



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS**

**Mestrado em Engenharia Civil**

*Especialização em Construção*

**Dissertação**

**Comportamento de diferentes tipos de endurecedores de  
superfície em pavimentos de betão**

Marco André Figueira Nunes

**Orientador:**

Professora Maria Teresa Guerra Pinheiro-Alves

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

Junho de 2013







**Mestrado em Engenharia Civil**

*Especialização em Construção*

**Dissertação**

**Comportamento de diferentes tipos de endurecedores de  
superfície em pavimentos de betão**

Marco André Figueira Nunes

**Orientador:**

Professora Maria Teresa Guerra Pinheiro-Alves

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



## AGRADECIMENTOS

A concretização do presente trabalho só foi possível graças ao empenho e dedicação de todos aqueles que, de uma ou de outra forma, ajudaram à sua realização, e que, sem mais delongas, passo a agradecer.

À Professora Maria Teresa Guerra Pinheiro-Alves, um agradecimento muito especial por ter aceitado ser minha orientadora, pela sugestão do tema, pelo acompanhamento prestado e conhecimentos transmitidos, e pelas críticas e sugestões.

Ao Engenheiro António Bettencourt Ribeiro, ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil e seus colaboradores pela disponibilidade na realização de ensaios.

À Maria João Marques pela amizade, pela ajuda na demonstração do modo de realização dos ensaios no início da fase experimental, e pelas informações acerca do assunto prestadas.

À minha colega Cíntia Freitas, o meu muito obrigado, pela partilha de ideias e opiniões e pela ajuda incondicional que ofereceu durante toda a fase experimental.

À empresa Britobetão – Central de Betão Lda, os meus agradecimentos pela cedência do cimento e agregados, e pela disponibilidade do uso do seu laboratório para a realização dos ensaios de resistência à compressão. Pela disponibilização dos endurecedores de superfície e dos adjuvantes expresse o meu agradecimento às seguintes empresas: Duro-Europa – Fabricação de Produtos Endurecedores de Pavimentos Lda, SIB – Sociedade Industrial de Britagem de Pedra Lda, JRP – Produtos & Revestimentos para Construção Civil S.A., BASF – Construction Chemicals Portugal, S.A. e Sika Portugal S.A..

À Universidade de Évora que possibilitou a minha formação académica na área de engenharia civil.

À minha namorada, Cátia Lopes, pela revisão cuidada do texto e em particular, pela paciência, força e motivação dada durante todo o tempo da realização da dissertação.

E por último, agradeço aos meus pais, Arlindo e Marinela, pela educação e incentivo que me facultaram durante toda a minha vida, possibilitando tudo o que alcancei e tudo o que sou.



## RESUMO

### **Comportamento de diferentes tipos de endurecedores em pavimentos de betão**

Ultimamente têm ocorrido muitos problemas em pavimentos de betão com endurecedores de superfície. Este trabalho tem como finalidade estudar a influência do tipo de endurecedor quando aplicado em betões de base em situações climatéricas adversas. Nesse sentido utilizaram-se duas composições para o betão de base, uma com plastificante e outra com superplastificante; cinco endurecedores de superfície; e foram considerados dois instantes para a aplicação do endurecedor, 8,5 MPa e 8,5 MPa mais 45 minutos. Foram realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido do betão. A partir destes ensaios foi possível averiguar o comportamento de cada endurecedor consoante o tipo de agregado e o tipo de ligante na sua constituição, e o efeito da utilização de adjuvantes diferentes no betão de base. Deste modo, verificou-se qual a composição e endurecedor que apresentavam a melhor ligação endurecedor/betão, sendo a mais indicada a executar nas condições extremas estabelecidas.

#### **Palavras-chave:**

Endurecedores de superfície; betão, fissuração; delaminação e durabilidade.



## ABSTRACT

### Behavior of different kind of surface hardeners in concrete floors

Lately there have been many problems in concrete pavements with surface hardeners. This work aims to study the influence of hardener when applied to concrete base in adverse weather conditions. In that sense, two compositions were used for the concrete base, one with plasticizer and the other with superplasticizer; five surface hardeners; and two instants were considered for the application of the hardener, 8.5 MPa and 8.5 MPa over 45 minutes. Assays were performed in fresh and hardened state of concrete. From these tests it was possible to analyze the behavior of each hardener according to the type of aggregate and binder type in its constitution, and the effect of using different adjuvants in the concrete base. Thus, it was found which composition and hardener showed the best connection hardener/concrete, being most suitable to be implemented in the established extreme conditions.

#### Keywords:

Surface hardeners; concrete, cracking; delamination and durability.



---

**ÍNDICE GERAL**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>1</b>  |
| 1.1. Considerações iniciais .....  | 1         |
| 1.2. Objectivos da dissertação .....   | 1         |
| 1.3. Metodologia e estrutura da dissertação .....  | 2         |
| <b>2. ESTADO DE ARTE</b> .....   | <b>5</b>  |
| 2.1. Pavimentos de betão .....   | 5         |
| 2.2. Endurecedores de superfície .....   | 6         |
| 2.2.1. Objectivos dos endurecedores .....  | 7         |
| 2.2.2. Aplicação.....  | 8         |
| 2.2.3. Problemas que surgem nestes pavimentos .....  | 10        |
| 2.2.3.1. Fissuração .....  | 10        |
| 2.2.3.2. Delaminação.....  | 11        |
| <b>3. TRABALHO EXPERIMENTAL</b> .....  | <b>15</b> |
| 3.1. Materiais .....   | 15        |
| 3.1.1. Cimento.....  | 15        |
| 3.1.2. Agregados.....  | 16        |
| 3.1.3. Água.....   | 19        |
| 3.1.4. Adjuvantes .....  | 19        |
| 3.1.5. Endurecedores de superfície.....  | 20        |
| 3.2. Metodologia.....  | 21        |
| 3.2.1. Granulometria dos endurecedores .....   | 21        |
| 3.2.2. Fabrico do betão de base .....  | 26        |
| 3.2.3. Preparação dos moldes e cofragens .....   | 29        |
| 3.2.4. Consistência do betão de base .....   | 29        |
| 3.2.5. Resistência à penetração .....  | 32        |
| 3.2.6. Colocação do betão de base na cofragem .....  | 35        |
| 3.2.7. Preparação dos cubos de 15 cm de aresta para determinação da resistência à compressão .....             | 36        |
| 3.2.8. Posicionamento das lajetas, cubos de 10 cm de aresta e tabuleiros com água no interior dos túneis ..... | 38        |

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 3.2.9. Aplicação do endurecedor .....   | 40                                 |
| 3.2.10. Ensaio de resistência à compressão .....  | 45                                 |
| 3.2.11. Ensaio de arrancamento por pull-off .....   | 48                                 |
| 3.2.12. Determinação do índice esclerométrico .....   | 52                                 |
| 3.2.13. Identificação das lajetas .....   | 54                                 |
| <b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>  | <b>57</b>                          |
| <b>4.1. Determinação da massa volúmica, da perda ao fogo e do resíduo insolúvel dos endurecedores .....</b> | <b>57</b>                          |
| <b>4.2. Lajetas executadas .....</b>  | <b>58</b>                          |
| 4.2.1. Dados relativos às lajetas.....  | 59                                 |
| 4.2.1.1. Adjuvante P .....  | 59                                 |
| 4.2.1.2. Adjuvante SP .....   | 65                                 |
| 4.2.2. Temperaturas nos túneis.....   | 70                                 |
| 4.2.3. Determinação da taxa de evaporação .....   | 72                                 |
| 4.2.4. Determinação da resistência à penetração.....  | 74                                 |
| 4.2.5. Resistência ao arrancamento por pull-off .....   | 77                                 |
| 4.2.5.1. Endurecedor B1 .....   | 77                                 |
| 4.2.5.2. Endurecedor B2.....  | 80                                 |
| 4.2.5.3. Endurecedor Q1 .....   | 83                                 |
| 4.2.5.4. Endurecedor Q2 .....   | 87                                 |
| 4.2.5.5. Endurecedor C .....  | 90                                 |
| 4.2.6. Determinação do índice esclerométrico.....   | 93                                 |
| <b>4.3. Resistência à compressão do betão de base.....</b>  | <b>96</b>                          |
| <b>4.4. Considerações gerais sobre os resultados obtidos.....</b>   | <b>98</b>                          |
| <b>5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>  | <b>105</b>                         |
| <b>5.1. Conclusões.....</b>   | <b>105</b>                         |
| <b>5.2. Desenvolvimentos futuros .....</b>  | <b>107</b>                         |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>109</b>                         |
| <b>ANEXO A .....</b>  | <b>Granulometria da areia fina</b> |
| <b>ANEXO B .....</b>  | <b>Granulometria da brita 1</b>    |

**ANEXO C ..... Granulometria da brita 2**

**ANEXO D ..... Granulometria dos endurecedores**

**ANEXO E ..... Massa volúmica dos endurecedores**

**ANEXO F..... Perda ao fogo e resíduo insolúvel dos endurecedores**

**ANEXO G ..... Resistência à compressão de provetes cúbicos**

**ANEXO H ..... Resistência à compressão de provetes cilíndricos**

**ANEXO I..... Taxa de evaporação**

**ANEXO J..... Dados relativos ao fabrico das lajetas, aplicação dos endurecedores e controlo de temperatura no interior dos túneis**

