	27,2
<b>Tempo de Presa (min)</b> [NP EN 196-3]	Início	98	99
	Fim	134	131
<b>Expansibilidade (mm)</b> [NP EN 196-3]		0,6	0,6

**Quadro 4** – Ensaio mecânicos [NP EN 196-1] ao CEM II/A-L 42,5R.

<b>Idade</b>	<b>Resistência Mecânica (MPa)</b>			
	<b>Flexão</b>		<b>Compressão</b>	
	<b>Mensal</b>	<b>Anual</b>	<b>Mensal</b>	<b>Anual</b>
2 dias	6,3	5,9	32,7	31,6
7 dias	7,5	7,4	44,8	44,1
28 dias	8,5	8,4	54,5	54,4

Os resultados apresentados são referentes ao mês de Março de 2011, em que os valores mensais aparecem como uma média do respectivo mês e os valores anuais aparecem como uma média dos anteriores 12 meses.

Estes dados foram facultados pela entidade que disponibilizou o material para o fabrico das lajetas.

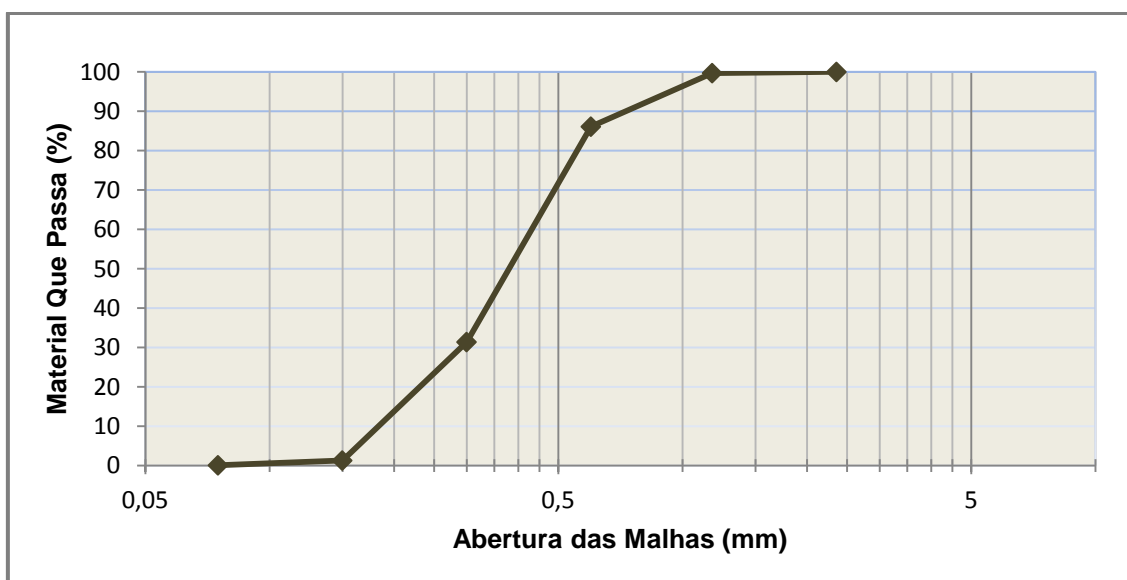
## 3.2 Areia

Para este trabalho foi utilizada uma areia natural rolada siliciosa com origem em Maça.

### 3.2.1 Granulometria

Apresentam-se em seguida os resultados da análise granulométrica da areia natural utilizada, que define as percentagens de peso que cada fracção possui em relação à massa total da amostra analisada.

O Gráfico 1 representa a curva da análise granulométrica realizada a este agregado.



**Gráfico 1** – Curva granulométrica da areia.

Os maiores grãos da areia ficam retidos no peneiro com abertura de 1,18mm, sendo esta uma areia fina.

### 3.2.2 Massa volúmica, absorção de água e humidade

De modo simplificado, a massa volúmica define-se como a razão entre a massa de um corpo e o seu volume. Assim, a massa volúmica da areia mede o grau de concentração da sua massa num determinado volume.

Por sua vez, a absorção de água, consiste na capacidade que o material tem de absorver água. O conhecimento desta propriedade é bastante importante uma vez que a água ao ser absorvida pelos agregados não vai reagir com a pasta cimentícia, não devendo ser contabilizada na razão a/c.

Os valores da massa volúmica da areia, da percentagem de absorção de água e de humidade são:

- Massa Volúmica =  $2620 \text{ kg/m}^3$
- % Absorção de Água = 0,0
- % Humidade = 0,11

### **3.3 Brita**

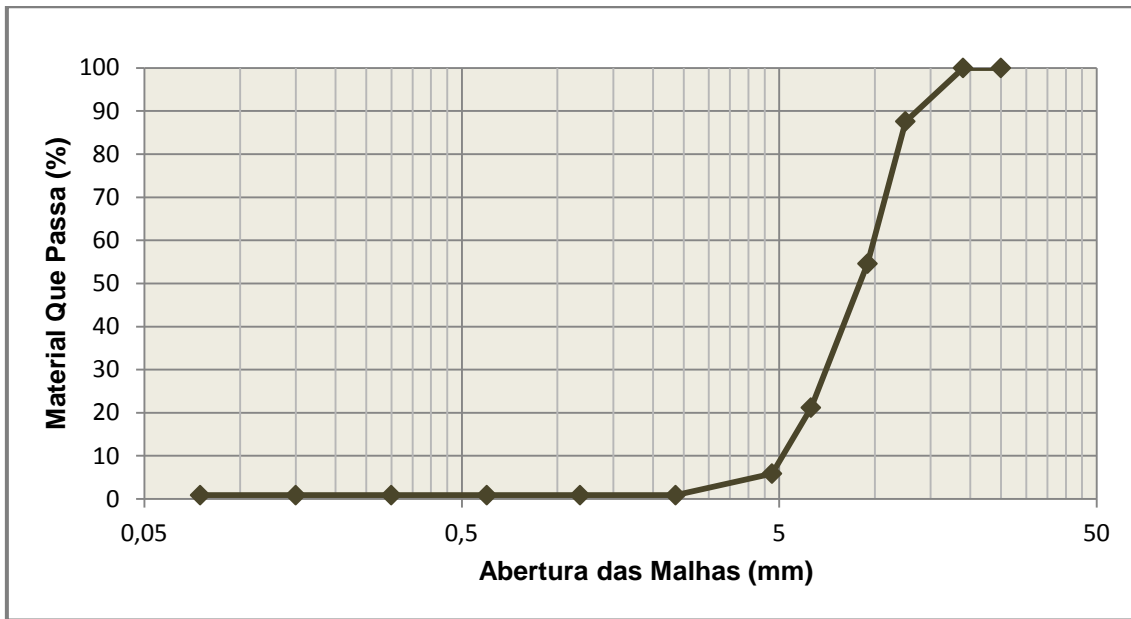
A pedra britada, mais correntemente designada por brita, é o agregado que resulta da fragmentação mecânica de rocha em diversos diâmetros. Em obras de engenharia civil é frequente utilizá-la no fabrico de betão e em regularização de terrenos. Na composição do betão utilizado neste trabalho foram inseridos dois tipos de brita. Ambas são de origem granítica e provenientes de Évora.

#### **3.3.1 Granulometria**

De acordo com a média dimensão do agregado, as britas são classificadas de 0 a 5, em ordem crescente. É também a sua dimensão que lhe confere as suas diferentes propriedades e, por sua vez, a sua aplicabilidade. Os dois tipos deste agregado utilizados foram a brita 5-15 e a brita 10-25, designadas de brita 1 e brita 2, respectivamente.

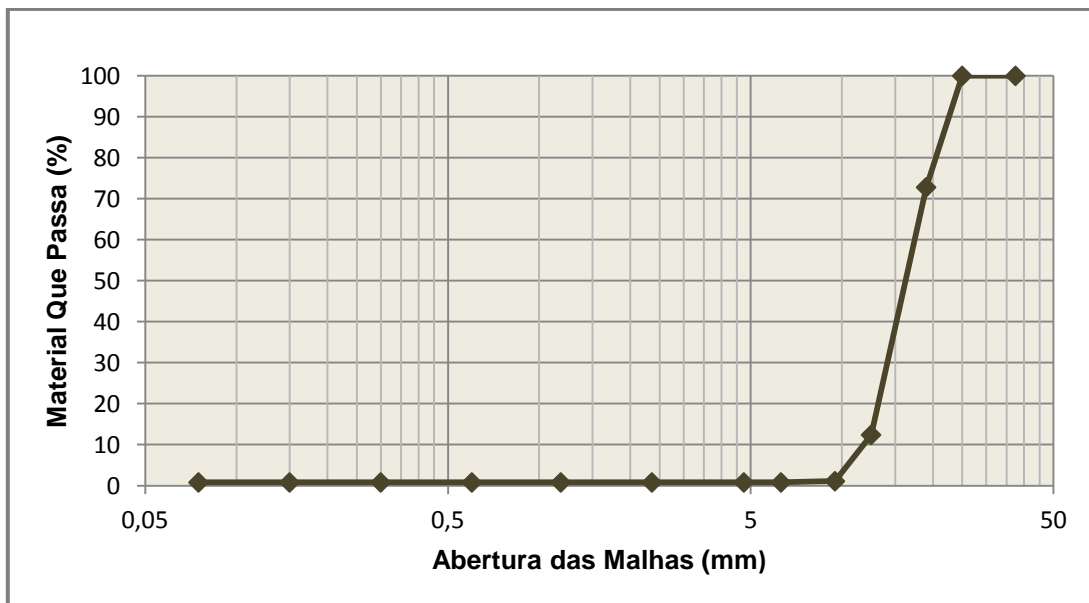
Em seguida apresentam-se em gráfico as curvas resultantes da análise granulométrica de cada uma das britas.

- **Brita 1 (5-15)**



**Gráfico 2** – Curva granulométrica da brita 1.

- **Brita 2 (10-25)**



**Gráfico 3** – Curva granulométrica da brita 2.

### 3.3.2 Massa volúmica, absorção de água e humidade

Para os agregados em questão os valores são os seguintes:

- Brita 1 (5-15)

Massa Volúmica = 2650 kg/m<sup>3</sup>

% Absorção de Água = 0,60

% Humidade = 0,28

- Brita 2 (10-25)

Massa Volúmica = 2680 kg/m<sup>3</sup>

% Absorção de Água = 0,60

% Humidade = 0,23

### 3.4 Água

Neste trabalho foi utilizada a água da torneira do Laboratório de Engenharia Civil (Mitra – Évora), que é potável.

### 3.5 Adjuvantes

No presente trabalho foram utilizados dois adjuvantes plastificantes e dois superplastificantes. Esta escolha incidiu em produtos frequentemente utilizados no mercado e vulgarmente aplicados em betões destinados a pavimentos.

Em seguida é feita uma breve descrição das características e propriedades dos adjuvantes, alvo de estudo.

#### 3.5.1 Adjuvante 390NP

Como adjuvante com efeito plastificante foi escolhido o Pozzolite 390NP da Basf. É um adjuvante polifuncional em que a sua actividade fluidificante permite a produção de diferentes betões variando apenas a dosagem. A sua aplicação é indicada para o fabrico de qualquer betão e para a produção de lajes de betão talochado.

Quanto às características técnicas do 390NP é de referir que a sua densidade relativa é de aproximadamente  $1170 \text{ kg/m}^3$ , o pH de 8,5 e o teor de iões cloreto inferior a 0,1% [20].

A dosagem habitualmente recomendada para a sua adição ao betão é de 0,5 a 1,2 kg por 100 kg de ligante.

### **3.5.2 Adjuvante 540**

Também plastificante, foi testado o Pozzolith 540 da Basf. Este adjuvante é polifuncional e com elevado rendimento, aplicável em betões de diferentes características, variando apenas a sua dosagem. A sua especial composição permite o respectivo uso, com qualquer tipo de cimento.

Relativamente às características técnicas do 540, salientam-se a densidade relativa de aproximadamente  $1200 \text{ kg/m}^3$ , o pH de 8,0 e o teor em iões cloreto inferior a 0,1% [20].

A dosagem recomendada para o adjuvante é de 0,4 a 1,2 kg por 100 kg de ligante.

### **3.5.3 Adjuvante 898**

Foi escolhido o adjuvante SikaPlast 898, da Sika, por se tratar de um superplastificante de alto desempenho. Este adjuvante funciona como superplastificante forte redutor de água para o betão.

Quanto às características técnicas do 898, é de referir que a sua base química consiste na combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa. A sua massa volúmica é de aproximadamente  $1070 \text{ kg/m}^3$ , o pH de 5,0 e o teor de iões cloreto inferior a 0,1% [21].

As dosagens recomendadas para se adicionar ao betão são correntemente de 0,5% a 1,5% do peso do cimento e no caso de uma dosagem especial de 1,5% a 2,0%.