**ANEXO K ..... Resistência à penetração**

**ANEXO L..... Resistência à compressão - índice esclerométrico**

**ANEXO M..... Arrancamento por pull-off**



**ÍNDICE DE FIGURAS**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Esquema representativo da zona de delaminação (National Ready Mixed Concrete Association, 2004) .....       | 12 |
| Figura 2 - Curva granulométrica da areia fina (Dados fornecidos pelo fabricante) .....                                 | 17 |
| Figura 3 - Curva granulométrica da Brita 1 (Dados fornecidos pelo fabricante) .....                                    | 18 |
| Figura 4 - Curva granulométrica da Brita 2 (Dados fornecidos pelo fabricante) .....                                    | 18 |
| Figura 5 - Coluna de peneiros disposta no agitador mecânico .....  | 22 |
| Figura 6 - Granulometria do endurecedor B1 .....   | 23 |
| Figura 7 - Granulometria do endurecedor B2 .....   | 23 |
| Figura 8 - Granulometria do endurecedor Q1 .....   | 23 |
| Figura 9 - Granulometria do endurecedor Q2 .....   | 23 |
| Figura 10 - Granulometria do endurecedor C .....   | 24 |
| Figura 11 - Curvas granulométricas dos endurecedores de superfície .....   | 24 |
| Figura 12 - Amostra da fracção fina dos endurecedores enviados para o LNEC .....                                       | 25 |
| Figura 13 - Materiais preparados para o fabrico do betão .....   | 28 |
| Figura 14 - Mistura dos materiais para o fabrico do betão .....  | 28 |
| Figura 15 - Moldes para cofragem das lajetas .....   | 29 |
| Figura 16 - Colocação (a) e compactação (b) da camada de fundo .....   | 30 |
| Figura 17 - Remoção do molde .....   | 31 |
| Figura 18 - Medição do abaixamento obtido .....  | 31 |
| Figura 19 - Crivagem do betão de base .....  | 33 |
| Figura 20 - Peneiração do betão (a) e colocação da argamassa (b) obtida nos moldes de 10 cm de aresta .....            | 33 |
| Figura 21 - Aparelho para penetração e respectiva série de agulhas .....   | 34 |
| Figura 22 - Realização de ensaio de penetração .....   | 34 |
| Figura 23 - Provetes evidenciando as diferentes secções das agulhas após a realização dos ensaios de penetração .....  | 35 |
| Figura 24 - Colocação (a), vibração (b) e regularização (c) da superfície do betão .....                               | 35 |
| Figura 25 - Vibração do betão com auxílio de agulha vibratória .....   | 36 |
| Figura 26 - Série de provetes preparados .....   | 36 |
| Figura 27 - Provetes mergulhados no tanque de água .....   | 37 |
| Figura 28 - Máquina de resistência à compressão .....  | 37 |
| Figura 29 - Provetes cúbicos de 15 cm de aresta .....  | 38 |
| Figura 30 - Pormenor do sistema para simulação do processo de cura de pavimentos de betão sob condições extremas ..... | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 31 - Termómetros para registo de temperaturas em cada túnel.....                                | 39 |
| Figura 32 - Forma de colocação da lajeta, dos cubos de 10 cm de aresta e dos tabuleiros com água ..... | 39 |
| Figura 33 - Túnel 1 (a) e túnel 2 (b) .....  | 40 |
| Figura 34 - Superfície do betão ressequida .....   | 41 |
| Figura 35 - Salpico de água sobre a superfície do betão .....  | 41 |
| Figura 36 - Endurecedor espalhado sobre a superfície do betão .....                                    | 42 |
| Figura 37 - Salpico de água sobre o endurecedor de superfície na lajeta .....                          | 42 |
| Figura 38 - Afagador utilizado no processo de afagamento das lajetas .....                             | 43 |
| Figura 39 - Afagamento inicial .....   | 43 |
| Figura 40 - Afagamento intermédio.....   | 43 |
| Figura 41 - Afagamento final.....  | 44 |
| Figura 42 - Salpico de água para correcção de imperfeições e eliminação de rugosidades.....            | 44 |
| Figura 43 - Cobertura da lajeta com película aderente.....   | 45 |
| Figura 44 - Provette sendo comprimido durante o ensaio .....   | 46 |
| Figura 45 - Extracção de carotes das lajetas .....   | 46 |
| Figura 46 - Locais de extracção das carotes.....   | 47 |
| Figura 47 - Carotes extraídas .....  | 47 |
| Figura 48 - Esquema representativo da disposição dos locais a ensaiar .....                            | 48 |
| Figura 49 - Zonas a ensaiar previamente cortadas .....   | 48 |
| Figura 50 - Zona a ensaiar sendo cortada com auxílio de caroteadora.....                               | 49 |
| Figura 51 - Preparação das zonas circulares para colagem das pastilhas metálicas ..                    | 49 |
| Figura 52 - Preparação da cola (a) e das pastilhas metálicas (b).....                                  | 50 |
| Figura 53 - Processo de colagem das pastilhas metálicas .....  | 50 |
| Figura 54 - Pastilhas metálicas coladas nos respectivos locais .....                                   | 50 |
| Figura 55 - Execução do ensaio de arrancamento por pull-off .....                                      | 51 |
| Figura 56 - Resultados obtidos com o arrancamento por pull-off .....                                   | 52 |
| Figura 57 - Execução do ensaio para a determinação do índice esclerométrico .....                      | 53 |
| Figura 58 - Esquema representativo da disposição dos locais a ensaiar .....                            | 53 |
| Figura 59 - Zonas ensaiadas numeradas.....   | 54 |
| Figura 60 - Ábaco para conversão, da leitura dada pelo martelo, em MPa .....                           | 54 |
| Figura 61 - Total de lajetas fabricadas .....  | 55 |
| Figura 62 - Nomenclatura das lajetas .....   | 55 |
| Figura 63 - Aspecto final da superfície das lajetas P_B1 (a) e P+45_B1 (b) .....                       | 60 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 64 - Aspecto final das superfícies das lajetas P_B2 (a) e P+45_B2 (b).....              | 61 |
| Figura 65 - Destacamento de endurecedor do betão de base num dos cantos da lajeta P+45_B2..... | 61 |
| Figura 66 - Fissura ocorrida a meio da lajeta .....  | 62 |
| Figura 67 - Aspecto superficial queimado na generalidade das lajetas .....                     | 63 |
| Figura 68 - Verificação da densificação e regularidade numa das lajetas .....                  | 64 |
| Figura 69 - Aspecto final da superfície da lajeta P+45_C.....                                  | 65 |
| Figura 70 - Aspecto final da superfície das lajetas SP_B1 (a) e SP+45_B1 (b).....              | 66 |
| Figura 71 - Aspecto final da superfície das lajetas SP_B2 (a) e SP+45_B2 (b).....              | 67 |
| Figura 72 - Aspecto final da superfície das lajetas SP_Q1 (a) e SP+45_Q1 (b).....              | 68 |
| Figura 73 - Aspecto final da superfície das lajetas SP_Q2 (a) e SP+45_Q2 (b).....              | 69 |
| Figura 74 - Aspecto final da superfície das lajetas SP_C (a) e SP+45_C (b) .....               | 69 |
| Figura 75 - Resistência à penetração - tempos de presa de P e SP .....                         | 75 |
| Figura 76 - Resistência à penetração - obtenção do valor de 8,5 MPa para lajetas P. 76         |    |
| Figura 77 - Resistência à penetração - obtenção do valor de 8,5 MPa para lajetas SP .....      | 76 |
| Figura 78 - Índice esclerométrico - lajetas P .....  | 94 |
| Figura 79 - Índice esclerométrico - lajetas SP .....   | 95 |
| Figura 80 - Resistência à compressão - provetes cúbicos .....                                  | 97 |
| Figura 81 - Resistência à compressão - Provetes cilíndricos .....                              | 98 |



**ÍNDICE DE TABELAS**

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 - Características típicas de endurecedores de superfície consoante o tipo de agregado .....   | 7   |
| Tabela 2 - Tipos de agregados de endurecedores de superfície consoante a sua resistência à abrasão e utilização (The Concrete Floor Contractors Association of Ontario)..... | 8   |
| Tabela 3 - Análise química do cimento CEM II/A-L 42,5R.....  | 15  |
| Tabela 4 - Ensaio mecânicos do cimento CEM II/A-L 42,5R .....  | 16  |
| Tabela 5 - Ensaio físicos do cimento CEM II/A-L 42,5R .....  | 16  |
| Tabela 6- Composição do betão de base de referência .....  | 26  |
| Tabela 7 - Massa volúmica dos constituintes do betão de base.....  | 26  |
| Tabela 8 - Composições dos betões de base .....  | 27  |
| Tabela 9 - Massa volúmica teórica para cada composição de betão de base .....  | 27  |
| Tabela 10 - Resultados obtidos para os ensaios da determinação da massa volúmica, da perda ao fogo e do resíduo insolúvel, para cada endurecedor de superfície.....          | 57  |
| Tabela 11 - Temperaturas registadas para as lajetas com P .....  | 71  |
| Tabela 12 - Temperaturas registadas para as lajetas com SP .....   | 71  |
| Tabela 13 - Taxa de evaporação para todas a lajetas.....   | 73  |
| Tabela 14 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor B1 em P e SP ...   | 79  |
| Tabela 15 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor B2 em P e SP ...   | 82  |
| Tabela 16 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor Q1 em P e SP... 85   |     |
| Tabela 17 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor Q2 em P e SP... 89   |     |
| Tabela 18 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor C em P e SP..... 92  |     |
| Tabela 19 - Comparação dos endurecedores .....   | 101 |

,

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. Considerações iniciais**

Actualmente, a aplicação de endurecedores de superfície em pavimentos de betão é uma das possibilidades de aumentar a resistência ao desgaste e a durabilidade dos mesmos. No entanto, fenómenos como a fissuração e delaminação da superfície do betão continuam a ocorrer. Estes problemas são mais frequentes em áreas extensas de pavimento ou quando as condições ambientais são mais quentes e/ou existe vento.

Existem diferentes tipos de endurecedor de superfície: líquidos, de agregados metálicos e não metálicos (minerais), podendo ser aplicados em diversos tipos de pavimentos. No trabalho experimental foram aplicados endurecedores compostos por agregado mineral em pavimentos do tipo monolítico. Geralmente, a sua aplicação destina-se a pavimentos de parques de estacionamento, armazéns e pisos industriais e comerciais.

Em Portugal ainda não existe legislação que contemple a construção de pavimentos com aplicação do endurecedor como revestimento.

Deste modo, pretende-se contribuir com algum conhecimento sobre a aplicação de endurecedores de superfície em Portugal, e a sua influência em pavimentos de betão consoante o tipo de agregado presente na sua composição.

Uma vez que a dissertação está enquadrada no projecto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) – Estudo da compatibilidade entre endurecedores de superfície e o betão de base em lajes de betão – quer-se também cooperar de forma a atingir o objectivo do mesmo.

## **1.2. Objectivos da dissertação**

A presente dissertação tem como principal objectivo estudar a influência do endurecedor de superfície na ligação endurecedor/betão de base. Tentando perceber até que ponto o tipo de agregado presente no endurecedor, granulometria do endurecedor e quantidade de cimento presente no endurecedor influem nessa ligação.

Tendo em vista o objectivo da dissertação, foram realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido do betão, aferindo algumas características que foram cruzadas com o modo de aplicação e os resultados dos ensaios realizados nos endurecedores.

### **1.3. Metodologia e estrutura da dissertação**

A metodologia planeada para a realização deste trabalho de investigação, que culminou com a redacção da presente dissertação, teve como primeira etapa a recolha de informação através de uma pesquisa bibliográfica realizada em fontes nacionais e internacionais. Pretendeu-se adquirir um conhecimento global sobre o tema em questão, reunir os instrumentos necessários à planificação e elaboração do trabalho experimental e ganhar sensibilidade para a análise dos resultados dos ensaios.

O presente documento compreende 5 capítulos, organizados e distribuídos da forma a seguir apresentada.

No presente capítulo apresentam-se os motivos impulsionadores deste trabalho de investigação, os seus objectivos e descreve-se a estrutura do presente documento.

O capítulo 2 consiste num levantamento do *estado da arte*, em fontes nacionais e internacionais, sobre temas com relevo para o âmbito da investigação. Assim, neste capítulo é feita uma breve referência aos pavimentos construídos em betão e descrevem-se aspectos essenciais sobre endurecedores de superfície, dando-se maior ênfase às suas características e técnicas de aplicação. Também são referidos dois dos principais problemas associados à aplicação de endurecedores de superfície: a fissuração e a delaminação.

No capítulo 3 apresentam-se as razões que motivaram a escolha dos materiais seleccionados para a realização do estudo experimental dos betões de base com aplicação de endurecedor de superfície, e descrevem-se as suas principais propriedades. É descrito o procedimento adoptado para a amassadura das pastas, e a forma como foram estabelecidas as razões A/C das pastas a partir das quais se desenvolveu todo o trabalho experimental. Neste capítulo são ainda apresentados e ilustrados os ensaios adoptados para caracterizar o comportamento dos endurecedores de superfície, fazendo-se referência aos objectivos de cada um deles,

normas utilizadas, aparelhos e utensílios e procedimentos adoptados, sendo também descrita a sequência pela qual foram realizados.

O capítulo 4 dedica-se à apresentação e análise dos resultados obtidos durante o trabalho experimental, para todos os ensaios descritos no capítulo 3, onde são feitos comentários e críticas de forma equitativa, aferindo o comportamento dos endurecedores de superfície nas pastas em que são aplicados. Os resultados dos ensaios são apresentados individualmente para cada um dos tipos de ensaios efectuados.

No último capítulo apresentam-se as principais conclusões e contribuições do trabalho realizado, bem como algumas sugestões tendo em vista futuros desenvolvimentos no domínio da temática abordada: comportamento de diferentes tipos de endurecedores de superfície em pavimentos de betão

Por fim, esta dissertação encerra com a apresentação da bibliografia e dos anexos referenciados ao longo do texto.



## 2. ESTADO DE ARTE

### 2.1. Pavimentos de betão

Segundo Pimenta (2008), a necessidade de determinado tipo de pavimento depende da existência e da forma do próprio solo, já que este é o verdadeiro suporte de todos os movimentos e acções. No entanto, o solo oferece algumas limitações uma vez que a sua topografia e constituição condicionam de certa forma os espaços e usos que se pretendam concretizar (Pimenta, 2008). Além dos pavimentos construídos directamente sobre o solo, há que ter também em consideração os pavimentos elevados, apoiados em superestruturas.

O pavimento é a camada mais exposta, devendo servir essencialmente como superfície resistente, durável e confortável, adaptando as condições naturais do solo às diferentes exigências impedindo a sua rápida desintegração. Esta é a camada que suporta directamente o tráfego transmitindo as respectivas solicitações à infra-estrutura e ao terreno (Pimenta, 2008), logo é necessário um bom dimensionamento na fase de projecto onde sejam analisadas em detalhe as necessidades reais do utilizador final, na medida em que o pavimento a conceber será o elemento estrutural por onde circularão pessoas, veículos, equipamentos, matérias-primas e produtos acabados. Nesta fase há que ter conta os seguintes aspectos: a resistência estrutural do pavimento, a resistência ao desgaste, o tipo e qualidade do betão, as exigências quanto à planimetria, entre outros.

Sendo o betão um material muito versátil, os pavimentos de betão estão a ser cada vez mais utilizados nas mais diversas áreas, principalmente porque a sua construção é de rápida execução, possui uma elevada resistência a acções gravíticas e ao desgaste, a qualidade da superfície é mantida por muitos anos e como tal, não há necessidade de muita manutenção.

De forma a aumentar a resistência da superfície ao desgaste e reduzir ainda mais os cuidados de manutenção de pavimentos de betão, entre outras técnicas, recorre-se à aplicação de endurecedores de superfície.

## 2.2. Endurecedores de superfície

Os endurecedores de superfície são uma mistura de agregados finos de alta resistência mecânica com cimento, que se destinam à execução da camada superficial de desgaste de pavimentos de betão.

Consoante o agregado presente na sua composição, os endurecedores de superfície podem ser classificados como metálicos ou não-metálicos (minerais) (Laticrete).

Os endurecedores metálicos são compostos por camadas finas de filamentos de ferro limpo, misturadas com produtos químicos anti corrosão, e por vezes pequenas quantidades de cimento Portland. Podem conter pigmentos coloridos possibilitando alguma flexibilidade em termos estéticos. São extremamente pesados, apresentando peso específico semelhante ao do ferro. Este tipo de endurecedor é apenas usado no interior, em áreas secas. De acordo com determinados fabricantes, em áreas molhadas ou húmidas, podem ocorrer fenómenos de oxidação e expansão do agregado metálico. A sua utilização é mais indicada para pavimentos industriais sujeitos a tráfego extremamente pesado, como empilhadores e máquinas com rodado de ferro (Laticrete), sendo que um endurecedor metálico proporciona ao pavimento resistência à abrasão e protecção a impactos, 8 vezes superiores às de um betão simples, e 4 vezes superiores às de um betão com endurecedor mineral (BASF).