#### **3.5.4 Adjuvante 561**

Também como superplastificante, mas este de elevada eficácia, foi testado o adjuvante Rheobuild 561 da Basf. Como os anteriores, o seu aspecto é líquido e é indicado para confeccionar betões fluidos com longo tempo de trabalhabilidade, também nomeados de betões reoplásticos.

Das características técnicas do 561 salientam-se a sua base química polimérica de naftalenosulfonados, a densidade relativa de aproximadamente  $1180 \text{ kg/m}^3$ , o pH de 7 e o teor de iões cloreto inferior a 0,1% [20].

Este superplastificante redutor de água de elevada eficácia é utilizado, geralmente, em dosagens de 0,9 a 1,4 kg por 100 kg de ligante.

#### **3.6 Endurecedor de superfície**

O endurecedor utilizado para aplicar na superfície das lajetas produzidas na campanha experimental, foi o Superquartz da Duro-Europa.

Apresentam-se no quadro seguinte algumas propriedades mecânicas e físicas do endurecedor de quartzo utilizado.

**Quadro 5** - Propriedades mecânicas e físicas do endurecedor de superfície [22].

<b>Resistência à Abrasão</b> (BOHME) [EN 13892-3]		A6
<b>Resistência ao Choque</b> [EN ISO 6272]		3.a
<b>Compressão</b> [EN 13892-2]		C80
<b>Flexão</b> [EN 13892-2]		F7
<b>Dureza</b> (Escala de MOHS)		7
<b>Permeabilidade de Água</b> [EN 1062-3]		0,13 kg/h <sup>0.5</sup> .m <sup>2</sup>
<b>Retracção Hidráulica</b>	1º dia	23,9 µm/m
	28º dia	103,6 µm/m
	90º dia	123,5 µm/m
<b>Efeitos de Manchas</b> [NP EN 423 de 1994]		Muito ligeiramente ou ligeiramente afectado por produtos como a cera negra, óleo alimentar, soda cáustica, ácido clorídrico e potassa.
<b>Peso Específico Médio dos Grãos</b> [NP 83 de 1965]		2,755 g/cm <sup>3</sup>
<b>Máxima Dimensão dos Grãos</b> [NP 1379 de 1976]		2,36 mm
<b>Módulo de Finura</b> [NP 1379 de 1976]		1,76

A dosagem indicada para a sua aplicação é de 4 a 6 kg/m<sup>2</sup>, podendo ser superior na presença de solicitações excepcionais.



## 4. Metodologia

O trabalho aqui apresentado pretende avaliar o comportamento de diferentes composições de base quando lhes é aplicado um endurecedor de superfície de quartzo.

Antes de realizada a campanha experimental foram feitas visitas a três obras, com fim de visualizar e acompanhar no terreno, todo o processo de construção de pavimentos em betão com endurecedor de superfície, desde a sua betonagem até ao seu acabamento. Permitiu estudar como era aplicado o endurecedor em casos reais, de que forma era feito e em que instante, assim como, verificar como era feito o afagamento.

No presente trabalho experimental foram realizadas diversas lajes em betão, sobre as quais era aplicado um endurecedor de superfície de quartzo. Recorreu-se a quatro composições distintas, para avaliar os efeitos que os adjuvantes plastificantes e superplastificantes utilizados teriam nas amostras. Todas as lajetas foram submetidas ao mesmo processo experimental, descrito a seguir.

Para a realização do trabalho experimental, foi necessária a realização de alguns trabalhos preparatórios.

Inicialmente, considerou-se que todas as composições tinham de ter a mesma consistência, adoptando-se uma classe de consistência S2. No entanto, após a realização de algumas amassaduras, verificou-se que estas ficavam demasiado secas, revelando que não seriam as mais adequadas, já que iriam dificultar a ligação do betão de base com o endurecedor de superfície. Assim, optou-se por um betão mais trabalhável, com classe de consistência S3, que corresponde a abaixamentos entre os 100 e os 150 mm.

Também no início da campanha experimental, fabricaram-se algumas lajetas com a composição apresentada no Quadro 6, no entanto, este apresentava-se como um betão muito argamassado e não se estava a conseguir simular o que ocorre na realidade. Pelo facto de conter menos agregados grossos poderia não deformava tanto e conseqüentemente não se estavam a obter anomalias.

**Quadro 6** – Composição base do betão inicialmente estabelecida.

<b>Material</b>	<b>Massa Volúmica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Brita 1</b>	909
<b>Areia Grossa</b>	599
<b>Areia Fina</b>	330
<b>Água</b>	211
<b>Cimento</b>	316
<b>A/C</b>	0,7

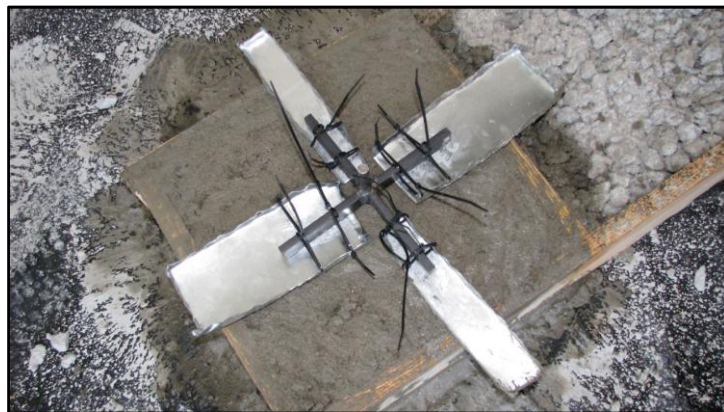
Assim, teve de ser adoptada outra composição (Quadro 7).

Foi também necessário construir as cofragens para as lajetas. Para tal, foram feitos vários moldes em madeira, com chapas metálicas aplicadas na base e silicone nas juntas (Fig.5), evitando ao máximo perda de água. As dimensões iniciais dos moldes eram de 0,30x0,30x0,10 m<sup>3</sup> mas, com a posterior necessidade de se produzirem lajetas com uma área mais abrangente, foram ajustados e passaram a ter 0,60x0,30x0,10 m<sup>3</sup>.

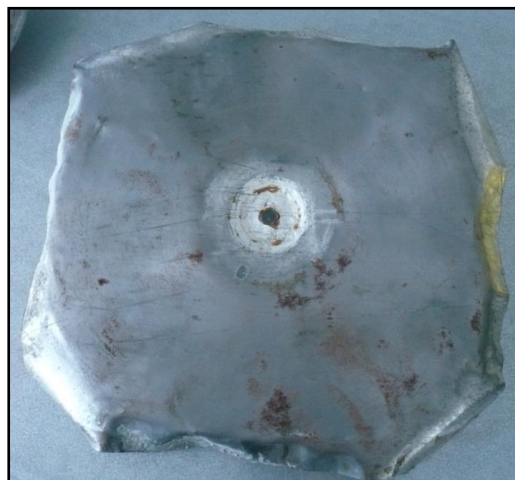


**Figura 5** – Moldes de madeira.

Para reproduzir o afagamento realizado pelas talochas mecânicas que se usam em obra, foram construídos vários protótipos (Fig.6-9) até atingir os protótipos ideais (Fig.8-9) que permitisse um afagamento perfeito e similar ao obtido em obra. Assim, realizaram-se alguns testes com todos eles, de forma a aperfeiçoar a técnica de afagamento, bem como o acabamento final das lajetas. Foram construídos dois tipos de pás, a mais fina para puxar a água e proceder ao afagamento inicial (Fig.8) e a mais grossa para o acabamento final (Fig.9).



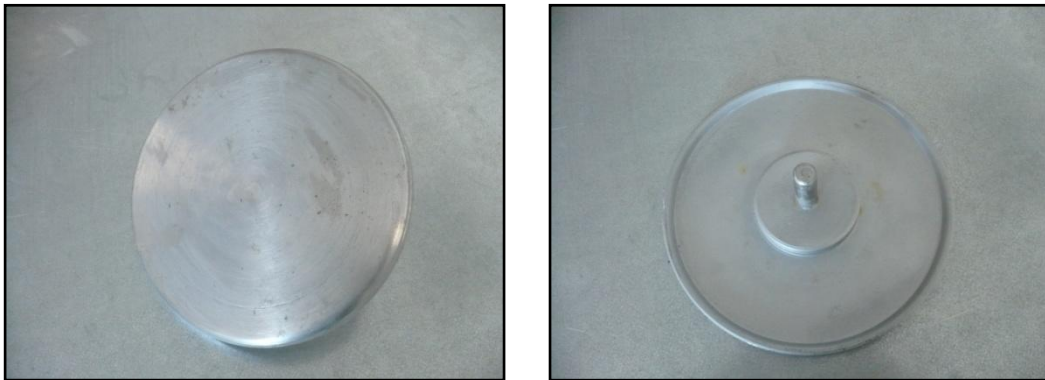
**Figura 6 – 2º Protótipo.**



**Figura 7 – 3º Protótipo.**



**Figura 8** – 4º Protótipo.



**Figura 9** – 5º Protótipo

Uma vez que a maioria dos problemas ocorrem em situações elevadas de calor e vento, foram criados e aperfeiçoados vários sistemas que simulassem esta situação (Fig.10-13).

Inicialmente construíram-se duas campânulas para o efeito, como mostram as Fig.10 e 11.



**Figura 10 – 1ª Campânula.**



**Figura 11 – Interior da 2ª campânula.**

Contudo, devido ao material e às dimensões, as condições de temperatura e humidade relativa, oscilavam bastante no seu interior e não correspondiam ao pretendido. Assim, optou-se por dois túneis em PVC (Fig.12 -13) com simulação do calor e vento através de aquecedores/ventiladores que funcionaram sempre à mesma velocidade e à mesma temperatura, evitando grandes discrepâncias entre as amostras.





**Figura 12 – Túnel 1.**



**Figura 13 – Túnel 2.**

Outro aspecto importante a definir foi o instante mais adequado para aplicação do endurecedor, assim como as quantidades e forma, de modo a reproduzir as anomalias que têm ocorrido ultimamente em casos reais. Assim, optou-se por seguir a dosagem indicada pelo fornecedor e aplicou-se o endurecedor de uma só vez, tal como acontece em obra.

Para a definição do instante de aplicação do endurecedor, primeiro houve necessidade de se realizarem algumas amostras testando vários tempos de aplicação, com e sem adição de água, de modo a tentar determinar o instante em que terminava o chamado “tempo aberto”. Entende-se por “tempo aberto”, o período de tempo disponível para aplicação do endurecedor de superfície de maneira a obter uma boa aderência entre o betão de base e o endurecedor de superfície.

Conhecido o limite de tempo a partir do qual seria necessária a incorporação de água na aplicação do endurecedor, optou-se pela sua colocação em três lajetas, da mesma composição e com dimensões de  $0,3 \times 0,30 \times 0,10 \text{ m}^3$ , nos instantes em que a argamassa do betão de base apresentasse uma resistência à penetração de 0 MPa, 2,7 MPa e de 5,3 MPa. No entanto, não foi possível recriar a situação pretendida porque, apesar de ser já necessária a incorporação de água para ajudar na disseminação do endurecedor de superfície, este aderiu na totalidade ao betão de base, não se registando qualquer irregularidade. Desta forma, verificou-se que mesmo com a adição de água é possível obter bons resultados.

Assim, houve necessidade de estes instantes serem ajustados, passando o endurecedor de superfície a ser aplicado no momento em que o betão de base atingisse os 8,5 MPa e 45 minutos depois (8,5 MPa+45), uma vez que seria na transição destes instantes que a ligação endurecedor/betão começaria a ficar comprometida e eventualmente nalgumas composições poderia ser antes do instante de 8,5 MPa. Ou seja, fabricaram-se duas lajetas com dimensões de  $0,60 \times 0,30 \times 0,10 \text{ m}^3$  de cada composição: uma destinada à aplicação do endurecedor no instante em que o betão de base atingisse 8,5 MPa e outra destinada à aplicação do endurecedor 45 minutos depois do fim.

#### **4.1 Betão de base**

Como já foi referido fabricaram-se algumas lajetas com a composição apresentada no Quadro 6.

Mas como não se estava a conseguir simular o que ocorre na realidade foi adoptada uma nova composição, descrita no Quadro 7. Esta viria a ser adoptada para a realização das amostras representativas dos pavimentos em estudo. Desta composição base resulta um betão com classe de consistência S3.

**Quadro 7** – Composição base do betão.

Material	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
Brita 2	556
Brita 1	566
Areia Fina	740
Água	180
Cimento	346
A/C	0,5

Ajustaram-se as quantidades dos adjuvantes anteriormente descritos, de forma a manter a classe de consistência estabelecida (S3), obtendo-se as composições indicadas no Quadro 8.

**Quadro 8** – Composições dos betões de base das amostras.

Composição Base +	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )						
	Brita 2	Brita 1	Areia Fina	Água	Cimento	A/C	Adjuvante
<b>390NP</b>	567	569	745	173	347	0,5	2,7
<b>540</b>	575	578	756	161	352	0,5	3,5
<b>898</b>	582	585	765	150	356	0,4	3,6
<b>561</b>	578	580	758	157	353	0,4	3,9

O processo do seu fabrico iniciou-se com a pesagem dos materiais, tendo em consideração as % de humidade e a % de absorção dos agregados. Posteriormente, foram introduzidos na betoneira para serem amassados (Fig.14-15), até se obter uma mistura homogénea.





**Figura 14** – Pesagens para o fabrico do betão.



**Figura 15** – Fabrico do betão.

Quando atingido este ponto, era conferida a sua classe de consistência, como descrito no ponto 4.5.1, e só depois colocado nos moldes onde se vibrava e nivelava (Fig.16-17), para mais tarde estar apto à recepção do endurecedor de superfície. A partir deste momento, todas as amostras permaneceram nos túneis, expostas ao vento e a elevadas temperaturas, até aproximadamente 15 horas depois do fim dos trabalhos



**Figura 16** – Vibração do betão de base.



**Figura 17** – Nivelamento do betão de base.

Salienta-se que o betão de base para o fabrico de lajetas da mesma composição, resultou sempre da mesma amassadura.

## 4.2 Aplicação do endurecedor

Procedeu-se à aplicação do endurecedor de superfície nas lajetas, quando atingidos os instantes: 8,5 MPa de resistência à penetração do betão de base (8,5 MPa) e 45 minutos depois deste (8,5 MPa+45). O instante 8,5 MPa é determinado a partir da resistência à penetração da parte de argamassa do betão (ver ponto 4.5.2.).

No entanto, houve uma excepção, no caso do betão de base com o adjuvante 561, para além da aplicação nestes dois instantes, houve necessidade de fabricar mais duas lajetas destinadas à aplicação do endurecedor no instante em que a resistência à penetração do betão de base atingiu os 4,0 MPa e os 5,3 MPa, uma vez que ocorreram problemas logo no instante 8,5 MPa.

Para tal, puxou-se a água do betão de base com o afagador de chapa mais fina (Fig.8) e só depois se espalhou, de uma só vez, o endurecedor por toda a área da lajeta (0,60 x 0,30 m), como mostra a figura seguinte.



**Figura 18** - Aplicação do endurecedor de superfície.

Seguindo a dosagem indicada na ficha técnica, de 4kg/m<sup>2</sup>, para a área da lajeta de 0,180 m<sup>2</sup>, a quantidade de endurecedor aplicada foi de 0,720 kg. À semelhança do que acontece em obra, especialmente em grandes áreas, foi necessário juntar-se água para este criar pasta e facilitar a operação de acabamento, uma vez que a superfície se apresentava seca.

### 4.3 Afagamento

O primeiro afagamento realizou-se, sempre, imediatamente a seguir à aplicação do endurecedor de superfície com o equipamento de chapa metálica mais fina (Fig.8). Para os afagamentos posteriores (Fig.19), uma vez que a superfície adquiria dureza efectuaram-se consecutivamente, com o equipamento de chapa metálica mais grossa (Fig.9), até se obter o acabamento pretendido, uma superfície lisa e homogénea (Fig.20).



**Figura 19** – Afagamento das lajetas.



**Figura 20** – Superfície obtida depois do acabamento.

O intervalo entre os vários afagamentos, resultou do tempo necessário para que a superfície ficasse lisa. Sempre que necessário, juntaram-se pequenas quantidades de



água, para facilitar a operação de afagamento, à semelhança do que acontece em obra. A quantidade de água adicionada foi registada.

#### **4.4 Determinação da taxa de evaporação**

Determinou-se a taxa de evaporação nos dois túneis sempre que se realizaram ensaios, de modo a poder avaliar as condições adversas a que foram submetidas durante o seu processo de execução. Assim, previamente pesadas, colocaram-se duas tinas de água em cada túnel, uma à entrada e outra à saída e, no fim dos trabalhos fez-se a diferença de peso, registando, deste modo, a água evaporada em cada uma delas.

#### **4.5 Ensaio no estado fresco**

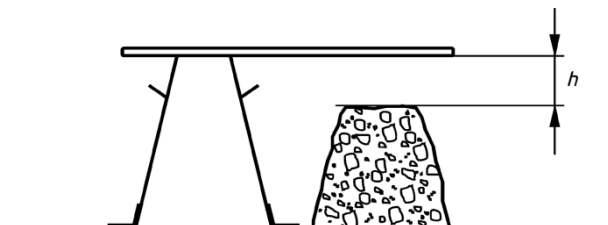
##### **4.5.1 Ensaio de consistência**

Para avaliar a consistência do betão de base das lajetas, realizou-se o ensaio de abaixamento, segundo a norma NP EN 12350-2 [14] para cada amassadura. Assim, após sair da betoneira, para evitar perda de humidade, compactou-se o betão com 25 pancadas, utilizando-se o varão de compactação, no molde de forma tronco-cónica, também designado por cone de Abrams (Fig.21)



**Figura 21** – Cone de Abrams.

Após a remoção do cone, através da sua elevação, registou-se o abaixamento do betão, que como mostra a Fig.22, se traduz na diferença de altura ( $h$ ) entre o topo do cone e o ponto mais alto do betão, obtendo-se, desta forma, a classe de consistência de cada amassadura.



**Figura 22** – Medição do abaixamento [14].

Para a consistência S3 o abaixamento ( $h$ ) teve de estar compreendido entre 100 e 150 mm.

#### **4.5.2 Determinação da resistência à penetração**

A determinação da resistência à penetração realizou-se com o fim de se saber o instante de aplicação do endurecedor de superfície sobre o betão de base das lajetas.

Assim, da amassadura para a betonagem das lajetas, retirou-se a parte argamassada desse betão, ou seja, a parte que passou num peneiro com abertura de malha de 4 mm (Fig.23). A quantidade que passou foi colocada em cubos, nos quais se procedeu à medição da resistência à penetração, como indicado na Fig.25.



**Figura 23** – Peneiração do betão de base.

Estes cubos com a parte argamassado do betão submeteram-se ao túnel de vento nas mesmas condições que as lajetas, das quais eram representativos, e utilizaram-se para medir a resistência à penetração ao longo do tempo, através do equipamento indicado na Fig.24.



**Figura 24** – Equipamento de medição do índice de presa.

Os valores da resistência à penetração, ou seja do índice de presa, obtiveram-se medindo a força aplicada pelo equipamento para penetrar a argamassa (Fig.25) e que, através da área da ponta da agulha que contacta com a argamassa, obteve-se a tensão em MPa.

À medida que a resistência à penetração ia aumentando tinham de ser utilizadas agulhas com diferentes secções.



**Figura 25** – Medição do índice de presa.

## 4.6 Ensaaios no estado endurecido

### 4.6.1 Ensaio de resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão do betão endurecido realizou-se segundo a norma NP EN 12390-3 [15].

Para a realização do ensaio deve limpar-se cuidadosamente todas as superfícies da máquina de ensaio e remover qualquer resíduo ou material estranho das superfícies do provete que vão estar em contacto com os pratos. No caso de excesso de humidade na superfície do provete, deve também remover-se antes de o colocar na máquina de ensaio. Por sua vez, os provetes devem ser centrados para que a carga seja aplicada perpendicularmente à direcção de moldagem [15].

Seleccionada uma velocidade constante para a aplicação da carga na máquina de ensaio, neste caso de 13,5 kN/s para os provetes cúbicos e de 1,2 kN/s para os cilíndricos [16], esta carga aumenta-se continuamente até que não possa ser aplicada uma maior, registando então a carga máxima suportada pelo provete e através da expressão seguinte calcula-se a resistência à compressão do mesmo.

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Onde:

$f_c$  – resistência à compressão, em MPa;

$F$  – carga máxima à rotura, em N;

$A_c$  – área da secção transversal do provete, em mm<sup>2</sup>;

[15]

#### 4.6.1.1 Provetes cúbicos de 15 cm

Com a finalidade se determinar a evolução da resistência à compressão do betão das lajetas, realizaram-se ensaios em provetes cúbicos de 15 cm de aresta.

Assim, fabricaram-se 8 provetes de cada composição do betão de base das amostras, destinados a serem ensaiados aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade (2 provetes para cada idade).



Estes cubos foram curados imersos num tanque de água à temperatura de  $21^{\circ}\text{C} \pm 2$ , até ao dia de se submeterem ao ensaio na máquina de compressão.

Neste ensaio, os provetes foram submetidos até à rotura numa prensa do modelo Alpha 3 da Form+Teste Prüfsysteme (Fig.26), conforme a norma EN 12390-4.



**Figura 26** – Máquina de ensaio à compressão dos provetes cúbicos.



**Figura 27** – Rotura satisfatória de um provete cúbico.

#### 4.6.1.2 Provetes cilíndricos de 5 cm de diâmetro

Para além de provetes cúbicos, recorreu-se também a provetes cilíndricos para determinar a resistência à compressão do betão de base das lajetas aos 64 dias de idade, resultantes da extracção de seis carotes de cada lajeta, seguindo a Norma NP EN 12504-1 [17].

Com uma caroteadora KB110 da Gölz, procedeu-se ao caroteamento (Fig.28) das lajetas com uma broca de coroa diamantada aproveitando os locais onde anteriormente foram feitas as incisões para o ensaio de arrancamento por pull-off, como descrito do ponto 4.6.2..

Como resultaram carotes de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, recorreu-se a uma mesa de corte para ajustar a altura dos provetes (Fig.29) obtendo dimensões de 1/1 (5 cm de diâmetro para 5 cm de altura). À posteriori os provetes foram para o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) onde foram rectificados (Fig.30) e seguidamente foi determinada a resistência à compressão numa Compression and Bending Test Machines MEGA 10 da Form+Teste Prüfsysteme (Fig.31). Na Fig.32 aparece um dos provetes cilíndricos depois de ensaiado.



**Figura 28** – Caroteamento.



**Figura 29** – Máquina de corte.



**Figura 30** – Rectificação dos provetes.



**Figura 31** – Máquina de ensaio à compressão dos provetes cilíndricos.



**Figura 32** – Provede cilíndrico depois de ensaiado à compressão.

Salienta-se que o caroteamento das lajetas e o corte para o ajuste das dimensões dos provetes se realizaram com a devida antecedência para estes serem submetidos ao ensaio na idade exacta, no entanto devido a problemas técnicos com a prensa do laboratório, só foi possível ensaiá-los aos 64 dias de idade. Não se considerou que este adiamento tivesse grande influência nos resultados, uma vez que a partir dos 28 dias a evolução da resistência não é significativa.



#### 4.6.2 Ensaio de arrancamento por pull-off

O ensaio de arrancamento por pull-off realizou-se com um equipamento dyna Z16 proceq, seguindo a norma EN 1542:1999 [18], com a finalidade de se determinar a força de aderência do endurecedor ao betão de base, ao 7º dia de idade das mesmas. Optou-se por estabelecer esta idade para a realização deste ensaio em todas as amostras uma vez que a maioria dos problemas ocorreram nos primeiros dias.

O procedimento seguido para o ensaio consistiu resumidamente em:

- 1- Fazer uma incisão na lajeta com aproximadamente 1,5 cm de profundidade através da caroteadora num diâmetro de 5 cm;
- 2- Lixar a superfície a ensaiar com uma lixa apropriada;
- 3- Limpar com acetona a superfície para remover o pó;
- 4- Preparar a cola e aplicá-la na bolacha de alumínio de 5 cm de diâmetro;
- 5- Colar a bolachas na superfície a ensaiar (área delimitada pela incisão da caroteadora), Fig.33;
- 6- Esperar aproximadamente 24 horas;
- 7- Dividindo a força de tracção obtida pela área da bolacha de alumínio obteve-se a tensão em MPa.

Salienta-se que, em cada lajeta, efectuaram-se no mínimo 6 ensaios de arrancamento começando pela zona mais perto da fonte de calor, a zona 1.



**Figura 33** – Colagem das bolachas na lajeta.



**Figura 34** – Ensaio de arrancamento por pull-off.

#### 4.6.3 Determinação da massa volúmica e porosidade aberta

Procedeu-se à determinação da massa volúmica de cada composição utilizada para o betão de base no fabrico das lajetas, segundo a norma NP EN 12390-7 [19].

Assim, da amassadura de cada composição, retirou-se betão para dois cubos, que serviriam de provetes para as pesagens necessárias.