Os endurecedores não-metálicos contêm na sua composição um agregado mineral, cimento Portland e por vezes aditivos químicos. Este tipo de endurecedor também pode conter pigmentos coloridos e é aplicado tanto em pavimentos interiores como exteriores. Segundo um determinado fabricante, o seu uso é indicado para pavimentos de parques de estacionamento, caves, indústrias ligeiras e zonas de tráfego pedonal (Laticrete).

Uma vez que nesta dissertação apenas foram estudados endurecedores não-metálicos, seguidamente apenas serão abordados estes.

Os endurecedores não-metálicos, i.e., os endurecedores minerais, podem conter diferentes agregados minerais como: quartzo, basalto e corindo.

O basalto é uma rocha ígnea escura composta essencialmente por plagioclase cálcica, piroxénio (sílica,  $\text{SiO}_2$ ) e olivinas (material vítreo formado por silicatos de magnésio e

ferro). Por ser bastante dura e resistente, entre as várias aplicações na construção civil, pode servir como agregado britado (Schumann, 2001).

O quartzo é um dos minerais mais abundantes do planeta, apresenta uma estrutura cristalina formada por sílica (dióxido de silício,  $\text{SiO}_2$ ), uma dureza de 7 na escala de Mohs e pode ser encontrado em diversas cores. É aplicado em areias para moldes de fundição, fabrico de vidro, fibras ópticas e é muito utilizado na construção civil como agregado fino (Schumann, 2001).

O corindo é um mineral à base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com brilho adiamantado, com dureza de 9 na escala de Mohs e pode ser transparente, translúcido ou opaco. É muito utilizado no fabrico de jóias e mecanismos de precisão, mas também pode ser incorporado como agregado fino na construção civil (Schumann, 2001).

A principal função do agregado mineral incorporado na composição do endurecedor de superfície está relacionada com a resistência ao desgaste.

Analisando a Tabela 1, é possível afirmar de uma forma geral, que os endurecedores constituídos por agregado de basalto apresentam menor dureza e menores resistências à abrasão, à compressão e à flexão que os endurecedores compostos por quartzo ou corindo.

**Tabela 1 - Características típicas de endurecedores de superfície consoante o tipo de agregado**

| Característica do endurecedor            | Tipo de agregado                   |   |                       |
|--|------------------------------------|---|-----------------------|
|  | Basalto<br>(Durochape,<br>Sibasal) | DuroQuartzo<br>(Superquartz,<br>Produr) | Corindo<br>(Prochape) |
| Resistência à abrasão BOHME (EN 13892-3) | A12                                | A6                                      | A6                    |
| Resistência à compressão (EN 13892-2)    | C60-C70                            | C70-C80                                 | C80                   |
| Resistência à flexão (EN 13892-2)        | F7                                 | F7                                      | F10                   |
| Dureza (Escala de MOHS)                  | 7 a 7,5                            | 7 a 8                                   | 9                     |

### 2.2.1. Objectivos dos endurecedores

Os endurecedores de superfície servem essencialmente como revestimento de pavimentos de betão tendo como funções: o aumento da resistência ao desgaste (abrasão), a capacidade de absorção de choques físicos sem danos e o aumento da

resistência à penetração de óleos e gorduras devido à elevada densidade da superfície

Uma vez que a resistência à abrasão depende da qualidade do agregado do endurecedor, esta será tanto maior quanto melhor for a qualidade do agregado, mesmo para espessuras reduzidas de endurecedor. O endurecedor ao ser aplicado deve ser capaz de integrar o betão de base de maneira a que não existam duas camadas independentes.

Na Tabela 2 é apresentado um esquema que relaciona o tipo de agregado com a sua resistência à abrasão e a sua utilização consoante o tráfego.

**Tabela 2 - Tipos de agregados de endurecedores de superfície consoante a sua resistência à abrasão e utilização (The Concrete Floor Contractors Association of Ontario)**

| Agregados                           | Resistência à abrasão | Utilização             |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Metálicos                           | 5                     | Tráfego médio a pesado |
| Esmeril/Corindo (óxido de alumínio) | 4                     | Tráfego médio a pesado |
| Rochas graníticas (sílica)          | 3                     | Tráfego leve a médio   |
| Rochas basálticas                   | 2                     | Tráfego leve a médio   |
| Betão simples                       | 1                     | Tráfego leve           |

### 2.2.2. Aplicação

Em Portugal, a construção de lajes afagadas com aplicação de endurecedor não está legislada. As únicas recomendações que existem para a aplicação dos endurecedores de superfície em betões de base são as do ACI 302.1R-04 e as de alguns fornecedores de endurecedores, nomeadamente a SIB e SIKA.

Apesar das recomendações, em Portugal, o processo mais tradicional de execução e acabamento de um pavimento em betão com aplicação de endurecedor de superfície é:

- a) Colocação e nivelamento do betão;
- b) Vibração do betão de forma a eliminar os vazios de ar;

- c) Passagem de régua de madeira ou vibratória sobre a superfície permitindo a sua regularização;
- d) Afagamento mecânico sem aplicação do endurecedor para trazer a pasta à superfície;
- e) Polvilhamento manual do endurecedor de superfície de forma homogénea (normalmente num intervalo entre 4 e 6 kg/m<sup>2</sup>);
- f) Sucessivos afagamentos mecânicos, em intervalos de tempo regulares, até se atingir um acabamento liso e suave. Durante o processo de afagamento é habitual a adição de água para facilitar o afagamento;
- g) Pulverização de produto de cura ou cobertura da superfície com película de polietileno que impeça a desidratação do betão;
- h) Abertura de juntas de retracção no dia seguinte, que previnam fissurações.

Normalmente, entre os passos c) e d) é feito um compasso de espera, de forma a aplicar o endurecedor. Em obra os trabalhadores começam o passo d) quando a pegada de um trabalhador penetra cerca de 6 mm, dando indicação que o betão já endureceu o suficiente para conseguir suportar o peso dos equipamentos de afagamento.

O afagamento mecânico é feito com recurso a um “helicóptero”, um aparelho mecânico munido de pás com inclinações ajustáveis em função das condições do estado de trabalhabilidade do betão. Em betões frescos, as lâminas posicionam-se num ângulo quase horizontal, em betões mais endurecidos as lâminas apresentam maior ângulo.

Todo o processo acima descrito, com excepção do passo h), demora entre 3 a 6 horas na estação de Verão e 8 a 18 horas na estação de Inverno (Fernandes, 2012).

A aplicação do endurecedor deve ser efectuada no intervalo de tempo denominado por “tempo aberto”. Este termo é entendido como o intervalo de tempo no qual é possível aplicar o endurecedor de superfície garantindo uma adequada ligação entre endurecedor de superfície e betão de base. O “tempo aberto” vai variar em função da composição do betão de base e condições climatéricas do local.

Como já foi referido, em Portugal a construção de lajes afagadas com aplicação de endurecedor não está legislada, e como tal os endurecedores de superfície comercializados fornecem recomendações para a sua aplicação através das

respectivas fichas técnicas (como exemplos: Durochape, Sibasal, Superquartz, Prochape, Produr, ect.).

### **2.2.3. Problemas que surgem nestes pavimentos**

As imperfeições de superfície em pavimentos de betão mais comuns são: fissuração, baixa resistência à abrasão, ranhuras, poeiras, pequenas depressões, bolhas, delaminações, descoloração, baixa permeabilidade e ondulação (ACI 302.R1, 2004). Destas, as mais frequentes e relevantes para este estudo são a fissuração e a delaminação.

#### **2.2.3.1. Fissuração**

A fissuração é a imperfeição mais frequente na superfície em pavimentos de betão, sendo causada pela restrição, quer interna quer externa, da mudança de volume do betão. Esta mudança de volume está relacionada com factores como: a retracção do betão, retracção térmica e aplicação de cargas, entre outros (ACI 302.1R, 2004).

A fissuração pode ser superficial (fendilhação) tendo como causas prováveis a retracção plástica devido ao excesso de água de amassadura, segregação ou exsudação, ou utilização de inertes que absorvam demasiada água da amassadura (partículas de argila) (ACI 302.R1, 2004). A acumulação de ar e água à superfície também pode originar a formação de bolhas que posteriormente podem conduzir a fissurações superficiais.

Segundo a norma ACI 302.R1 (2004), a fissuração tanto ocorre num betão já endurecido como no mesmo betão antes de endurecer (fissuração precoce).

No primeiro caso, as fissuras ocorrem aleatoriamente em toda a espessura do pavimento, e estão fortemente relacionadas com a retracção do betão. A retracção pode ser reduzida actuando na composição do betão, i.e., reduzir a quantidade de água utilizando adjuvantes redutores de água ou agentes introdutores de ar. No entanto, estas adições têm um efeito muito pequeno na retracção, e por isso é

necessário tomar medidas complementares como (ACI 302.1R, 2004; Portland Cement Association, 1995):

- a) Executar juntas de contracção relativamente cedo, suficientemente espaçadas entre si e com profundidade adequada (1/4 ou 1/3 da espessura do pavimento);
- b) Providenciar a execução de pavimentos em betão tendo o cuidado de não restringir em demasia todo o seu perímetro;
- c) Colocar betão com as quantidades próprias de cimento e água, e que não contenham agregados ou misturas com características de elevada retracção;
- d) Aplicar uma cura adequada que favoreça a hidratação do betão;
- e) Evitar executar pavimentos em betão em bases desiguais e com espessuras diferentes;
- f) Evitar fazer reforços descontínuos nas juntas que propiciam a sua abertura.

No caso do betão antes de endurecer, as fissuras são relativamente pequenas, superficiais e aleatórias (por vezes paralelas), ocorrendo em dias de vento, baixa humidade e altas temperaturas. Podem ocorrer antes dos trabalhos de acabamento, ficando a finalização da superfície do pavimento comprometida. Neste caso temos fissuras relacionadas principalmente com a retracção plástica do betão, devido à humidade da superfície evapora mais depressa que a exsudação (ascensão da água à superfície) (ACI 302.1R, 2004) e ao excesso de água que é utilizada para a aplicação do endurecedor. Desta forma a retracção à superfície é maior que no interior do betão, ocorrendo fissuras com comprimentos que variam entre 100 mm a 1 m ou mais, paralelas ou espaçadas de 100 a 600 mm (maioritariamente de forma aleatória e irregular), e com profundidades que começam entre os 25 e 75 mm, podendo atravessar toda a espessura do pavimento (ACI 302.1R, 2004).

### **2.2.3.2. Delaminação**

Durante as operações de afagamento num pavimento de betão é susceptível o aparecimento de bolhas com diâmetros que oscilam entre os 6 e 100 mm e com profundidade na ordem dos 3 mm, deixando a superfície vulnerável à delaminação (destacamento de porções de betão) quando o betão endurece (ACI 302.1R, 2004). Apesar de serem muito semelhantes, as delaminações são muito maiores que as bolhas (National Ready Mixed Concrete Association, 2004). A delaminação está

relacionada com a presença de bolhas com ar ou água aprisionada e com a ascensão de água (exsudação) que esbarra numa superfície densificada (Figura 1). A exsudação, além de permitir a ascensão de água à superfície, pode também conduzir algum adjuvante, argilas (surgem com as areias mal lavadas) ou poeiras à superfície, criando uma barreira de adesão entre o endurecedor e o betão de base, dando origem à delaminação do endurecedor. A superfície de betão tem tendência a ficar estanque prematuramente quando esta endurece mais rapidamente que a camada inferior de betão (ACI 302.1R, 2004; National Ready Mixed Concrete Association, 2004).



Figura 1 - Esquema representativo da zona de delaminação (National Ready Mixed Concrete Association, 2004)

Para o aparecimento de bolhas e conseqüente delaminação da superfície contribui um betão viscoso, resultado de excesso de ar aprisionado ou introduzido e excesso de finos na sua composição. Um betão viscoso tende a encrostar sob condições ventosas enquanto a camada inferior mantém-se na fase plástica. Normalmente o excesso de finos é substituído por agregado britado de pequenas dimensões, sendo deste modo possível a libertação do ar durante a vibração. No entanto, se a vibração for insuficiente durante a compactação do betão, o ar aprisionado pode não ser libertado adequadamente. Por outro lado, se a vibração for em demasia a superfície pode ficar com excesso de finos o que facilita o encrostamento e o acabamento precoce (ACI 302.1R, 2004).

Deve ser tido em consideração que qualquer ferramenta para a compactação ou afagamento força o ar aprisionado e a água para a superfície, e o afagamento

aumenta a densidade da superfície (ACI 302.1R, 2004). Desta forma, o ar e a água ficam concentrados sob uma superfície densa e estanque, proporcionando a acumulação de ar ou água, ou ambos, formando bolhas (Broekmans, 2004). Estas podem aparecer em qualquer momento durante as operações de acabamento. Se não forem tomadas medidas preventivas e/ou correctivas as bolhas formadas levarão à delaminação da superfície quando o betão já endureceu (ACI 302.1R, 2004).