Depois de curados os provetes, foi registado o seu peso ao ar  $m_a$ . Mais tarde foram imersos em água (Fig.35) efectuando-se a pesagem  $m_w$  e, por fim, foram colocados numa estufa (Fig.36) a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  até estabilizar a sua massa,  $m_0$ .



**Figura 35** – Pesagem do provete imerso.



**Figura 36** – Estufa.

A massa volúmica,  $D$ , de cada provete obteve-se pela expressão:

$$D = \frac{m}{V}$$

Onde:

$D$  - é a massa volúmica, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$m$  - massa do provete seco em estufa, em kg;

$V$  - volume do provete, em  $\text{m}^3$ .

Em que, por sua vez, o volume do provete obteve-se pela expressão seguinte:

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w}$$

Onde:

$V$  - é o volume do provete, em  $\text{m}^3$ ;

$m_a$  - é a massa do provete ao ar, em kg;

$m_{st}$  - é a massa aparente do estribo imerso, em kg;

$m_w$  - é a massa aparente do provete imerso, em kg;

$\rho_w$  - é a massa volúmica da água, a  $20^\circ\text{C}$ , tomada como  $998 \text{ kg/m}^3$ .

[19]

Através da relação entres as massas do provete seco, imerso e saturado, como mostra a expressão seguinte, determinou-se também a percentagem de porosidade aberta de cada composição, com a finalidade de perceber a percentagem de água absorvida pelos provetes.

$$\mathcal{E}_a = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100$$

Onde:

$\mathcal{E}_a$  - porosidade aberta, em %;

$m_1$  - massa seca, em kg;

$m_2$  - massa saturada imersa, em kg;

$m_3$  - massa saturada, em kg.

#### 4.6.4 Determinação da dureza pelo índice esclerométrico

O esclerómetro (Fig.37) é um aparelho que permite obter de forma simples e não destrutiva a resistência à compressão de elementos de betão até 5 cm de profundidade e avaliar a sua homogeneidade.



**Figura 37** - Esclerómetro.

Todas as lajetas foram submetidas ao ensaio esclerométrico, que implica nove impactos para se obter alguma representatividade, avaliando, assim, a resistência e o estado de homogeneidade da superfície do endurecedor de superfície.

Para tal, colocou-se, perpendicularmente à superfície a ensaiar, a cabeça do veio de compressão empurrando o corpo do esclerómetro contra ela, de forma contínua, até que a massa se soltou e se ouviu o impacto. O índice esclerométrico lido relacionou-se depois com o ábaco colocado na parte lateral do equipamento, estimando-se a resistência à compressão do material ensaiado.



## 5. Resultados

No presente capítulo são expressos os resultados obtidos durante o programa experimental.

### 5.1 Temperaturas e taxa de evaporação

Os valores da temperatura e da taxa de evaporação, registadas no interior dos túneis, estão indicados no Quadro 9.

**Quadro 9** – Temperatura e evaporação no interior dos túneis.

Adjuvante	Lajeta	Início do túnel		Fim do túnel		Média	
		Temp. (°C)	Evap. (l/m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup> )	Temp. (°C)	Evap. (l/m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup> )	Temp. (°C)	Evap. (l/m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup> )
390NP	8,5 MPa	47	1,1	35	0,5	41	0,8
	8,5 MPa+45	54	1,3	35	0,8	44,5	1,1
540	8,5 MPa	47	0,6	35	0,2	41	0,4
	8,5 MPa+45	54	1,3	35	0,6	44,5	0,9
898	8,5 MPa	47	1,1	35	0,4	41	0,8
	8,5 MPa+45	54	1,1	35	0,6	44,5	0,9
561	8,5 MPa	47	1,0	35	0,4	41	0,7
	8,5 MPa+45	54	1,3	35	0,3	44,5	0,8
	4,0 MPa	47	1,5	35	0,4	41	0,9
	5,3 MPa	54	1,4	35	0,6	44,5	1,0

Uma vez que havia uma ligeira diferença entre túneis, existia uma discrepância nas temperaturas e nas taxas de evaporação registadas em cada um dos túneis. Assim, o túnel mais baixo apresentou temperaturas mais elevadas e conseqüentemente maiores taxas de evaporação. Por este motivo, houve a preocupação de colocar no mesmo túnel as lajetas em que foi aplicado o endurecedor de superfície no instante 8,5 MPa e o mesmo aconteceu com as lajetas do instante 8,5 MPa+45.

## 5.2 Água adicionada na aplicação do endurecedor

O quadro seguinte indica a quantidade de água que foi necessária introduzir quando aplicado o endurecedor de superfície em cada lajeta.

**Quadro 10** – Quantidade de água adicionada na aplicação do endurecedor.

	<b>Lajeta</b>	<b>Água Adicionada (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>390NP</b>	8,5 MPa	4,3
	8,5 MPa+45	5,1
<b>540</b>	8,5 MPa	3,9
	8,5 MPa+45	3,9
<b>898</b>	8,5 MPa	2,7
	8,5 MPa+45	3,9
<b>561</b>	8,5 MPa	2,5
	8,5 MPa+45	2,8

A maior quantidade de água foi adicionada nas lajetas cujas composições incorporam os plastificantes, 390NP e 540. Também as lajetas 8,5 MPa+45 necessitaram de mais água que as 8,5 MPa.

## 5.3 Instantes de aplicação do endurecedor

O Quadro 11 indica o tempo que cada composição levou a atingir os instantes de aplicação do endurecedor (8,5 MPa e 8,5 MPa+45).

**Quadro 11** – Instantes em que foram colocados os endurecedores.

	<b>Túnel</b>	
	<b>8,5 MPa</b>	<b>8,5 MPa+45</b>
<b>390NP</b>	5h e 30m	5h e 20m
<b>540</b>	8h *	6h
<b>898</b>	4h	4h
<b>561</b>	6 h e 20 m	6h e 20 m

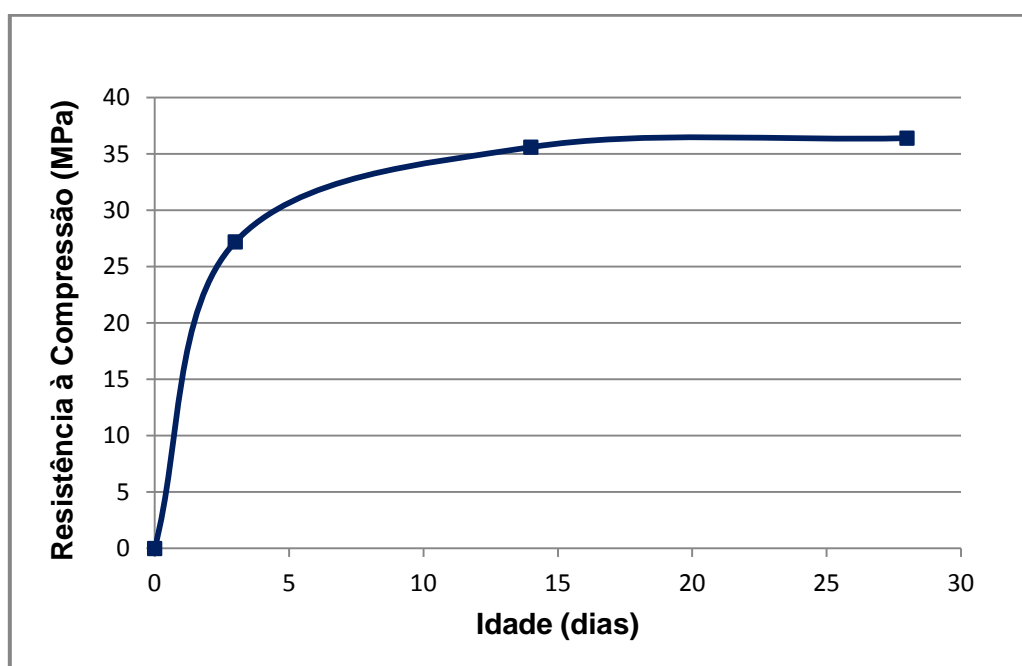
\* ocorreu um corte de energia no equipamento de aquecimento/ventilação.

A variação de tempo entre os túneis justifica-se pela pequena diferença das suas dimensões, já que o túnel onde estavam as amostras do 8,5 MPa+45 era ligeiramente mais pequeno e as temperaturas no seu interior mais elevadas.

## 5.4 Composição base

### 5.4.1 Resistência à compressão

Apresenta-se no Gráfico 4 a curva de evolução da resistência à compressão do betão efectuado com a composição base, resultante dos ensaios a provetes cúbicos de 15 cm.



**Gráfico 4** - Resistência à compressão do betão com composição base.

A resistência à compressão do betão com a composição base desenvolve-se bastante nas primeiras idades, registando 27 MPa aos 3 dias de idade e chega aos 28 dias com 36 MPa.

#### 5.4.2 Massa volúmica e porosidade aberta

Com os resultados das pesagens  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$ , obtiveram-se os valores apresentados no Quadro 12, para a massa volúmica e para a porosidade aberta do betão feito com a composição base.

**Quadro 12** – Massa volúmica e porosidade aberta do betão com composição base.

$m_1$	2,33
$m_2$	1,44
$m_3$	2,42
$D$	2352
$\epsilon_a$	9,8

### 5.5 Adjuvante 390NP

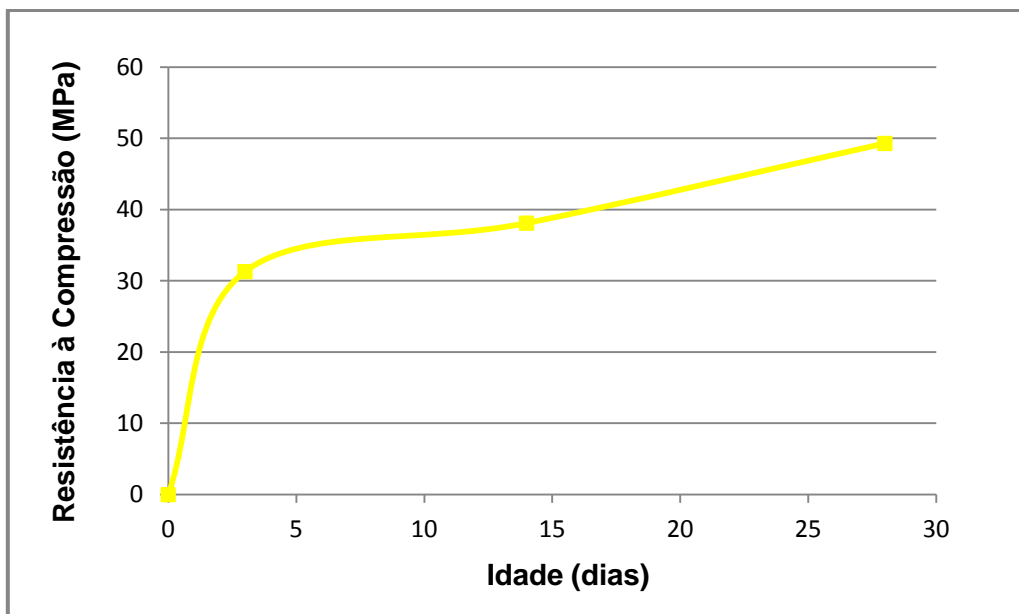
Neste subcapítulo mostram-se os resultados de todos os ensaios realizados para a composição como o adjuvante 390NP (390NP).

#### 5.5.1 Resistência à compressão

Apresentam-se em seguida os resultados dos ensaios de resistência à compressão para os diferentes provetes do 390NP.

##### 5.5.1.1 Provetes cúbicos de 15 cm

O Gráfico 5 ilustra a curva de evolução da resistência à compressão do betão de base em que foi adicionado o adjuvante 390NP, resultante dos ensaios a provetes cúbicos de 15 cm.



**Gráfico 5** - Resistência à compressão do 390NP.

O betão com o 390NP apresenta uma crescente resistência à compressão ao longo da sua idade, que é de 31 MPa aos 3 dias e de 49 MPa quando atinge os 28 dias.

#### 5.5.1.2 Provetes cilíndricos de 5x5 cm

No Quadro 13 apresentam-se os valores da resistência à compressão do 390NP aos 64 dias de idade, resultante dos ensaios efectuados aos cilindros.

**Quadro 13** - Resistência à compressão do 390NP aos 64 dias.

	<b>390NP</b>					
	<b>8,5 MPa</b>			<b>8,5 MPa+45</b>		
<b>F (kN)</b>	105,0	105,8	97,2	103,2	102,3	97,7
<b>fc (MPa)</b>	66	66,5	61,1	64,9	64,3	61,4
<b>Tensão (MPa)</b>	64,00					

### 5.5.2 Arrancamento por pull-off

O Quadro 14 ilustra os valores obtidos no ensaio de arrancamento por pull-off no 390NP.