Para prevenir o aparecimento de bolhas e consequente delaminação da superfície de pavimentos de betão deve ser considerado o seguinte (ACI 302.1R, 2004; Broekmans, 2004; National Ready Mixed Concrete Association, 2004):

- a) Evitar o uso de betão com excessivo abaixamento, elevado conteúdo de água, ar ou finos;
- b) Utilizar um teor de cimento apropriado;
- c) Aquecer o solo antes da betonagem em climas frios, e reduzir a evaporação da superfície usando retardadores de evaporação, produtos de cura ou película de polietileno em climas quentes, secos e ventosos;
- d) Evitar colocar o pavimento de betão directamente sobre uma película de polietileno ou retardadores de vapor, executando uma camada de material granular (que não seja areia) com pelo menos 100 mm para separar o betão do retardador de vapor;
- e) Evitar trabalhar excessivamente o betão, especialmente a vibração, de modo a impedir a segregação dos materiais (agregado grosso assenta no fundo da laje enquanto o agregado fino e água ascendem à superfície) e a libertar o ar aprisionado;
- f) Não selar a superfície precocemente, ou seja, regularizar a superfície manualmente apenas quando esta suporte uma pegada com 6 mm de profundidade, ou mecanicamente quando suportar uma pegada com 3 mm de profundidade;
- g) Utilizar réguas de madeira em betão sem ar introduzido para se prevenir a densificação precoce da superfície, e réguas de magnésio ou alumínio em betão com agentes introdutores de ar
- h) Aplicar adequadas operações de acabamento em pavimentos de betão com incorporação de endurecedores de superfície;
- i) Utilizar técnicas apropriadas de acabamento e tempos apropriados durante e entre as operações de acabamento (a posição da lâmina do afagador deve ser

plana e a área de bolhas deve ser afagada imediatamente a seguir ao seu aparecimento de forma a serem eliminada e/ou unidas).

As delaminações que surjam na superfície de um pavimento em betão podem ser reparadas. Após a camada superficial ser removida e a camada interior do betão bem limpa procede-se á aplicação de uma nova superfície (National Ready Mixed Concrete Association, 2004).

É importante referir que a sobredosagem de endurecedor também pode originar delaminações entre camadas sucessivas de endurecedor e o betão de base, e factores como acessibilidades inadequadas, condições ambientais e composições de betão incorrectas podem reduzir a viabilidade do acabamento final (The Concrete Floor Contractors Association of Ontario).

### 3. TRABALHO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Materiais

Uma vez que este trabalho está enquadrado no trabalho de investigação de um projecto actualmente em curso, a selecção dos materiais para o fabrico das composições do betão de base teve em consideração os estudos anteriores de Fernandes (Fernandes, 2012) e Sequeira (Sequeira, 2012).

O trabalho experimental foi maioritariamente realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Évora. No entanto, dada a necessidade de determinado equipamento, a realização de alguns ensaios teve lugar no Laboratório de Geociências da Universidade de Évora, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e no Laboratório da Britobetão.

##### 3.1.1. Cimento

Para o fabrico do betão de base foi usado o cimento mais utilizado na execução de pavimentos em betão: o cimento Portland CEM II/A-L 42,5R.

Segundo o fabricante, a sua composição varia entre 80% a 94% de clínquer Portland, 6% a 20% de calcário e 0% a 5% de outros constituintes.

As características químicas, mecânicas e físicas deste cimento são apresentadas nas Tabelas 3 – 5 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3 - Análise química do cimento CEM II/A-L 42,5R

| Componentes       |   |                                | Mensal | Anual |
|-------------------|---|--------------------------------|--------|-------|
| Perda ao fogo     | % | P.F.                           | 7,64   | 7,38  |
| Resíduo insolúvel | % | R.I.                           | 1,18   | 1,34  |
| Óxido de silício  | % | SiO <sub>2</sub>               | 16,36  | 17,56 |
| Óxido de alumínio | % | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,40   | 4,00  |
| Óxido de ferro    | % | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,81   | 3,03  |
| Óxido de cálcio   | % | CaO                            | 60,84  | 60,95 |
| Óxido de magnésio | % | MgO                            | 0,95   | 1,35  |
| Sulfatos          | % | SO <sub>3</sub>                | 2,69   | 2,92  |
| Cloretos          | % | Cl <sup>-</sup>                | 0,09   | 0,06  |
| Cal Livre         | % | -                              | 1,89   | 1,24  |

Tabela 4 - Ensaio mecânicos do cimento CEM II/A-L 42,5R

| Idade   | Resistência mecânica (MPa)<br>[NP EN 196-1] |       |            |       |
|---------|---|-------|------------|-------|
|         | Flexão                                      |       | Compressão |       |
|         | Mensal                                      | Anual | Mensal     | Anual |
| 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  |

Tabela 5 - Ensaio físicos do cimento CEM II/A-L 42,5R

| Ensaio   | Mensal | Anual |     |
|--|--------|-------|-----|
| Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )                               | 3,05   | 3,05  |     |
| Resíduo de Peneiração (%)  | 45 µm  | 5,5   | 4,7 |
| Superfície Especifica de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) [NP EN 196-6] | 4634   | 4999  |     |
| Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]                             | 28,2   | 27,8  |     |
| Tempo de Presa (min)<br>[NP EN 196-3]                              | Início | 98    | 99  |
|  | Fim    | 134   | 131 |
| Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]                                 | 0,6    | 0,6   |     |

### 3.1.2. Agregados

#### Areia fina

A areia utilizada no fabrico do betão de base é do tipo rolado, basicamente composta por sílica, com dimensões entre 0,075 mm e 1,18 mm, módulo de finura de 1,81 e massa volúmica igual a 2620 kg/m<sup>3</sup>.

Na Figura 2 é ilustrada a sua curva granulométrica.

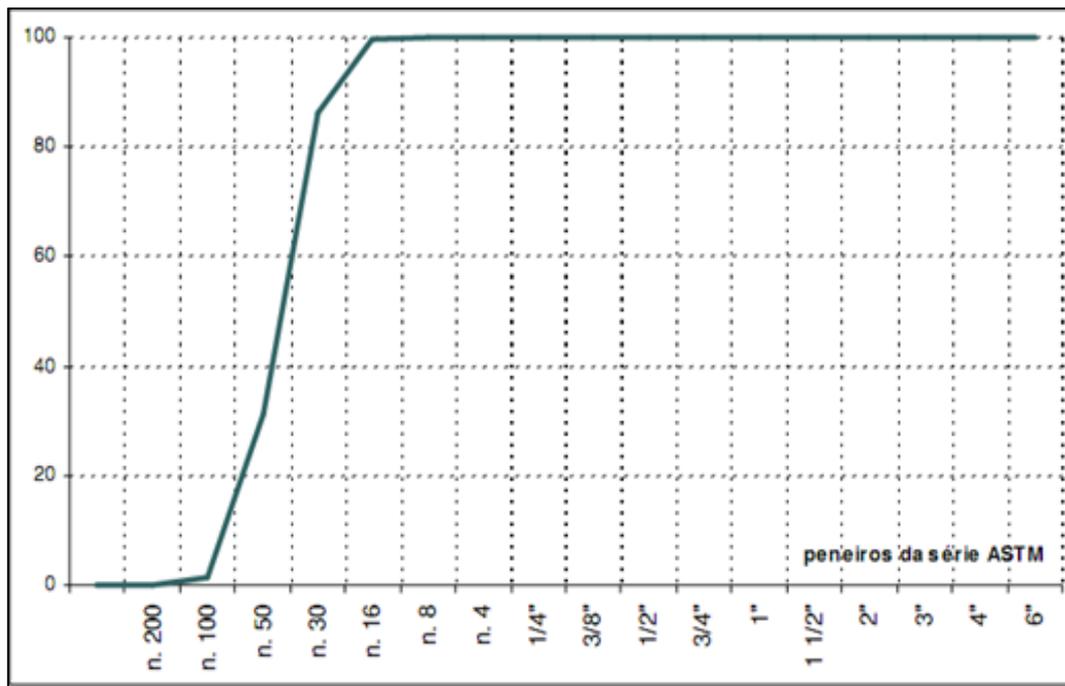


Figura 2 - Curva granulométrica da areia fina (Dados fornecidos pelo fabricante)

As percentagens de absorção de água e de humidade da areia são de 0,0% e 0,11%, respectivamente. A absorção da areia foi determinada em anteriores trabalhos e a humidade é referente à data da amassadura.

### Britas

No fabrico do betão de base foram utilizadas dois tipos de britas, Brita 1 e Brita2.

Ambas são britas graníticas, apenas diferindo na dimensão do grão. A Brita 1 apresenta dimensões entre os 2,36 mm e os 19 mm, módulo de finura de 6,35 e massa volúmica igual a  $2650 \text{ kg/m}^3$ . A Brita 2 tem dimensões que variam entre 6,30 mm e 25 mm, um módulo de finura igual a 7,22 e massa volúmica de  $2680 \text{ kg/m}^3$ .

As Figuras 3 e 4 representam as curvas granulométricas de cada uma das britas.

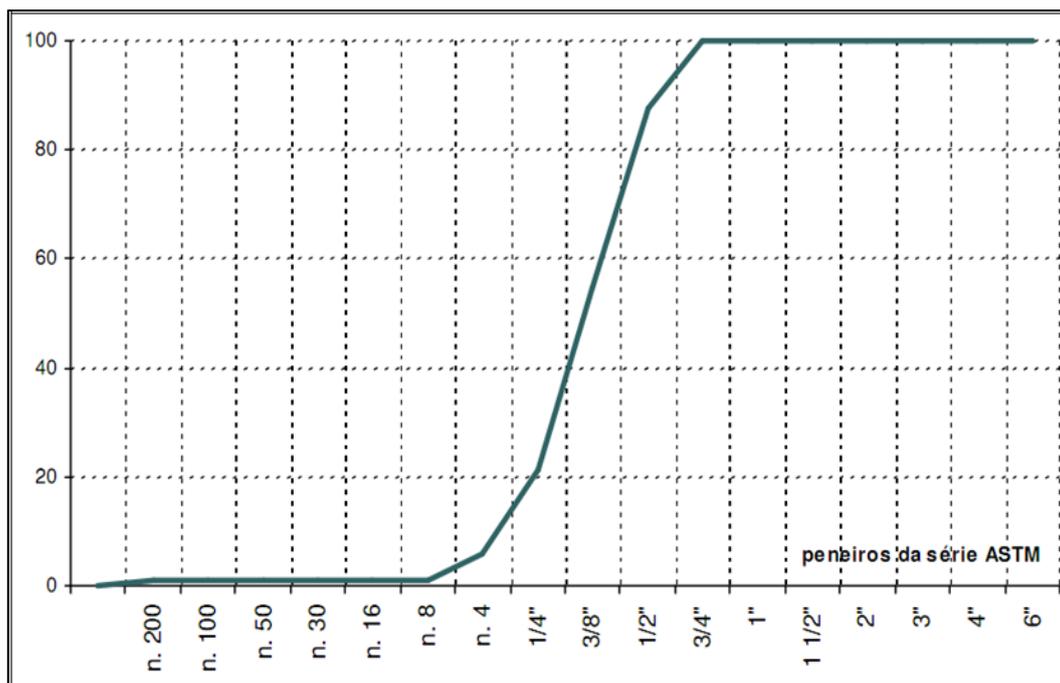


Figura 3 - Curva granulométrica da Brita 1 (Dados fornecidos pelo fabricante)

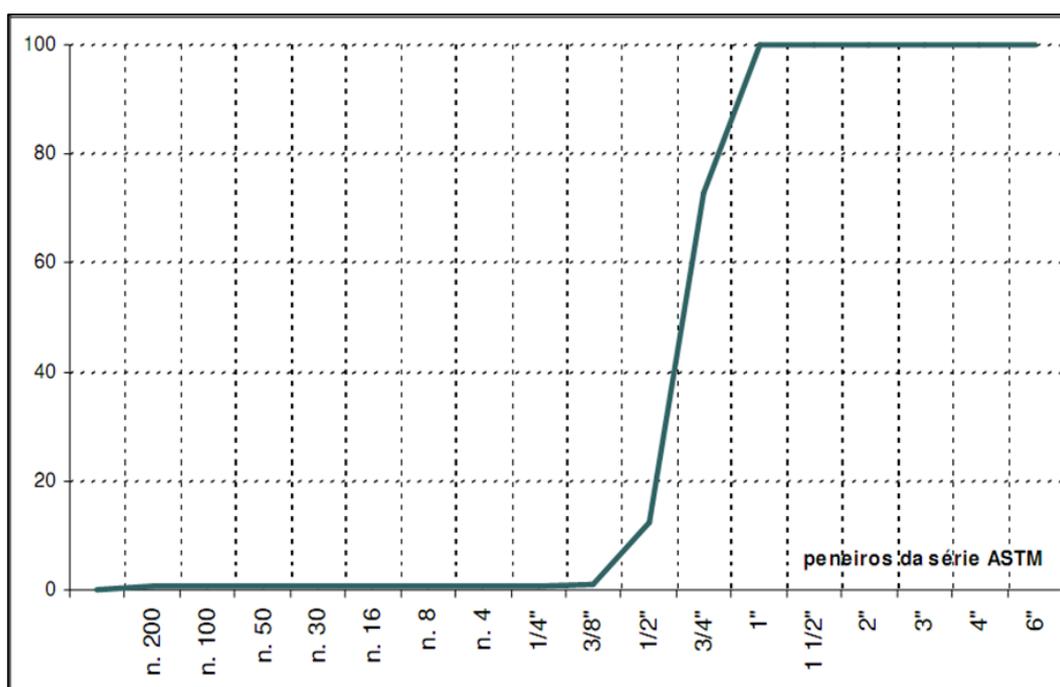


Figura 4 - Curva granulométrica da Brita 2 (Dados fornecidos pelo fabricante)

A percentagem de humidade da Brita 1 é de 0,28% enquanto a da Brita 2 é 0,23%. A percentagem de absorção de água é de 0,60% para ambas as britas. A humidade é referente à data da amassadura e a absorção de água foi determinada em trabalhos anteriores.