**Quadro 14 – Resistência por pull-off no 390NP.**

Zona	390NP			
	8,5 MPa		8,5 MPa+45	
	Tensão (MPa)	Rotura	Tensão (MPa)	Rotura
1	2,2	Betão	2,2	Endurecedor
2	2,6	Betão	2,4	Endurecedor
3	2,5	Betão	1,6	Endurecedor
4	1,9	Betão	0,4	Endurecedor
5	1,9	Betão	0,7	Endurecedor
6	1,8	Betão	1,9	Endurecedor
7	1,7	Betão	2,4	Endurecedor
8	2,4	Betão	1,7	Endurecedor
9	1,7	Betão	2,0	Endurecedor
<b>Média</b>	2,1	Betão	1,7	Endurecedor
<b>Desvio Padrão</b>	0,35		0,71	

É evidente a forte ligação do endurecedor de superfície com o betão de base quando colocado no instante 8,5 MPa. No entanto, quando aplicado no instante de 8,5MPa+45 esta ligação fica comprometida, provada pela rotura do endurecedor.

Também para o 390NP se pode constatar que o “tempo aberto” termina entre o instante 8,5 MPa e 8,5 MPa+45.

### 5.5.3 Massa volúmica e porosidade aberta

Com os resultados das pesagens  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$ , obtiveram-se os valores apresentados no Quadro 15, para a massa volúmica e para a porosidade aberta do 390NP.

**Quadro 15** – Massa volúmica e porosidade aberta do 390NP.

$m_1$	2,32
$m_2$	1,43
$m_3$	2,42
$D$	2340
$\varepsilon_a$	10,1

#### 5.5.4 Índice esclerométrico

No Quadro 16 apresentam-se os valores resultantes do ensaio esclerométrico das lajetas feitas com 390NP.

**Quadro 16** – Resistência à compressão da superfície do 390NP.

Ensaio	Índice esclerométrico	
	390NP	
	8,5 MPa	8,5 MPa+45
1	38	29
2	36	33
3	44	30
4	39	32
5	36	34
6	34	31
7	36	28
8	38	35
9	33	33
<b>Média</b>	37	32
<b>Tensão (MPa)</b>	34	27

A lajeta em que o endurecedor de superfície foi aplicado no instante 8,5 MPa apresenta uma resistência à compressão superior à lajeta de 8,5 MPa+45, com uma tensão de 34 MPa.

## 5.6 Adjuvante 540

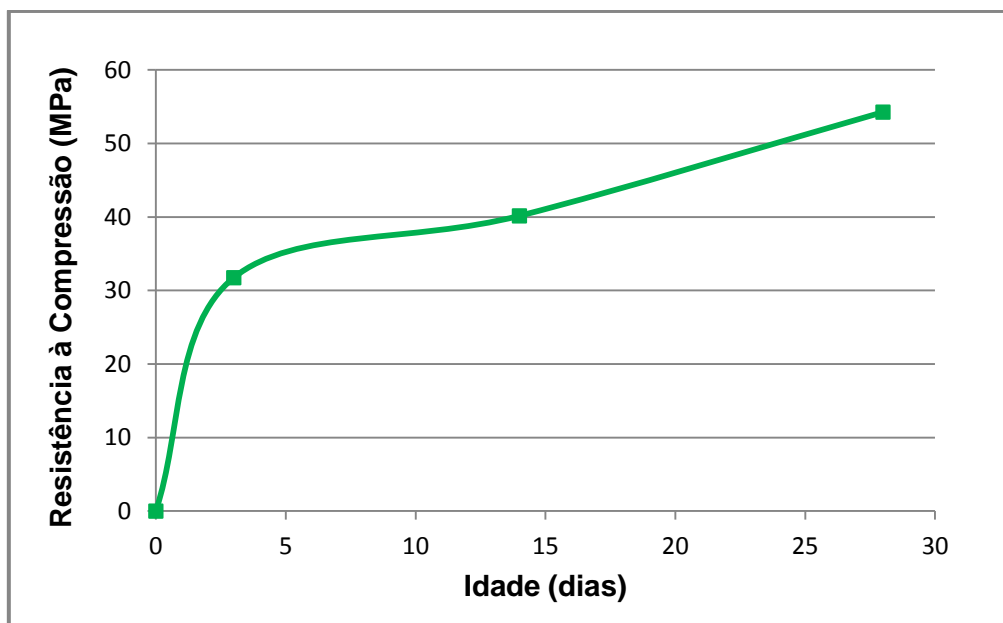
Neste subcapítulo mostram-se os resultados de todos os ensaios realizados para a composição como o adjuvante 540 (540).

### 5.6.1 Resistência à compressão

Apresentam-se em seguida os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos diferentes provetes do 540.

#### 5.6.1.1 Provetes cúbicos de 15 cm

O gráfico seguinte traça a curva de evolução da resistência à compressão do betão com 540, resultante dos provetes ensaiados.



**Gráfico 6 - Resistência à compressão do 540.**

Aos 3 dias de idade o betão com 540 regista uma resistência à compressão de 32 MPa. Salienta-se o aumento desta resistência dos 14 para os 28 dias, crescendo dos 40 MPa para os 54 MPa.



### 5.6.1.2 Provetes cilíndricos de 5x5 cm

A resistência à compressão do 540 aos 64 dias de idade resultante dos provetes cilíndricos, apresenta-se no Quadro 17.

**Quadro 17** - Resistência à compressão do 540 aos 64 dias.

	540											
	8,5 MPa						8,5 MPa+45					
<b>F (kN)</b>	97,74	124,2	100,7	86,3	107,5	75,2	65,3	61,3	96,1	72,1	102,	84,2
<b>fc (MPa)</b>	54	68,6	55,6	47,7	59,4	41,6	35	33,9	53,1	39,9	56,5	46,5
<b>Tensão (MPa)</b>	55,7											

### 5.6.2 Arrancamento por pull-off

O Quadro 18 ilustra os valores obtidos no ensaio de arrancamento por pull-off no 540.

**Quadro 18** – Resistência por pull-off no 540.

Zona	540			
	8,5 MPa		8,5 MPa+45	
	Tensão (MPa)	Rotura	Tensão (MPa)	Rotura
<b>1</b>	2,7	endurecedor	1,8	endurecedor
<b>2</b>	2,2	betão	1,1	endurecedor
<b>3</b>	2,4	endurecedor	2,3	endurecedor
<b>4</b>	2,9	betão	2,4	endurecedor
<b>5</b>	2,3	endur.   betão	2,0	endurecedor
<b>6</b>	2,8	betão	1,5	endurecedor
<b>Média</b>	2,6	betão	1,9	endurecedor
<b>Desvio Padrão</b>	0,29		0,49	

Verifica-se que para esta composição ocorreram algumas roturas pelo endurecedor no instante 8,5 MPa, indicando que a ligação endurecedor/betão não funcionou correctamente. As roturas pelo endurecedor verificam-se principalmente na zona mais próxima dos aquecedores, ou seja, a zona mais exposta ao calor e com maior taxa de evaporação. Pode-se dizer que esta composição já atingiu o fim do “tempo aberto” no

instante 8,5 MPa. No instante 8,5 MPa+45 e como era de esperar, as roturas foram todas pelo endurecedor.

### 5.6.3 Massa volúmica e porosidade aberta

Com os resultados das pesagens  $m_0$ ,  $m_w$  e  $m_a$ , obtiveram-se os valores apresentados no Quadro 19, para a massa volúmica e para a porosidade aberta do 540.

**Quadro 19** – Massa volúmica e porosidade aberta do 540.

$m_1$	2,34
$m_2$	1,44
$m_3$	2,41
$D$	2393
$\epsilon_a$	8,1

### 5.6.4 Índice esclerométrico

No Quadro 20 estão os valores resultantes do ensaio esclerométrico das lajetas feitas com o 540.

**Quadro 20** – Resistência à compressão da superfície do 540.

Ensaio	Índice esclerométrico	
	540	
	8,5 MPa	8,5 MPa+45
1	30	33
2	35	26
3	33	33
4	38	36
5	34	36
6	40	36
7	35	34
8	35	32
9	33	30
<b>Média</b>	35	33
<b>Tensão (MPa)</b>	31	28

A resistência à compressão da lajeta 8,5 MPa é ligeiramente superior à 8,5 MPa+45, com uma tensão de 31 MPa.

## 5.7 Adjuvante 898

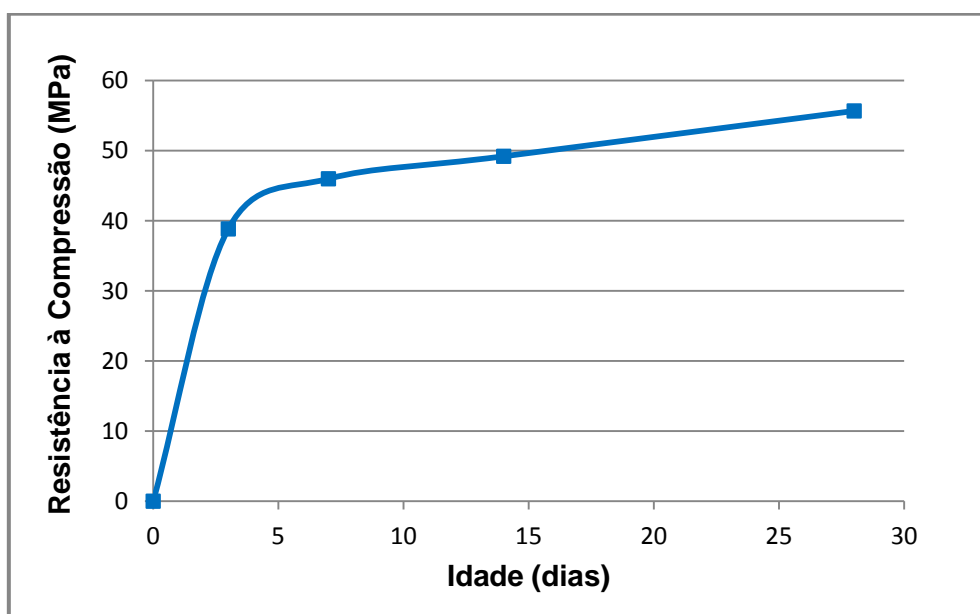
Neste subcapítulo mostram-se os resultados de todos os ensaios realizados para a composição como o adjuvante 898 (898).

### 5.7.1 Resistência à compressão

Apresentam-se em seguida os resultados dos ensaios de resistência à compressão para os provetes cúbicos de 15 cm e os cilíndricos de 5 cm.

#### 5.7.1.1 Provetes cúbicos de 15 cm

O Gráfico 7 ilustra a curva de evolução da resistência à compressão do betão com o adjuvante 898, resultante dos ensaios aos provetes cúbicos.



**Gráfico 7 – Resistência à compressão no 898.**

Como se verifica pelo gráfico anterior, a composição do betão de base que incorpora o 898 apresenta uma resistência à compressão aos 3 dias de idade de 39 MPa evoluindo para os 56 MPa aos 28 dias.

### 5.7.1.2 Provetes cilíndricos de 5x5 cm

O Quadro 21 mostra os valores obtidos para a resistência à compressão no 898 aos 64 dias de idade, resultante dos ensaios.

**Quadro 21** - Resistência à compressão do 898 aos 64 dias.

	898					
	8,5 MPa			8,5 MPa+45		
<b>F (kN)</b>	128,3	141,7	120,7	140,9	152,1	127,6
<b>fc (MPa)</b>	80,7	89,1	75,4	88,6	89,1	80,3
<b>Tensão (MPa)</b>	83,9					

### 5.7.2 Arrancamento por pull-off

O Quadro 22 apresenta os valores obtidos no ensaio de arrancamento por pull-off, no 898, que mostram a tensão necessária para a rotura.

**Quadro 22** – Resistência por pull-off no 898.

Zona	898			
	8,5 MPa		8,5 MPa+45	
	Tensão (MPa)	Rotura	Tensão (MPa)	Rotura
<b>1</b>	3,2	Betão	1,8	Endurecedor
<b>2</b>	3,2	Betão	2,5	Endurecedor
<b>3</b>	3,0	Betão	1,9	Endurecedor
<b>4</b>	2,8	Betão	2,0	Endurecedor
<b>5</b>	2,9	Betão	1,5	Endurecedor
<b>6</b>	3,3	Betão	2,1	Endurecedor
<b>Média</b>	3,1	Betão	2,0	Endurecedor
<b>Desvio Padrão</b>	0,20		0,33	

Verifica-se que na lajeta em que se procedeu à aplicação do endurecedor no instante 8,5 MPa, este aderiu na perfeição à camada subjacente. Já na situação de aplicação 8,5 MPa+45, a ligação do endurecedor ao betão de base não funcionou, uma vez que o mesmo destacou pelo endurecedor.