Os dados relativos às análises granulométricas dos agregados podem ser consultados sob a forma de tabelas nos Anexos A, B e C, respectivamente, para a areia, brita 1 e brita 2.

### **3.1.3. Água**

A água utilizada em todas as amassaduras foi proveniente da rede pública de abastecimento da Herdade da Mitra. Face à normalização actual da água de amassadura para betão – NP EN 1008: 2003, esta água é classificada como água potável. Sendo esta água potável, não tendo cheiro, sabor ou coloração foi considerada apta para o fabrico de betão. Ainda assim, não foi caracterizada por não se considerar relevante a contribuição das características da água utilizada para este trabalho.

### **3.1.4. Adjuvantes**

Foram consideradas duas composições para o betão de base que apenas diferem no tipo de adjuvante utilizado.

A primeira composição ensaiada utilizou um adjuvante plastificante, redutor de água, e a segunda, um adjuvante superplastificante, forte redutor de água. De forma a evitar a referência a marcas comerciais, passar-se-á apenas a utilizar as notações P e SP respectivamente, para se referir a cada um dos adjuvantes.

Os adjuvantes redutores de água são produtos incorporados no betão em quantidades inferiores a 5% do peso do cimento. Tendo como principal função reduzir a quantidade de água no betão (entre 5 a 10% e por vezes até mais que 15%), permitem a redução da razão A/C de forma a obter um betão com trabalhabilidade pretendida ou por outro lado, melhoram a trabalhabilidade de um betão com uma dada razão A/C.

De acordo com o respectivo fabricante, o adjuvante P é um produto incorporado no betão em quantidades que podem variar entre 0,5% e 1,2% do peso, consoante a consistência e redução de água desejados. Este adjuvante plastificante/redutor de

água facilita a colocação do betão em obra e diminui a porosidade do betão contribuindo para o aumento da sua durabilidade.

O adjuvante SP, segundo o seu fabricante, é um adjuvante superplastificante/forte redutor de água, sendo correntemente adicionado ao betão em dosagens entre 0,5% e 1,5%, conforme o objectivo pretendido. A alta redução de água que este adjuvante proporciona, permite obter betões com elevadas resistências mecânicas e permeabilidade baixa, melhorando ao mesmo tempo a trabalhabilidade do betão

### **3.1.5. Endurecedores de superfície**

Sendo o objectivo da dissertação a avaliação do comportamento de diferentes endurecedores de superfície consoante o agregado mineral presente na sua composição e respectiva constituição do agregado, foram escolhidos aleatoriamente cinco endurecedores de superfície comercializados em Portugal: dois de basalto (B1 e B2), dois de quartzo (Q1 e Q2) e um de corindo (C). Os dados dos endurecedores a seguir apresentados foram fornecidos pelos fabricantes.

O endurecedor B1 é constituído por uma mistura homogénea de basalto, areia siliciosa, e cimento Portland tipo I e classe 42,5. A sua aplicação tem um consumo médio de 5 a 7 kg/m<sup>2</sup>.

No que diz respeito ao endurecedor B2, a sua composição é baseada em agregados minerais de basalto calibrados e cimento Portland. Apresenta um consumo médio entre 3 a 6 kg/m<sup>2</sup>.

O endurecedor Q1 é composto por uma mistura homogénea de cristais de quartzo, aos quais é adicionado cimento Portland do tipo I e classe 42,5. Tem um consumo médio entre 4 a 6 kg/m<sup>2</sup>.

O Q2 é composto à base de cimento de alta resistência e de granulados de quartzo. Apresenta um consumo médio de 4 kg/m<sup>2</sup> para aplicação manual.

O endurecedor C é produzido à base de cimento de elevada resistência, de granulados minerais e de corindo com granulometria seleccionada, tendo como consumo médio 4 kg/m<sup>2</sup> quando a aplicação é manual.

## **3.2. Metodologia**

Uma vez seleccionados os materiais, foram definidos e acertados os procedimentos e técnicas a adoptar para a realização do trabalho experimental.

O procedimento geral para a realização do trabalho experimental passa pela caracterização dos endurecedores, pelo fabrico de lajetas de betão com posterior aplicação de endurecedor de superfície num determinado estado de presa do betão, seguida da realização de ensaios para a caracterização do comportamento da ligação endurecedor-betão.

### **3.2.1. Granulometria dos endurecedores**

Para a caracterização dos endurecedores a aplicar nas lajetas de betão, foram determinadas as granulometrias de cada endurecedor seguindo o método da peneiração. Estes ensaios foram feitos segundo a norma NP EN 933-1: 2000 e tiveram lugar no Laboratório de Geociências da Universidade de Évora.

O ensaio consistiu na separação, por meio de um conjunto de peneiros, de cada endurecedor em diversas classes granulométricas de granulometria decrescente. O método adoptado foi o da peneiração a seco, uma vez que a lavagem alteraria as características físicas do endurecedor (o cimento iria hidratar). A dimensão das aberturas e o número de peneiros foram seleccionados de acordo com a natureza dos endurecedores e a precisão exigida. Desta forma, utilizaram-se os peneiros com as aberturas de 4 mm, 2 mm, 1mm, 0,50 mm e 0,250 mm. Além destes utensílios foram também utilizados: uma tampa e recipiente do fundo adaptados aos peneiros, uma estufa ventilada controlada por termostato de modo a manter a temperatura a  $(110 \pm 5)$  °C, uma balança com precisão de  $\pm 0,1\%$  da massa do provete, tabuleiros e escovas, um exsiccador e um agitador mecânico.

A massa de cada provete foi de 0,205 kg uma vez que a máxima dimensão do agregado para agregados de densidade compreendida entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  e  $3000 \text{ kg/m}^3$  era inferior ou igual a 4 mm. Os provetes foram secos em estufa a uma temperatura de  $(110 \pm 5)$  °C por um período aproximado de 24 horas, deixados arrefecer no exsiccador, pesados e registadas as respectivas massas.

Na fase da peneiração, cada endurecedor foi despejado a seco na coluna de peneiros, previamente dispostos no agitador mecânico (Figura 5), de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas, com o fundo e a tampa. O agitador mecânico operou em períodos de 10 minutos para cada endurecedor. Terminada a peneiração, os peneiros foram retirados um a um, começando pelo de maior abertura. O material retido em cada peneiro e o retido no fundo foi transferido para gobelés que posteriormente foram pesados e suas massas registadas.



**Figura 5 - Coluna de peneiros disposta no agitador mecânico**

Por fim, foram calculadas a massa retida em cada peneiro, como percentagem da massa original seca, e a percentagem cumulativa da massa original seca que passa através de cada peneiro até ao fundo.

As Figuras 6 – 10 apresentam cada endurecedor dividido nas diferentes fracções, ilustrando com mais pormenor as respectivas granulometrias obtidas.



Figura 6 - Granulometria do endurecedor B1



Figura 7 - Granulometria do endurecedor B2

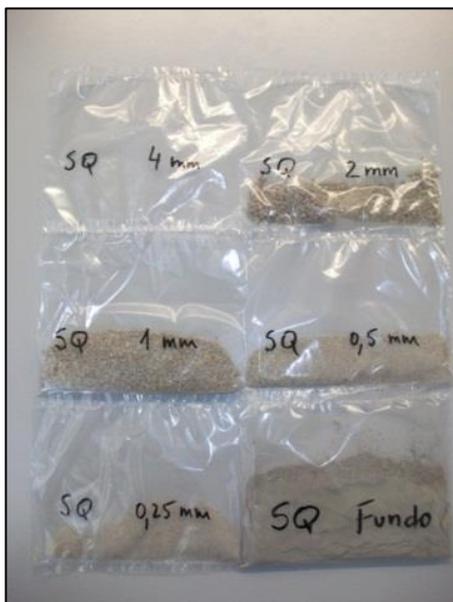


Figura 8 - Granulometria do endurecedor Q1



Figura 9 - Granulometria do endurecedor Q2

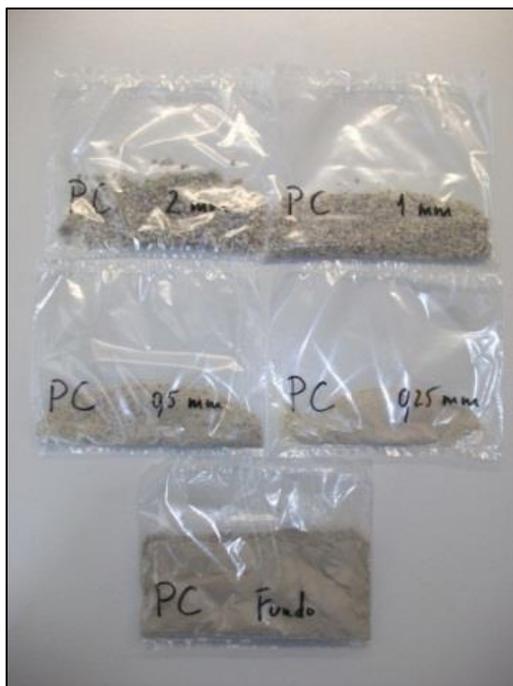


Figura 10 - Granulometria do endurecedor C

A Figura 11 ilustra as curvas granulométricas obtidas para cada endurecedor.

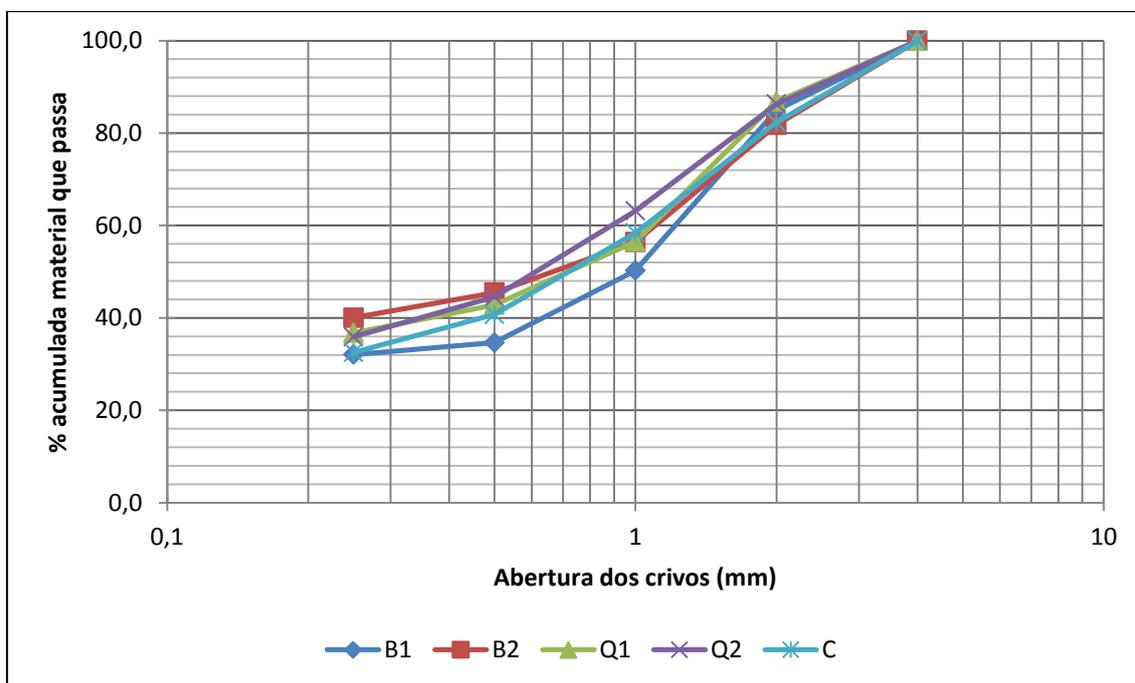


Figura 11 - Curvas granulométricas dos endurecedores de superfície

Abaixo dos 0,250 mm não foram determinadas as granulometrias.