Pode-se concluir que para o 898 o “tempo aberto” termina entre o instante 8,5 MPa e 8,5 MPa+45. Apesar do betão já estar bastante rígido no instante 8,5 MPa e de se ter introduzido alguma água extra para a aplicação do endurecedor este ainda conseguiu ligar em boas condições.

### 5.7.3 Massa volúmica e porosidade aberta

Com os resultados das pesagens  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$ , obtiveram-se os valores apresentados no Quadro 23, para a massa volúmica e para a porosidade aberta do betão de base com o adjuvante 898.

**Quadro 23** – Massa volúmica e porosidade aberta do 898.

$m_1$	2,40
$m_2$	1,48
$m_3$	2,47
$D$	2420
$\epsilon_a$	7,2

### 5.7.4 Índice esclerométrico

No Quadro 24 apresentam-se os valores resultantes do ensaio esclerométrico a que as lajetas com 898 no betão de base foram submetidas.

**Quadro 24** – Resistência à compressão da superfície do 898.

Ensaio	Índice esclerométrico	
	898	
	8,5 MPa	8,5 MPa+45
1	40	35
2	38	32
3	34	28
4	39	29
5	39	35
6	37	36
7	33	34
8	39	32
9	30	33
<b>Média</b>	37	33
<b>Tensão (MPa)</b>	34	28

Constata-se que a superfície que se apresenta mais resistente é a da lajeta em que o endurecedor de superfície foi colocado no instante 8,5 MPa, registrando valores de tensão superiores.

### **5.8 Adjuvante 561**

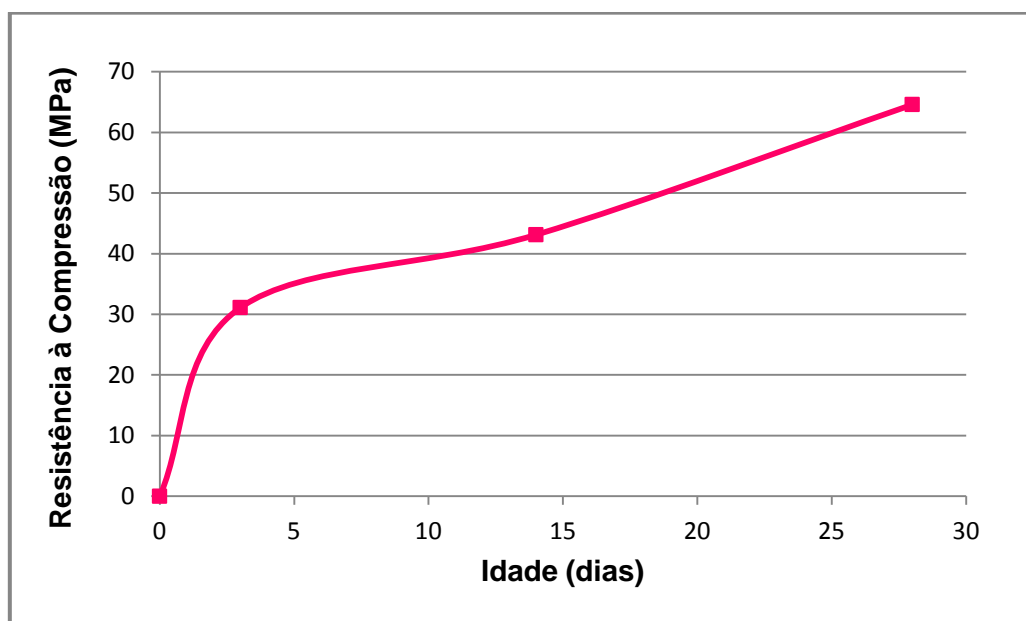
Como já foi referido no capítulo 4, no caso da composição com o adjuvante 561 (561) além da aplicação do endurecedor nos instantes 8,5 MPa e 8,5 MPa+45 foi necessário também, proceder à aplicação do endurecedor em instantes em que a resistência à penetração fosse menor. Os instantes escolhidos foram, 4,0 MPa e 5,3 MPa. Isto ocorreu porque verificámos que no instante 8,5 MPa já se tinha ultrapassado por completo o “tempo aberto” (ver ponto 5.8.2.) e como é importante conhecer o fim deste período, houve a necessidade de aplicar o endurecedor em instantes mais precoces.

### 5.8.1 Resistência à compressão

Apresentam-se em seguida os resultados dos ensaios de resistência à compressão do 561.

#### 5.8.1.1 Provetes cúbicos de 15 cm

A evolução da resistência à compressão do betão de base em que foi adicionado o adjuvante 561, resultante dos ensaios, é ilustrada no gráfico seguinte.



**Gráfico 8** - Resistência à compressão do 561.

Para além do pico de crescimento da resistência à compressão do 561 nas primeiras idades, com 31 MPa aos 3 dias de idade, é também evidente o acentuado crescimento entre os 14 e os 28 dias, passando dos 43 MPa para os 65 MPa.

#### 5.8.1.2 Provetes cilíndrico de 5x5 cm

No Quadro 25 apresenta-se a resistência à compressão do betão de base com o 561 aos 64 dias de idade.

**Quadro 25 - Resistência à compressão do 561 aos 64 dias.**

	561										
	8,5 MPa					8,5 MPa+45					
<b>F (kN)</b>	115,6	120,2	127,0	119,2	134,4	128,6	102,9	123,7	107,7	125,6	146,1
<b>fc (MPa)</b>	62,6	65,3	69,1	64,5	72,8	69,6	55,7	67,0	58,3	68,0	79,9
<b>Tensão (MPa)</b>	66,6										

### 5.8.2 Arrancamento por pull-off

O Quadro 26 ilustra os valores obtidos no ensaio de arrancamento por pull-off para o 561.

**Quadro 26 – Resistência por pull-off no 561.**

Zona	561							
	4,0 MPa		5,3 MPa		8,5 MPa		8,5 MPa+45	
	Tensão (MPa)	Rotura	Tensão (MPa)	Rotura	Tensão (MPa)	Rotura	Tensão (MPa)	Rotura
<b>1</b>	1,5	end.	1,1	end.	2,0	end.	0,8	end.
<b>2</b>	2,5	bet.	1,9	bet.	2,0	end.	0,6	end.
<b>3</b>	2,2	bet.	2,3	end.	1,8	end.	1,1	end.
<b>4</b>	1,9	end.	2,2	end.	2,6	end.	1,8	end.
<b>5</b>	2,2	bet.	1,9	end.	1,8	end.	2,3	end.
<b>6</b>	2,2	bet.	2,3	bet.	0,4	end.	2,2	end.
<b>Média</b>	2,1	bet.	2,0	end.	1,8	end.	1,5	end.
<b>Desvio Padrão</b>	0,3		0,5		0,7		0,7	

Como já foi dito, a partir do instante 8,5 MPa todas as amostras romperam pelo endurecedor, o que revela que já tinha sido ultrapassado o “tempo aberto”.

Analisando o instante antes do 8,5 MPa, ou seja, 5,3 MPa, verifica-se que a maioria das roturas ainda ocorre pelo endurecedor.



No instante mais precoce, o dos 4,0 MPa, pode-se ver que a maioria das roturas já ocorre pelo betão, no entanto, dois deles ainda rompem pelo endurecedor. Pode-se dizer que o fim do “tempo aberto” termina pouco antes da resistência à penetração ser 5,3 MPa.

O facto de se ter utilizado nesta composição um “superplastificante / forte redutor de água de elevada eficácia” pode ser a razão da redução do “tempo aberto”.

### 5.8.3 Massa volúmica e porosidade aberta

Com os resultados das pesagens  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$ , obtiveram-se os valores apresentados no Quadro 27, para a massa volúmica e para a porosidade aberta do 561.

**Quadro 27** – Massa volúmica e porosidade aberta do 561.

$m_1$	2,39
$m_2$	1,48
$m_3$	2,46
$D$	2417
$\epsilon_a$	7,4

### 5.8.4 Índice esclerométrico

No Quadro 28 apresentam-se os resultados do ensaio esclerométrico a que as lajetas com 561 foram submetidas.

**Quadro 28 – Resistência à compressão da superfície do 561.**

Ensaio	Índice esclerométrico			
	561			
	4,0 MPa	5,3 MPa	8,5 MPa	8,5 MPa+45
1	35	41	28	25
2	34	34	30	34
3	36	37	28	29
4	36	38	30	37
5	36	35	24	34
6	34	40	34	33
7	44	39	29	32
8	35	37	34	32
9	36	29	26	33
<b>Média</b>	36	37	29	32
<b>Tensão (MPa)</b>	33	34	23	27

Como se pode constatar, as superfícies mais resistentes à compressão são as das lajetas em que o endurecedor foi aplicado mais cedo, nos instantes de 4,0 MPa e 5,3 MPa.

## 6. Análise de resultados

Neste capítulo é feita uma análise comparativa dos resultados obtidos e já apresentados no ponto anterior.

Em todas as amassaduras houve a necessidade de adicionar água para a colocação do endurecedor. Por sua vez, também houve uma % de água que evaporou devido às elevadas temperaturas. Tendo em consideração: a quantidade de água introduzida em cada uma das amassaduras e a água evaporada, foi determinada a quantidade de água final que ficou em cada uma das amassaduras, tal como indicado no Quadro 29.

**Quadro 29** – Quantidade de água disponível por composição.

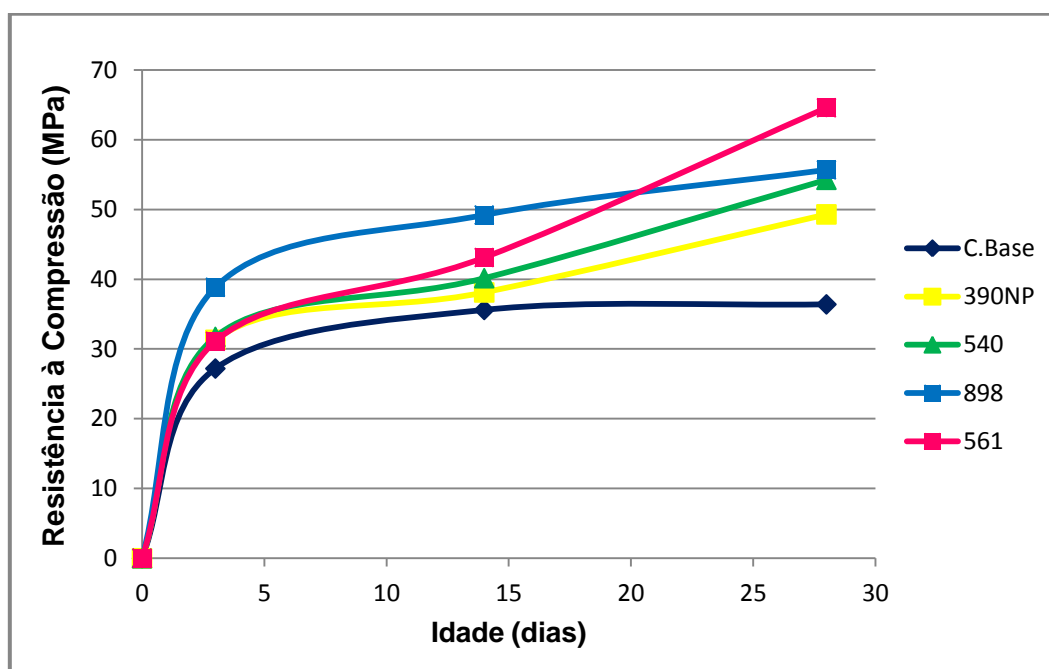
		Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Água da amassadura (l/m <sup>3</sup> )	A/C inicial	Água introduzida com o endurecedor (l/m <sup>3</sup> )	Água evaporada (l/m <sup>3</sup> )	Água final (l/m <sup>3</sup> )	A/C final
<b>Comp. Base</b>		346	180	0,52				
<b>390NP</b>	<b>8,5 MPa</b>	347	173	0,50	4,3	7,1	170	0,48
	<b>8,5 MPa+45</b>	347	173	0,50	5,1	9,2	169	0,48
<b>540</b>	<b>8,5 MPa</b>	352	161	0,46	3,9	5,3	160	0,45
	<b>8,5 MPa+45</b>	352	161	0,46	3,9	9,0	156	0,43
<b>898</b>	<b>8,5 MPa</b>	356	150	0,42	2,7	3,9	149	0,41
	<b>8,5 MPa+45</b>	356	150	0,42	3,9	5,4	148	0,41
<b>561</b>	<b>8,5 MPa</b>	353	157	0,44	2,5	7,1	152	0,42
	<b>8,5 MPa+45</b>	353	157	0,44	2,8	8,4	141	0,41

A maior redução de água registou-se no betão com o adjuvante 561 no instante 8,5MPa+45.