Os endurecedores são bastante semelhantes no que diz respeito às dimensões dos agregados existentes na sua composição, havendo uma maior diferença, ainda que pouco significativa, no endurecedor B1. Todos os endurecedores apresentam granulometrias entre 30 e 40% para o peneiro de 0,250 mm e granulometrias entre 80 e 90% para o peneiro de 2 mm. Para o peneiro de 0,50 mm, o endurecedor B1 apresenta uma proporção de cerca de 35%, enquanto os outros endurecedores se situam entre os 40 e 50%. No peneiro de 1 mm, todos os endurecedores têm uma percentagem acumulada entre 55 e 65%, enquanto o B1 tem 50%.

De uma forma geral, verifica-se que todos os endurecedores têm uma máxima dimensão dos grãos de cerca de 2 mm, e de igual modo apresentam percentagem de finos muito semelhantes. Contudo, os endurecedores B2 e C são os que retêm uma maior percentagem no peneiro de 2 mm. O endurecedor com maior percentagem de finos é também o endurecedor B2. Relativamente ao material mais grosseiro que compõe cada um dos endurecedores, estes podem ser ordenados, desde o que contém maior percentagem de material retido no peneiro de 2 mm para o que contém menor percentagem: B2, C, B1, Q2, Q1. No anexo D, podem ser consultados sob a forma de tabela os valores referentes à análise granulométrica dos endurecedores.

Com o intuito de se conhecer um pouco mais os constituintes de cada endurecedor, e em especial o tipo de cimento presente nas suas composições, foram enviadas amostras da fracção fina de cada endurecedor para o LNEC, para se determinar a massa volúmica, a perda ao fogo e o resíduo insolúvel (ver ponto 4.1.). É importante referir que as amostras enviadas para o LNEC remetem para todo o material passado no peneiro de 0,250 mm, e por isso podem conter outros componentes, além do ligante que constitui cada endurecedor. A parte referente ao ligante fica abaixo do peneiro de 0,100 mm, logo existirá agregado entre os peneiros de 0,250 e 0,100 mm.

As amostras foram preparadas segundo as normas NP EN 933-1: 2000 e NP EN 196-7: 2008, tendo sido enviados cerca de 1,200 kg da fracção fina de cada endurecedor (Figura 12).



**Figura 12 - Amostra da fracção fina dos endurecedores enviados para o LNEC**

### 3.2.2. Fabrico do betão de base

Para o fabrico das lajetas necessárias para o trabalho experimental começou-se por definir a composição do betão de base, a qual é apresentada na Tabela 6. Esta composição de base foi seleccionada tendo em consideração composições utilizadas por determinadas empresas no fabrico de pavimentos em betão com áreas muito extensas, e com posterior aplicação de endurecedores de superfície. Além disso, esta foi a composição também considerada na realização dos trabalhos de investigação já referenciados no âmbito do projecto de investigação financiado pela FCT, o que possibilita comparações entre os estudos, contribuindo para o objectivo do projecto.

Tabela 6- Composição do betão de base de referência

|  |     |
|--|-----|
| <b>Classe de consistência</b>                | S3  |
| <b>Brita 1 (kg/m<sup>3</sup>)</b>            | 558 |
| <b>Brita 2 (kg/m<sup>3</sup>)</b>            | 556 |
| <b>Areia Fina (kg/m<sup>3</sup>)</b>         | 730 |
| <b>Água (kg/m<sup>3</sup>)</b>               | 170 |
| <b>Cimento CEM II/A-L (kg/m<sup>3</sup>)</b> | 340 |
| <b>A/C</b>                                   | 0,5 |

Tendo como referência, tanto a composição acima como a massa volúmica de cada constituinte (Tabela 7), e devido à incorporação de cada adjuvante, foram efectuados pequenos ajustes na razão A/L procurando mantê-la entre 0,4 e 0,6, de forma a se obter a mesma trabalhabilidade no betão em todas as situações e assegurar a classe de consistência pretendida (S3 de acordo com a NP EN 206-1: 2007). Foi adoptada a classe de consistência S3 visto ser esta a classe adequada para pavimentos em betão, tal como foi a classe tida em consideração tanto nas empresas como nos estudos anteriormente referidos.

Tabela 7 - Massa volúmica dos constituintes do betão de base

|  |      |
|--|------|
| <b>Brita 1 (kg/m<sup>3</sup>)</b>      | 2650 |
| <b>Brita 2 (kg/m<sup>3</sup>)</b>      | 2680 |
| <b>Areia (kg/m<sup>3</sup>)</b>        | 2620 |
| <b>Água (kg/m<sup>3</sup>)</b>         | 1000 |
| <b>Cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>      | 3050 |
| <b>Adjuvante P (kg/m<sup>3</sup>)</b>  | 1180 |
| <b>Adjuvante SP (kg/m<sup>3</sup>)</b> | 1080 |

Tabela 8 - Composições dos betões de base

| Classe de consistência S3   |                              |                              |                                 |                           |                              |      |                                |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------|------|--------------------------------|
| Composição base + adjuvante | Brita 2 (kg/m <sup>3</sup> ) | Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> ) | Areia Fina (kg/m <sup>3</sup> ) | Água (kg/m <sup>3</sup> ) | Cimento (kg/m <sup>3</sup> ) | A/C  | Adjuvante (kg/m <sup>3</sup> ) |
| <b>P</b>                    | 567                          | 569                          | 745                             | 173                       | 347                          | 0,50 | 2,79                           |
| <b>SP</b>                   | 583                          | 585                          | 766                             | 150                       | 357                          | 0,42 | 2,50                           |

As quantidades dos adjuvantes utilizadas tiveram em consideração as especificações dos fabricantes.

Com base nos valores da Tabela 8 calculou-se a massa volúmica teórica do betão de base (Tabela 9).

Tabela 9 - Massa volúmica teórica para cada composição de betão de base

| Classe de consistência S3 |                        |
|---------------------------|------------------------|
| Composição base + P       | 2404 kg/m <sup>3</sup> |
| Composição base + SP      | 2443 kg/m <sup>3</sup> |

O procedimento preconizado para o fabrico do betão de base seguiu sempre o mesmo protocolo.

Uma vez que os trabalhos para o fabrico de betão se iniciavam por volta das 9 horas, e de forma a evitar atrasos no seu início, a pesagem dos materiais foi sempre realizada no dia anterior com excepção do cimento, água e adjuvante.

Antes de pesar o cimento, a água e o adjuvante, a temperatura e humidade do ambiente do laboratório eram registadas, e colocaram-se a betoneira e o carro de mão no local para a realização da amassadura. Depois foi efectuada a pesagem do cimento, água e adjuvante, sendo este material juntamente com o previamente pesado colocado junto da betoneira (Figura 13Figura 13).



**Figura 13 - Materiais preparados para o fabrico do betão**

Em seguida, o material foi colocado de forma faseada na betoneira de acordo com a dimensão do agregado, i.e., do mais grosseiro para o mais fino. Em primeiro lugar era colocado um balde de brita 2, outro de brita 1, outro de areia fina e um de cimento. Juntou-se um pouco de água e deixou-se amassar por um período relativamente curto. Este processo repetiu-se até não haver mais do material acima mencionado, com exceção da água, em que se teve o cuidado de se juntar apenas cerca de 70% de água total da amassadura. Quando a amassadura apresentava um aspecto relativamente homogéneo, era adicionado o adjuvante (já com o cimento todo hidratado) e passados uns segundos, juntava-se a restante água e deixava-se amassar entre 1 e 2 minutos. Toda a operação do fabrico de betão demorou cerca de 4 minutos (Figura 14Figura 14).



**Figura 14 - Mistura dos materiais para o fabrico do betão**

### 3.2.3. Preparação dos moldes e cofragens

Em primeiro lugar foram preparados os moldes para as lajetas com as dimensões de 60x30x10 cm<sup>3</sup> (Figura 15). Os quais foram devidamente limpos, e o silicone aplicado nas juntas entre a madeira e a chapa metálica, de forma a prevenir a perda de água da amassadura ou mesmo betão. Os moldes cúbicos, quer para o ensaio de resistência à compressão quer para o ensaio da resistência à penetração, também foram devidamente limpos. Depois, todos estes moldes foram colocados nos seus devidos lugares (Figura 32) e impregnados com produto descofrante, prontos a receber o betão.



Figura 15 - Moldes para cofragem das lajetas

### 3.2.4. Consistência do betão de base

Após a execução da amassadura, foi necessário confirmar que todas as composições eram S3. Para tal, foi realizado o ensaio de abaixamento de acordo com a norma NP EN 12350-2: 2009, que especifica um método para determinar a consistência do betão fresco.

Uma classe de consistência S3 tem de apresentar um abaixamento entre 100 mm a 150 mm, com uma tolerância de 30 mm (NP EN 206-1, 2007).

O princípio deste ensaio consiste na compactação do betão fresco num molde com forma troncocónica. Quando o molde é removido, subindo-o, o abaixamento do betão estabelece a medida de consistência.

Antes do fabrico do betão todo o material necessário à realização deste ensaio foi previamente preparado e colocado num local pré-determinado.

Após o fabrico do betão, este foi despejado no carro de mão e levado até junto do material para o ensaio de abaixamento. De imediato, mediu-se a temperatura do betão e iniciaram-se os procedimentos para o ensaio de abaixamento.

Em primeiro lugar, foi humedecida a placa e o molde, sendo este colocado sobre a placa. Em seguida encheu-se o molde, mantendo-o fixo contra a placa com os pés sobre as abas.

O molde foi enchido em três camadas, cada uma com cerca de um terço da sua altura quando compactado. Cada camada foi compactada com 25 pancadas através do varão de compactação, distribuídas uniformemente sobre a sua secção transversal. Para a camada do fundo foi necessário inclinar ligeiramente o varão e dar aproximadamente metade das pancadas em espiral até ao centro. A segunda camada e a camada do topo foram compactadas em toda a sua espessura, de forma que o varão penetrasse no interior da camada imediatamente adjacente. No preenchimento e compactação da camada do topo, o betão foi amontoado acima do molde antes da compactação (Figura 16Figura 16).



Figura 16 - Colocação (a) e compactação (b) da camada de fundo

Depois da camada de topo ter sido compactada, a superfície de betão foi rasada através de movimentos de rolamento com o varão de compactação, e o excesso de betão na placa removido. Após este processo, e retirados os pés das abas, o molde foi subido cuidadosamente na vertical durante um intervalo de tempo entre 2 e 5 segundos, procurando não transmitir movimentos laterais ou torsionais ao betão (Figura 17/Figura 17).



**Figura 17 - Remoção do molde**

Imediatamente após a remoção do molde, o abaixamento foi medido e registado, sendo determinada a diferença entre a altura do molde e o ponto mais alto do provete que assentou (Figura 18/Figura 18).



**Figura 18 - Medição do abaixamento obtido**

Este ensaio permite verificar o abaixamento pretendido (S3), de forma a construir lajetas com características similares que possibilitem a produção de resultados equiparáveis.

### 3.2.5. Resistência à penetração

Concluído o ensaio de consistência, o betão foi preparado para o ensaio de determinação das resistências à penetração, colocado nas lajetas e colocado nos cubos para determinação da resistência à compressão.

A preparação da composição utilizada na determinação das resistências à penetração foi efectuada segundo a norma NP 1387: 2008. A partir do valor da resistência à penetração e com base na norma atrás mencionada é possível determinar o início e o fim de presa do betão.

O processo do ensaio consiste na medição dos tempos decorridos entre o início da amassadura do betão e os instantes em que a sua argamassa obtida por peneiração atinge dois estados convencionais de endurecimento, caracterizados por determinados valores da resistência oferecida à penetração de agulhas normalizadas.

De acordo com a norma NP 1387 (2008), o início de presa é definido como o instante em que a resistência à penetração atinge o valor de 3,5 MPa e o fim de presa o instante em que se atinge o valor de 27,6 MPa.

A partir dos trabalhos de investigação já mencionados, verificou-se que os primeiros problemas de aderência do endurecedor ao betão de base surgiam a partir do instante em que a resistência à penetração era superior a 8,5 MPa. Com base nesta informação estabeleceu-se que os endurecedores seriam aplicados neste mesmo instante e 45 minutos após o mesmo. Motivo pelo qual é realizado este ensaio.

Antes da realização do ensaio, preparou-se todo o material necessário: os moldes cúbicos com 10 cm de aresta foram limpos e impregnados com descofrante e preparou-se um recipiente não absorvente nem atacável pelos componentes do betão, onde este foi peneirado com um crivo com abertura nominal de 5 mm de forma a separar os inertes mais grosseiros que fazem parte do betão, e obter apenas a parte argamassada (Figura 19). Uma vez que os agregados grossos poderiam intervir de uma forma errónea na penetração das agulhas.



Figura 19 - Crivagem do betão de base

É a partir desta argamassa, que foi determinado o início e o fim de presa. A argamassa obtida foi amassada com uma colher e os moldes cúbicos foram enchidos (Figura 20). Com a colher foram distribuídas pancadas uniformemente, penetrando o betão mas sem se tocar no fundo do molde. A seguir, foram dadas pancadas leves nas paredes do molde até os furos provocados pela colher ficarem preenchidos e a superfície nivelada.