Verifica-se que a perda de água devido à evaporação é considerável para qualquer uma das composições. A exposição a elevadas temperaturas é a responsável por esta perda.

No Gráfico 9, podemos ver que a composição base é a que apresenta menor resistência à compressão, que se deve ao facto de ter mais água incorporada para conseguir obter a mesma consistência (S3) e consequentemente a razão a/c é superior. Já as outras composições tiveram a adição de adjuvantes, conseguindo

reduzir as suas razões a/c e ficando naturalmente mais compactas, o que acaba por se traduzir num incremento de resistência à compressão.



**Gráfico 9** – Evolução da resistência à compressão das várias composições.

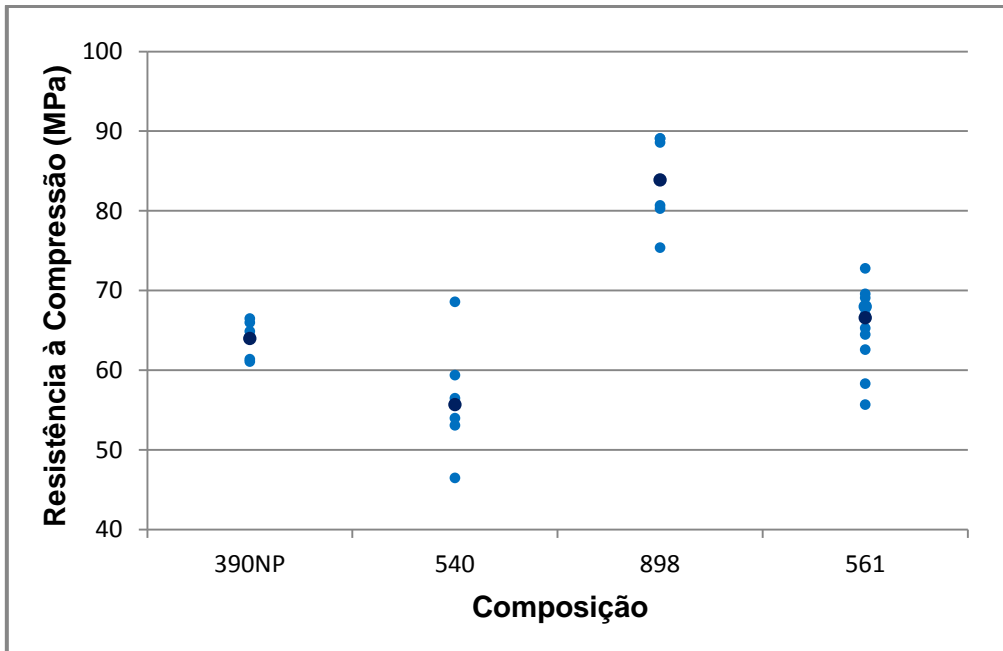
A seguir à composição base aparecem as duas composições com os “plastificantes / redutores de água”, ou seja, o 390NP e o 540.

Depois destas surge o 898, “superplastificante / forte redutor de água”, e a seguir o 561, que é “superplastificante / forte redutor de água de elevada eficácia”.

Tem todo o sentido que os plastificantes tenham menor resistência à compressão que os superplastificantes, uma vez que estes últimos conseguem reduzir mais quantidade de água e fazem com que o betão seja mais compacto.

Salienta-se o rápido desenvolvimento das resistências do 898 nas primeiras idades.

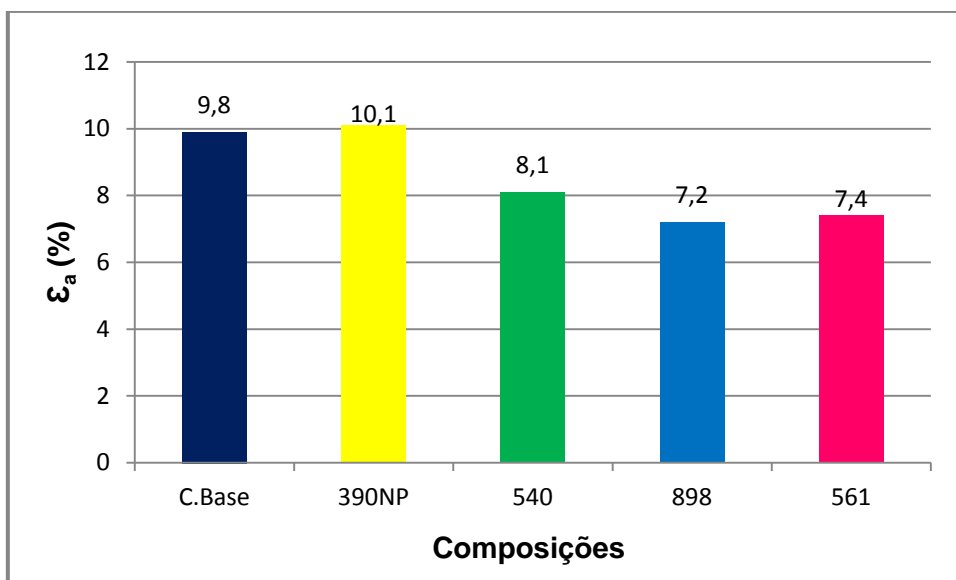
No Gráfico 10 vemos a resistência à compressão que as composições atrás referidas apresentaram aos 64 dias (provetes cilíndricos de 5 cm).



**Gráfico 10** – Resistência à compressão das várias composições aos 64 dias.

Constata-se que o betão mais resistente é o que incorpora o adjuvante 898, sendo também esta, a composição que registou um maior aumento da tensão, relativamente aos 28 dias.

O Gráfico 11 ilustra a porosidade aberta das composições utilizadas para o betão de base das lajetas. À excepção do 390NP, as composições com os restantes adjuvantes, são menos porosas que o betão da composição base, ou seja, mais densos.



**Gráfico 11** – Porosidade aberta das diferentes composições.

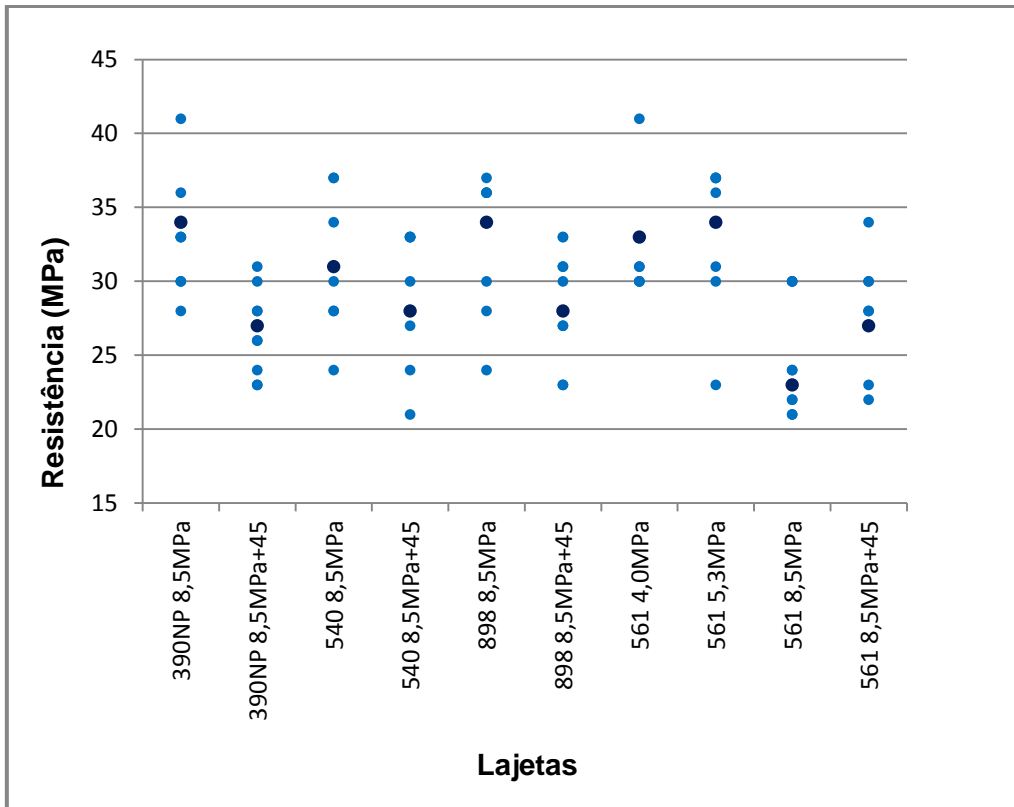
Em paralelo com o Gráfico 9, verifica-se que as composições que incorporam os superplastificantes são os betões com menos porosidade aberta e também os que se revelam mecanicamente mais resistentes aos 28 dias.

Quanto à ligação “endurecedor/betão”, as composições que revelam ter melhor comportamento são as do 390NP e 898, ocorrendo o fim do chamado “tempo aberto” depois dos 8,5 MPa (ver 5.5.2 e 5.7.2). Isto pode estar associado ao facto de ambas atingirem os 8,5 MPa antes das outras duas, ficando menos tempo expostas ao calor e ao vento até ao instante da aplicação do endurecedor. Curiosamente, de todas as composições, a composição 898 é a que tem menor razão a/c e a 390NP a que tem maior.

Salienta-se o comportamento da composição com o 898, não só é a menos porosa, como das mais resistentes à compressão e ainda a que apresenta tensões mais elevadas na rotura, quando sujeita ao ensaio de arrancamento por pull-off.

Os piores resultados da ligação “endurecedor/betão” registam-se com o 561. Esta foi a composição que esteve mais tempo exposta às elevadas temperaturas antes da aplicação do endurecedor, o que levou a que a água disponível nesse instante, fosse menor, dificultando assim a aderência entre as duas camadas.

A dispersão dos valores obtidos nos ensaios de índice esclerométrico é bastante acentuada não permitindo, assim, tirar conclusões válidas, como mostra o Gráfico 12. Esta dispersão pode ser justificada pelo facto destes resultados representarem as resistências apenas dos primeiros 5 cm da camada superior das lajetas, podendo haver diferenças na espessura da camada de endurecedor e, por sua vez, zonas em que foi adicionada mais ou menos água.



**Gráfico 12** – Resistências resultantes do ensaio esclerométrico.

De todos estes resultados podemos constatar que não é a porosidade aberta das amostras que vai condicionar os resultados e que independentemente da utilização dum plastificante ou superplastificante, o que mais condiciona é, em primeiro lugar, o tempo que a amostra está exposta às elevadas temperaturas até atingir o instante de colocação do endurecedor. Pode-se pois dizer que a escolha do adjuvante é fundamental. Por este motivo, não se pode considerar que o teste da profundidade de penetração de um pé seja válido para todas as situações.

Independentemente dos aspectos atrás referidos, é necessário também, dimensionar adequadamente as equipas de trabalho para as áreas de pavimento a construir, não esquecendo as temperaturas e humidade a que estarão sujeitos.

## 7. Conclusões

Este estudo teve como objectivo estudar a influência que os plastificantes e superplastificantes têm no comportamento de um pavimento em betão com um endurecedor de superfície de quartzo. Acerca do mesmo podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A incorporação de adjuvantes na composição do betão de base, mostra ter um papel relevante no desempenho dos mesmos, principalmente na aderência entre as camadas do betão de base e endurecedor;
- O comportamento de plastificantes ou superplastificante varia em função da escolha dos mesmos, não se podendo dizer que os primeiros são melhores que os segundos, ou vice-versa;
- São necessárias situações de temperaturas extremas para a obtenção de maus resultados, assim como, a aplicação do endurecedor de superfície tardiamente incrementa a possibilidade de obtenção de maus resultados;
- As composições com os adjuvantes 898 e 390NP foram as únicas que revelaram ter um bom comportamento quando o endurecedor foi aplicado no instante 8,5 MPa do betão de base. Conclui-se que para estas composições o fim do “tempo aberto” é atingido depois deste instante;
- Para as composições com os adjuvantes 540 e 561 o fim do “tempo aberto” é atingido sempre antes do instante de 8,5 MPa e, no caso do 561, até mesmo antes de serem atingidos os 4,0 MPa;
- A composição que incorporou o adjuvante 898 foi a que revelou melhor desempenho, especialmente pela boa aderência do endurecedor. Também foi esta, a composição que apresentou menor razão A/C, menor porosidade, boa resistência à compressão e foi a que atingiu o instante para aplicação do endurecedor de superfície mais cedo;
- No instante 8,5MPa+45 todas as composições mostraram maus resultados;



- Em grandes áreas é necessário dimensionar adequadamente as equipas de trabalho e ter especial atenção a situações extremas de temperatura e vento, por forma a conseguir aplicar o endurecedor ainda no “tempo aberto”.

## **8. Sugestões para desenvolvimentos futuros**

Dado que a construção de pavimentos com endurecedor de superfície é uma prática crescente, o mercado acompanha este crescimento com uma maior oferta e disponibilidade de produtos para a produção dos mesmos.