Figura 20 - Peneiração do betão (a) e colocação da argamassa (b) obtida nos moldes de 10 cm de aresta

Este processo foi realizado para dois moldes cúbicos para cada lajeta, ou seja, em cada ensaio foi necessário encher 4 moldes cúbicos.

Neste ensaio utilizou-se um aparelho para medição da resistência do betão à penetração, constituído por um mecanismo de molas que exerce, sobre uma agulha, forças até, pelo menos, 1000 N. A série de agulhas utilizadas são cilíndricas e apresentam extremidades normais ao eixo, planas, circulares e com as seguintes áreas: 16 mm<sup>2</sup>, 32 mm<sup>2</sup>, 65 mm<sup>2</sup>, 163 mm<sup>2</sup>, 320 mm<sup>2</sup> e 638 mm<sup>2</sup> (Figura 21).



**Figura 21 - Aparelho para penetração e respectiva série de agulhas**

Para a realização da penetração do betão, foi montada no aparelho uma agulha de secção adequada ao estado de endurecimento do provete. Foi utilizada pela primeira vez a agulha com maior secção, decrescendo a secção das agulhas seguintes consoante o estado de endurecimento verificado. De seguida, ajustou-se a posição do aparelho de modo a fazer contactar a ponta da agulha com a superfície do provete. Depois, foi aplicada uma força na vertical fazendo a agulha penetrar no provete até ao traço de referência em cerca de 10 segundos e sem aceleração (Figura 22). Por fim, foi registado o valor da força aplicada, a secção da agulha utilizada e o tempo decorrido desde o início da amassadura do betão.



**Figura 22 - Realização de ensaio de penetração**

Esta operação foi executada nos provetes previamente colocados em frente das lajetas e cobertos com os túneis (ver ponto 3.2.8.), e realizada em pontos da superfície do provete que não se situavam a menos de 2,5 cm das paredes do molde, nem tinham sido afectados por ensaios anteriores (Figura 23). A necessidade de maior número de moldes com 10 cm<sup>3</sup> deveu-se à diminuta área da sua superfície, essencial para a penetração da série de agulhas.



**Figura 23 - Provetes evidenciando as diferentes secções das agulhas após a realização dos ensaios de penetração**

Os intervalos de tempo entre os sucessivos ensaios de penetração efectuados sobre o provete deveriam ser tanto quanto possível uniformes de modo a permitir o traçado de uma curva relacionando o tempo decorrido com os valores da resistência à penetração. No entanto, dada a preocupação da obtenção do valor de 8,5 MPa, os intervalos de tempo nem sempre foram muito semelhantes.

### **3.2.6. Colocação do betão de base na cofragem**

Simultaneamente, o betão foi colocado nas lajetas até sensivelmente à altura da cofragem (10 cm) e vibrado para que as suas partículas dispersassem de forma homogénea, facilitando o seu adensamento, e permitindo a expulsão do ar em excesso. De vez em quando adicionou-se mais betão em simultâneo com a vibração até se perfazer os 10 cm. A seguir a superfície foi regularizada (Figura 24 Figura 24).



**Figura 24 - Colocação (a), vibração (b) e regularização (c) da superfície do betão**

### 3.2.7. Preparação dos cubos de 15 cm de aresta para determinação da resistência à compressão

Os cubos para a determinação das resistências à compressão foram feitos de acordo com a norma NP EN 12390-2: 2009. Após o fabrico do betão, este foi colocado em moldes cúbicos com 15 cm de aresta previamente impregnados com produto descofrante. Foi tido o cuidado de se encher o molde de forma que a espessura da camada de betão depois de compactada excedesse a altura do provete entre 10% a 20%. A compactação do betão foi feita usando um vibrador de agulha durante o tempo mínimo necessário, evitando-se vibrar excessivamente de forma a não perder o ar introduzido no betão (Figura 25/Figura 25).



Figura 25 -Vibração do betão com auxílio de agulha vibratória

O betão excedente acima do bordo superior do molde foi removido utilizando uma colher de aço e a superfície nivelada com cuidado. Depois de concluídas estas operações, os provetes foram deixados cerca de 24 h nos moldes protegidos de choques, vibrações ou desidratação à temperatura de  $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$  (Figura 26/Figura 26).



Figura 26 - Série de provetes preparados

Após a remoção do molde, os provetes foram curados até imediatamente antes do ensaio, em água à temperatura de  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e com circulação de água (Figura 27). Os provetes cúbicos permaneceram dentro de água até aos dias estabelecidos para o teste de resistência à compressão.



**Figura 27 - Provetes mergulhados no tanque de água**

Nos dias determinados para o ensaio, os provetes foram retirados da água e ensaiados à resistência à compressão (ver ponto 3.2.10.), utilizando a máquina de resistência à compressão da marca Form+Test Prüfsysteme, modelo Alpha 3 (Figura 28).



**Figura 28 - Máquina de resistência à compressão**

Ao todo foram feitos 6 provetes (Figura 29Figura 29).

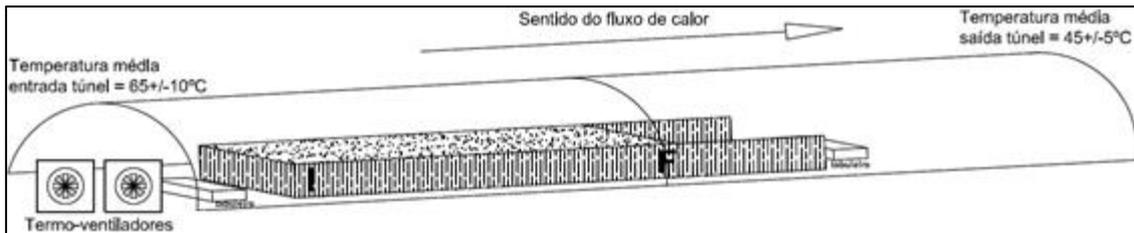


Figura 29 - Provetes cúbicos de 15 cm de aresta

### 3.2.8. Posicionamento das lajetas, cubos de 10 cm de aresta e tabuleiros com água no interior dos túneis

Para simular as condições extremas de vento e calor, ou seja, condições adversas onde ocorrem a maioria dos problemas, foram utilizados túneis onde numa das extremidades foram colocados sistemas de termo-ventilação e no seu interior foram colocadas as lajetas de betão e os provetes cúbicos de 10 cm de aresta para o ensaio de resistência à penetração (Figura 30Figura 30). Desta forma, as lajetas foram submetidas a um ambiente agressivo mais controlado, proporcionando a obtenção de elevadas temperaturas e homogeneidade de resultados.

Foi considerado o início do túnel, a extremidade onde foi colocado o sistema de termo-ventilação e o final do túnel a extremidade oposta. Após a descofragem, as lajetas foram marcadas com um I na extremidade mais exposta ao sistema de termo-ventilação e com um F na extremidade menos exposta.



**Figura 30 - Pormenor do sistema para simulação do processo de cura de pavimentos de betão sob condições extremas**

Para controlar as temperaturas foram feitas medições nos dois túneis, em ambas as extremidades, e uma vez que havia apenas dois termómetros disponíveis, estes foram colocados em intervalos de tempo semelhantes, quer no início quer no fim dos túneis (Figura 31), com o intuito de comparar as temperaturas em cada ensaio (ver ponto 4.2.2.).



**Figura 31 - Termómetros para registo de temperaturas em cada túnel**

De forma a determinar a taxa de evaporação da água no betão foram colocados tabuleiros (com área conhecida e previamente pesados) com 1 litro de água em cada extremidade do túnel (Figura 32). Assim, no fim de cada ensaio foi possível contabilizar a água evaporada dos tabuleiros e aferir a água evaporada do betão.



**Figura 32 - Forma de colocação da lajeta, dos cubos de 10 cm de aresta e dos tabuleiros com água**

Como é possível verificar na Figura 31, os túneis são ligeiramente diferentes. Deste modo convém referir que o túnel 1 mede 3 m e é formado por um semicírculo mais pequeno relativamente ao do outro túnel. O túnel 2 mede 2,5 m, sendo o círculo mais amplo em relação ao túnel anterior. Estas diferenças são patentes na Figura 33.

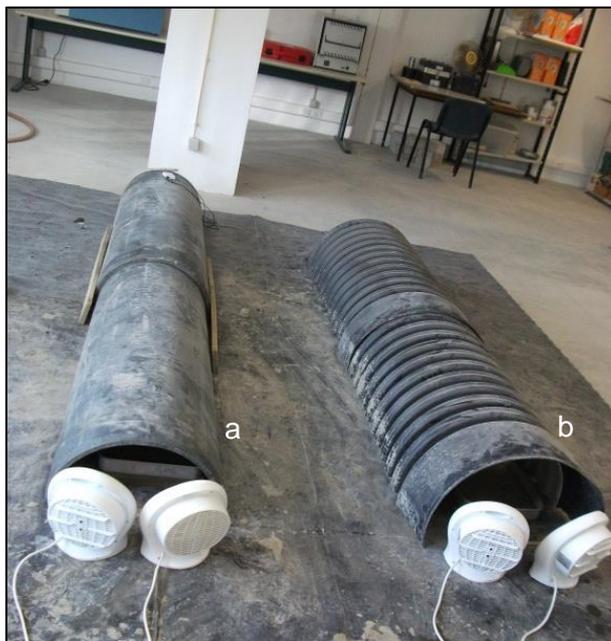


Figura 33 - Túnel 1 (a) e túnel 2 (b)

### 3.2.9. Aplicação do endurecedor

Em intervalos mais ou menos idênticos, os túneis foram levantados e realizou-se ensaio de resistência à penetração de forma a controlar o estado de presa até se atingir o valor de 8,5 MPa (Figura 22).

Depois da obtenção do valor de 8,5 MPa numa lajeta, foi aplicado o endurecedor e iniciaram-se os trabalhos de afagamento. Na outra lajeta, o endurecedor foi aplicado 45 minutos após a obtenção dos 8,5 MPa, seguido do respectivo afagamento.

A aplicação do endurecedor foi realizada de acordo com as práticas correntes em obras em Portugal, humedecendo ou salpicando a superfície do betão de base e o próprio endurecedor sempre que se achava conveniente, para uma maior adesão entre o betão de base e o endurecedor. Este processo de aplicação de endurecedor

geralmente utilizado em Portugal também teve em consideração informações das empresas e dos estudos anteriormente mencionados.

A quantidade de endurecedor para aplicar sobre as lajetas de betão tem como referência a dosagem que actualmente é aplicada na maioria das obras em Portugal. Desta forma, considerou-se  $4 \text{ kg/m}^2$  para todos os endurecedores, contribuindo para um leque de resultados equiparáveis. A determinação da quantidade adoptada para aplicar na superfície das lajetas de betão é calculada através da interpolação linear, tendo como base a dosagem de  $4 \text{ kg/m}^2$  e a área da lajeta ( $0,30 \times 0,60 \times 0,10 \text{ m}^3$ ), onde se obtém a dosagem de  $0,720 \text{ kg}$  para cada lajeta.

É de salientar o facto de que antes da aplicação do endurecedor, a superfície do betão foi salpicada com água (Figura 35Figura 35), visto que se encontrava num elevado estado de endurecimento. Nas lajetas onde o endurecedor de superfície foi aplicado após 45 minutos da obtenção dos  $8,5 \text{ MPa}$ , a superfície do betão apresentava-se ainda mais ressequida (Figura 34Figura 34), necessitando também de salpico de água. O objectivo do salpico de água sobre a superfície do betão é o de facilitar a ligação endurecedor/betão, simulando assim, uma situação de aplicação tardia do endurecedor.



**Figura 34 - Superfície do betão ressequida**



**Figura 35 - Salpico de água sobre a superfície do betão**

Após o salpico de água, o endurecedor foi espalhado uniformemente sobre a superfície da lajeta com especial atenção aos cantos e bordos (Figura 36Figura 36).



**Figura 36 - Endurecedor espalhado sobre a superfície do betão**

Convém referir que também foi salpicada água sobre o endurecedor de superfície (Figura 37), para que fosse criada pasta, o endurecedor conseguisse ser afagado e assim fosse promovida a ligação entre este e a superfície do betão.



**Figura 37 - Salpico de água sobre o endurecedor de superfície na lajeta**

A água utilizada no salpico foi previamente contabilizada para que no fim do processo de afagamento fosse possível determinar a quantidade adicionada.

Dadas as dimensões reduzidas das lajetas, não foi possível afagar as mesmas através da utilização do típico “helicóptero” ou afagador mecânico. Por isso, foi utilizado um afagador construído em laboratório no âmbito das dissertações anteriormente referidas (Figura 38Figura 38).

Este afagador consiste numa chapa metálica rígida, com superfície inferior totalmente nivelada e lisa, e com um eixo de ligação que se acopla a um berbequim. A sua utilização foi testada e concluiu-se que replicava o afagamento pretendido, quer numa

fase inicial (Figura 39) quer numa fase de acabamento (Figura 41), tal como o afagamento produzido pelos “helicópteros” utilizados em obra.