Este estudo incidiu na influência que os adjuvantes podem ter no comportamento de pavimentos de betão apenas com um endurecedor de superfície de quartzo. No entanto, dada a variedade que existe destes produtos, a influência que os diferentes tipos de endurecedores de superfície podem ter no desempenho deste tipo de pavimentos, é, na minha opinião, um assunto merecedor de desenvolvimento.

Também, e ainda em sequência deste estudo, seria interessante analisar o comportamento das mesmas composições, com os adjuvantes 390NP, 540, 898 e 561 com a aplicação do endurecedor sempre no mesmo instante definido agora em função do tempo.

## Bibliografia

- [1] Torgal, F.P., Gomes, J.P.C., Jalali, S., “Argamassas Antigas: Reacção Pozolânica ou Activação Alcalina?”, Artigo publicado no Congresso Nacional de Argamassas de Construção 2, Lisboa, 2007.
- [2] Thomaz, E.C.S., (04/05/2011). “Cimentos e Concretos”, Notas de apoio a aulas, [http://www.ime.eb.br/~web de2/prof/ethomaz/cimentos.pdf](http://www.ime.eb.br/~web_de2/prof/ethomaz/cimentos.pdf).
- [3] Vieceli, F.A., “Influência da Utilização dos Endurecedores Superficiais Cimentícios na Resistência à Abrasão de Pisos Industriais de Concreto”, Trabalho de conclusão para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- [4] Garcia, J., Brito, J., “Exigências Funcionais e Requisitos dos Revestimentos de Pisos Industriais”, Artigo publicado no Encontro Nacional Sobre a Qualidade e Inovação na Construção (QIC2006), Lisboa, 2006.
- [5] Hullet, T., Plimmer, J., “Delamination of Concrete Floor Surfaces”, Concrete Advice nº18, 2003.
- [6] Portland Cement Association, “Concrete Slab Surface Defects: Causes, Prevention, Repair”, Concrete Information, 2001.
- [7] Coutinho, A.S., “Fabrico e Propriedades do Betão” - Volume I, LNEC, Lisboa, 1988.
- [8] Ribeiro, A.B., “Betões de Ligantes Hidráulicos e Seus Componentes”, Sebenta da disciplina de Materiais de Construção, Universidade de Évora, 2005.
- [9] Costa, A., Appleton, J., “Estruturas de Betão I – Parte II- Materiais”, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [10] Paulo, R. N., “Caracterização de Argamassas Industriais”, Dissertação à obtenção do grau de Mestre, Universidade de Aveiro, 2006.
- [11] Pessoa, M.B., Brito, P., Almeida, F. P., Coelho, M.F., Costa, R. P., Portugal, A., “Síntese e Caracterização de um Superplastificante para Betão”- Artigo publicado na 8ª Conferência Internacional de Engenharia Química, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2001.

- [12] Tipping, E., Ahal, D., “Guide for Concrete Floor and Slab Construction”, Reported by ACI Committee 302, American Concrete Institute, 2004.
- [13] Camões, A. “Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos de betão fresco”, Artigo, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2004.
- [14] Instituto Português da Qualidade (IPQ) - Ensaio do Betão Fresco - Parte 2: Ensaio de Abaixamento. Caparica: IPQ, 2009. NP EN 12350-2.
- [15] Instituto Português da Qualidade (IPQ) - Ensaio do Betão Endurecido - Parte 3: Resistência à Compressão de Provetes. Caparica: IPQ, 2009. NP EN 12390-3.
- [16] Instituto Português da Qualidade (IPQ) - Ensaio do Betão Endurecido - Parte 4: Resistência à Compressão. Características das Máquinas de Ensaio. Caparica: IPQ, 2009. NP EN 12390-4.
- [17] Instituto Português da Qualidade (IPQ) - Ensaio do Betão nas Estruturas - Parte 1: Carotes: Extração, Exame e Ensaio à Compressão. Caparica: IPQ, 2009. NP EN 12504-1.
- [18] European Committee for Standardization (CEN)- Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Measurement of bond strength by pull- off. Brussels: CEN, 1999. EN 1542.
- [19] Instituto Português da Qualidade (IPQ) – Ensaio do Betão Endurecido – Parte 7: Massa Volúmica do Betão Endurecido. Caparica: IPQ, 2009. NP EN 12390-7.
- [20] BASF Construction Chemicals Portugal SA, Prontuário de Produtos, Rio de Mouro, 2010.
- [21] Sika Portugal SA, “SikaPlast 898” – Ficha de Produto, V.N. Gaia, Sika Portugal SA, 2009.
- [22] Duro-Europa, “SuperQuartz Endurecedor de Superfície” - Ficha Técnica, Duro-Europa, Braga.
- [23] <http://quimatecnica.com.br/wp-content/gallery/enduferr/1-3.jpg>
- [24] <http://www.portovivosru.pt/verNoticia.php?noticia=521>

# Anexos

**Anexo 1 – Dados de fabrico das lajetas**  
Registo de laboratório

**Quadro A.1** - Dados de fabrico das lajetas com o 390NP.

	<b>390NP</b>	
	<b>8,5 MPa</b>	<b>8,5 MPa+45</b>
Data da amassadura	24-05-2011	24-05-2011
Temp. ambiente (°C)	22,5	22
Humidade relativa (%)	71	73
Hora de fabrico	11:16	10:50
Temp. do betão (°C)	23	21
Hora do ensaio de abaixamento	11:25	10:56
Abaixamento (cm)	14,3	14,8
Hora de colocação do betão de base	11:32	11:04
Hora de obtenção da resistência	16:45	16:10
Hora de colocação do endurecedor	16:45	16:55
Quantidade de endurecedor (kg)	1,2	1,2
Água adicionada (l)	0,225	0,265
Hora do 1º afagamento	16:54	17:01
Hora do 2º afagamento	17:13	17:30
Hora de fim dos trabalhos	17:15	17:35

**Quadro A.2** - Dados de fabrico das lajetas com o 540.

	<b>540</b>	
	<b>8,5 MPa</b>	<b>8,5 MPa+45</b>
Data da amassadura	13-06-2011	13-06-2011
Temp. ambiente (°C)	21,2	21,2
Humidade relativa (%)	55	55
Hora de fabrico	10:34	10:34
Temp. do betão (°C)	22,2	22,2
Hora do ensaio de abaixamento	10:43	10:43
Abaixamento (cm)	11	11
Hora de colocação do betão de base	10:56	10:56
Hora de obtenção da resistência	18:20	16:44
Hora de colocação do endurecedor	18:20	17:29
Quantidade de endurecedor (kg)	0,72	0,72
Água adicionada (l)	0,2	0,2
Hora do 1º afagamento	18:21	17:30
Hora do 2º afagamento	18:40	17:58
Hora do 3º afagamento	18:50	18:15
Hora de fim dos trabalhos	18:55	18:20

**Quadro A.3** - Dados de fabrico das lajetas com o 898.

	<b>898</b>	
	<b>8,5 MPa</b>	<b>8,5 MPa+45</b>
Data da amassadura	06-06-2011	06-06-2011
Temp. ambiente (°C)	21,2	21,2
Humidade relativa (%)	61	61
Hora de fabrico	11:05	11:05
Temp. do betão (°C)	22,3	22,3
Hora do ensaio de abaixamento	11:18	11:18
Abaixamento (cm)	15	15
Hora de colocação do betão de base	11:25	11:25
Hora de obtenção da resistência	15:13	15:13
Hora de colocação do endurecedor	15:15	16:00
Quantidade de endurecedor (kg)	0,72	0,72
Água adicionada (l)	0,14	0,20
Hora do 1º afagamento	15:17	16:02
Hora do 2º afagamento	15:39	16:35
Hora do 3º afagamento	15:57	x
Hora de Fim dos Trabalhos	16:00	16:43



**Quadro A.4** - Dados de fabrico das lajetas com o 561 (8,5 MPa e 8,5 MPa+45).

	<b>561</b>	
	<b>8,5 MPa</b>	<b>8,5 MPa+45</b>
Data da amassadura	08-06-2011	08-06-2011
Temp. ambiente (°C)	19,5	19,5
Humidade relativa (%)	47	47
Hora de fabrico	10:00	10:00
Temp. do betão (°C)	21,1	21,1
Hora do ensaio de abaixamento	10:07	10:07
Abaixamento (cm)	12,5	12,5
Hora de colocação do betão de base	10:19	10:19
Hora de obtenção da resistência	16:20	16:20
Hora de colocação do endurecedor	16:22	17:05
Quantidade de endurecedor (kg)	0,72	0,72
Água adicionada (l)	0,13	0,145
Hora do 1º afagamento	16:25	17:09
Hora do 2º afagamento	16:55	17:45
Hora de fim dos trabalhos	17:00	17:50

**Quadro A.5** - Dados de fabrico das lajetas com 561 (4,0 MPa e 5,3MPa).

	<b>561</b>	
	<b>4,0 MPa</b>	<b>5,3 MPa</b>
Data da amassadura	27-06-2011	27-06-2011
Temp. ambiente (°C)	25,1	25,1
Humidade relativa (%)	60%	60%
Hora de fabrico	10:25	10:25
Temp. do betão (°C)	25,2	25,2
Hora do ensaio de abaixamento	10:33	10:33
Abaixamento (cm)	15	15
Hora de colocação do betão de base	10:42	10:42
Hora de obtenção da resistência	17:20	17:20
Hora de colocação do endurecedor	17:20	17:23
Quantidade de endurecedor (kg)	0,72	0,72
Água adicionada (l)	0,2	0,2
Hora do 1º afagamento	17:25	17:27
Hora do 2º afagamento	17:49	17:53
Hora de fim dos trabalhos	17:50	17:55

**Anexo 2 – Resistência à compressão dos provetes cúbicos de 15 cm**  
Registo de laboratório

**Quadro A.6 – Resistência à compressão do betão com composição base.**

	<b>Idade</b>							
	<b>3 Dias</b>		<b>7 Dias</b>		<b>14 Dias</b>		<b>28 Dias</b>	
<b>F (kN)</b>	661,8	584	675,6	684,5	801,9	799,5	808,4	804,7
<b>fc (MPa)</b>	29,4	26,0	30,2	30,4	35,6	35,5	35,9	35,8
<b>Resistência (MPa)</b>	<b>27,7</b>		<b>30,3</b>		<b>35,6</b>		<b>35,8</b>	

**Quadro A.7 – Resistência à compressão do 390NP.**

	<b>Idade do Provede</b>							
	<b>3 Dias</b>		<b>7 Dias</b>		<b>14 Dias</b>		<b>28 Dias</b>	
<b>F (kN)</b>	681,3	727,7	770	795,4	833,1	881,1	1078,2	1140,4
<b>fc (MPa)</b>	30,3	32,3	34,2	35,4	37,0	39,2	47,9	50,7
<b>Resistência (MPa)</b>	<b>31,3</b>		<b>34,8</b>		<b>38,1</b>		<b>49,3</b>	

**Quadro A.8 – Resistência à compressão do 540.**

	<b>Idade do Provede</b>							
	<b>3 Dias</b>		<b>7 Dias</b>		<b>14 Dias</b>		<b>28 Dias</b>	
<b>F (kN)</b>	706,3	722,2	767,1	743,8	938,8	869	1148,6	1295,3
<b>fc (MPa)</b>	31,2	32,1	34,1	33,0	41,7	38,6	51,0	57,5
<b>Resistência (MPa)</b>	<b>31,7</b>		<b>33,6</b>		<b>40,2</b>		<b>54,3</b>	

**Quadro A.9 – Resistência à compressão do 898.**

	<b>Idade</b>							
	<b>3 Dias</b>		<b>7 Dias</b>		<b>14 Dias</b>		<b>28 Dias</b>	
<b>F (kN)</b>	936,3	811,2	1029,5	1039,8	1171,5	1043,9	1377,4	1127,1
<b>fc (MPa)</b>	41,6	36,1	45,8	46,2	52,0	46,4	61,2	50,1
<b>Resistência (MPa)</b>	<b>38,9</b>		<b>46,0</b>		<b>49,2</b>		<b>55,7</b>	

**Quadro A.10 – Resistência à compressão do 561.**

	<b>Idade do Provete</b>							
	<b>3 Dias</b>		<b>7 Dias</b>		<b>14 Dias</b>		<b>28 Dias</b>	
<b>F (kN)</b>	705,8	693,2	846,6	875,6	971,9	968,2	1455,8	1448,5
<b>fc (MPa)</b>	31,4	30,8	37,65	38,9	43,2	43,0	64,8	64,4
<b>Resistência (MPa)</b>	<b>31,1</b>		<b>38,3</b>		<b>43,1</b>		<b>64,6</b>	