**Figura 38 - Afagador utilizado no processo de afagamento das lajetas**



**Figura 39 - Afagamento inicial**

Depois de afagadas, as lajetas foram novamente cobertas pelos túneis até novo afagamento. Uma vez que se simula uma situação com temperaturas quentes, o tempo de espera entre afagamentos não pode ser muito longo. De uma forma geral, os intervalos de tempo entre afagamentos em todos os ensaios variaram entre 5 e 15 minutos.



**Figura 40 - Afagamento intermédio**

A decisão de efectuar novo afagamento teve a ver com o aspecto visual da superfície da lajeta (Figura 40Figura 40). Desta forma, efectuaram-se sucessivos afagamentos até se obter uma superfície densa, lisa e brilhante. No geral, foram feitos entre 3 a 5 afagamentos em todos os ensaios até se obter o resultado pretendido.



**Figura 41 - Afagamento final**

Em alguns dos afagamentos foi necessário recorrer ao salpico de água com o intuito de corrigir algumas imperfeições e eliminar rugosidades (Figura 42Figura 42), o que também acontece em obra.



**Figura 42 - Salpico de água para correcção de imperfeições e eliminação de rugosidades**

Ao atingir o acabamento da superfície pretendido, esta foi coberta com película aderente de forma a simular a aplicação de um produto de cura (Figura 43Figura 43), impedindo a evaporação da água e conseqüente falta de hidratação do betão, e proporcionando em simultâneo uma boa incorporação do endurecedor no betão. Após este procedimento, as lajetas permaneceram até ao dia seguinte nos túneis sob as condições extremas de vento e calor.



**Figura 43 - Cobertura da lajeta com película aderente**

Na manhã seguinte, as películas foram retiradas, as lajetas descofradas e marcadas como descrito em 3.2.13., e armazenadas em local próprio para posteriormente se realizarem os ensaios de arrancamento por pull-off e o ensaio do índice esclerométrico.

Na altura da colocação do endurecedor foi medida a quantidade de água existente em cada tina e posteriormente calculada a água que evaporou. As tinas foram novamente colocadas nos seus lugares e no dia seguinte, quando o ensaio é dado por terminado, mediu-se novamente a água mantida nas tinas e calculou-se a que evaporou.

Estes cálculos servem essencialmente para se ter uma noção da quantidade de água evaporada, ou seja, a quantidade de água que o betão poderia perder ou perdeu sob as condições extremas a que esteve sujeito, permitindo saber a água disponível em cada uma das lajetas aquando da aplicação do endurecedor.

### **3.2.10. Ensaio de resistência à compressão**

Neste ensaio foi testada a resistência à compressão de provetes cúbicos com 15 cm de aresta e cilíndricos com cerca de 5 cm de diâmetro. A resistência dos provetes cúbicos foi determinada aos 3, 7 e 28 dias. Uma vez que os provetes cilíndricos resultaram da extracção de carotes das lajetas, a sua resistência foi apenas verificada aos 28 dias de forma a comparar com a resistência aos 28 dias dos provetes cúbicos.

Na realização do ensaio da resistência à compressão<sup>1</sup> foi seguida a norma NP EN 12390-3: 2009. Teve-se o cuidado de remover o excesso de humidade da superfície

do provete antes de colocar na máquina, bem como limpar as superfícies da própria máquina de ensaio. Cada provete foi posicionado para que as cargas fossem aplicadas perpendicularmente à direcção de moldagem, tendo o cuidado de colocar a superfície de enchimento virada para uma das colunas da máquina (Figura 44). Em seguida foi seleccionada uma velocidade constante de aplicação de carga dentro do intervalo de  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s. Depois de aplicada uma carga inicial sem exceder cerca de 30% da carga de rotura, a carga ao provete foi aumentada de forma contínua, a velocidade constante até não ser possível aplicar uma carga maior. Por fim, registou-se a carga máxima e foi feita a avaliação do tipo de rotura.



Figura 44 - Provete sendo comprimido durante o ensaio

Para a obtenção dos provetes cilíndricos, foi necessário recorrer à extracção de carotes das lajetas de betão (Figura 45) de acordo com a norma NP EN 12504-1: 2009. Para tal foi utilizada uma caroteadora, modelo GOLZ KB 110 K, a qual possibilitou a extracção de carotes com cerca de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (espessura das lajetas).



Figura 45 - Extracção de carotes das lajetas

As carotes extraídas foram devidamente marcadas de acordo com as lajetas de onde eram obtidas (Figuras 46 e 47) e enviadas posteriormente para o LNEC, onde foram rectificadas para posterior ensaio de resistência à compressão. Uma vez que se pretendia comparar a resistência à compressão aos 28 dias dos provetes cilíndricos com as resistências aos 28 dias dos provetes cúbicos, foram ensaiados provetes cilíndricos com a relação comprimento/diâmetro igual a 1,0, ou seja, diâmetro e altura com cerca de 5 cm. A determinação das resistências à compressão aos 28 dias também foram realizadas no LNEC na máquina de resistência à compressão da marca Form+Test Prufsysteme, modelo Mega 10.



Figura 46 - Locais de extracção das carotes



Figura 47 - Carotes extraídas

A resistência à compressão é dada pela seguinte expressão (NP EN 12390-3, 2009):

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

onde:

$f_c$  é a resistência à compressão, em MPa;

$F$  é a carga máxima à rotura, em N;

$A_c$  é a área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, calculada com base na dimensão designada do provete.

### 3.2.11. Ensaio de arrancamento por pull-off

O ensaio de arrancamento por pull-off foi realizado segundo a norma EN 1542: 1999 e permite a avaliação da força de adesão entre a camada de endurecedor de superfície e o betão de base das lajetas, possibilitando verificar a existência ou não de uma boa ligação entre as duas camadas.

Este ensaio consiste na colagem de pastilhas metálicas em zonas circulares previamente cortadas até determinada profundidade, seguida da acoplagem do aparelho de arrancamento por pull-off, da marca Dyna, modelo Z16 Proceq, que através de um sistema de manivela, possibilita o destacamento das zonas circulares registando o valor da força exercida para tal.

Foram feitos 5 cortes circulares em cada lajeta, dispostos em ziguezague de forma a contemplar as zonas da lajeta mais expostas à fonte de calor e as zonas menos expostas (Figura 48/Figura 48).

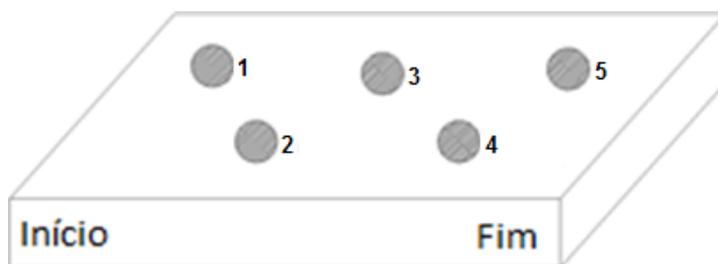


Figura 48 - Esquema representativo da disposição dos locais a ensaiar



Figura 49 - Zonas a ensaiar previamente cortadas

A preparação dos ensaios iniciou-se com a execução de cortes circulares, feitos 5 dias após a conclusão das lajetas, com cerca de 5 cm de diâmetro (Figura 49Figura 49). Para tal, foi utilizada a caroteadora acima referida, pelo que os cortes foram executados com jacto de água até uma profundidade de uns 2 cm da camada de endurecedor de forma a alcançar o betão de base (Figura 50Figura 50).



**Figura 50 - Zona a ensaiar sendo cortada com auxílio de caroteadora**

No dia seguinte, estando a superfície seca, esta foi regularizada na zona dos cortes com o auxílio de uma “pedra de silício” para que a superfície ficasse ligeiramente rugosa para uma melhor adesão entre o círculo de corte e a pastilha de metal a colar posteriormente (Figura 51Figura 51). A poeira resultante da regularização foi limpa com recurso a um pano embebido em acetona, eliminando qualquer impureza.



**Figura 51 - Preparação das zonas circulares para colagem das pastilhas metálicas**

De seguida preparou-se a cola para a colagem das pastilhas metálicas aos círculos (Figura 52Figura 52). Esta é uma cola epoxídica com grande poder de adesão,

consistindo na mistura de dois componentes. Também foram preparadas as pastilhas a colar.

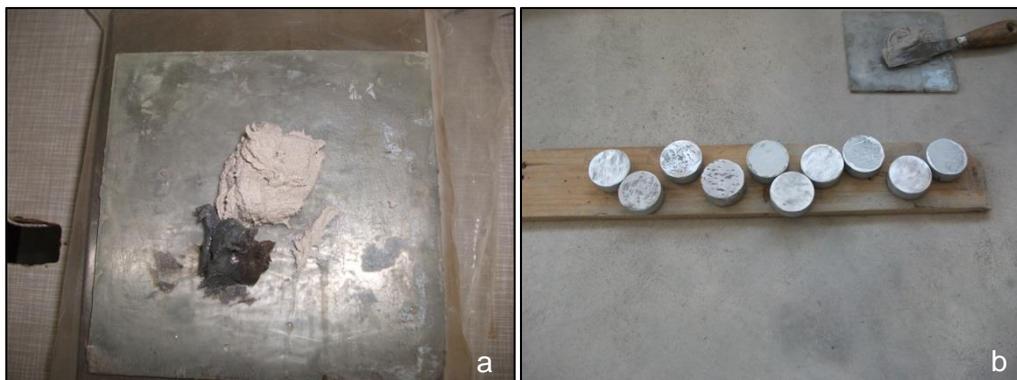


Figura 52 - Preparação da cola (a) e das pastilhas metálicas (b)

Na etapa seguinte procedeu-se ao espalhamento da cola na pastilha tendo em atenção deixar a superfície completamente preenchida. Logo em seguida, a pastilha foi colada na zona circular, exercendo uma pressão moderada na peça, e com o cuidado de se ajustar a área da pastilha com a área do corte. O excesso de cola resultante da pressão exercida foi removido com a ajuda de um palito. Este procedimento (Figura 53Figura 53) foi realizado em 5 pastilhas para cada lajeta (Figura 54Figura 54), e deixando a cola secar aproximadamente 24 horas.



Figura 53 - Processo de colagem das pastilhas metálicas



Figura 54 - Pastilhas metálicas coladas nos respectivos locais

Passado o tempo de secagem, foi enroscado um parafuso em cada pastilha que contém uma cabeça especialmente concebida para se acoplar ao equipamento de pull-off (Figura 55). Em seguida, montou-se o aparelho de arrancamento, que foi colocado sobre a primeira pastilha. Seguidamente rodou-se a manivela de forma progressiva ( $0,05 \pm 0,01$  MPa/s), incrementando a força de tracção contínua até se atingir a rotura.

A tensão exercida para atingir a rotura é dada pela seguinte expressão (EN 1542, 1999):

$$f_h = \frac{4F_h}{\pi D^2}$$

onde:

$f_h$  é a força máxima de tracção sobre a área da pastilha metálica, em MPa;

$F_h$  é a carga máxima à rotura, em N;

$D$  é o diâmetro médio do círculo cortado, em mm.



Figura 55 - Execução do ensaio de arrancamento por pull-off

Analisando a rotura obtida (Figura 56), é observado se, por um lado, a secção pertence a um dos materiais (arrancamento por tracção), ou por outro, está contida na superfície de ligação entre os materiais (arrancamento por aderência entre os materiais). Ou seja, da análise feita, é verificado se a aderência é mais frágil na zona do betão de base, na zona do endurecedor de superfície ou em ambas.



**Figura 56 - Resultados obtidos com o arrancamento por pull-off**

Se a rotura ocorrer na zona do betão de base, significa que o endurecedor de superfície estabeleceu uma boa ligação com o betão de base. No caso da rotura suceder na zona do endurecedor ou na zona de ligação, significa que não estabeleceu uma boa ligação com o betão de base. Uma rotura que ocorra em ambas as zonas, tem os mesmos significados anteriormente mencionados, indicando que a zona ensaiada continha parte do endurecedor bem ligado ao betão de base, e outra parte, não. Poderá também ocorrer uma rotura pela cola, mas neste caso, é devido à inadequada preparação dos ensaios.

Após a análise da primeira pastilha, o processo é repetido para as restantes pastilhas.

### **3.2.12. Determinação do índice esclerométrico**

Este ensaio foi realizado imediatamente a seguir ao ensaio de arrancamento por pull-off e conforme a norma NP EN 12504-2: 2003. Este consiste numa forma simples e não destrutiva de obter a resistência à compressão de elementos à compressão.

O ensaio efectuou-se sobre a superfície do endurecedor aplicado à lajeta. Por se tratar de um ensaio de resistência superficial, os valores obtidos são apenas representativos para uma camada até 5 cm de profundidade. Também é um ensaio útil para avaliar a homogeneidade do betão.

Na realização do ensaio foi utilizado um martelo de Schmidt (Figura 57). Após a preparação da superfície a ensaiar, a cabeça do veio de compressão foi colocado na perpendicular à superfície. Depois, o corpo do martelo foi empurrando continuamente contra o veio, até a massa se soltar e se ouvir o impacto. Esta massa impelida por uma mola embate no percutor (cabeça do veio) em contacto com a superfície, sendo o resultado expresso em termos de distância repercutida pela massa.



Figura 57 - Execução do ensaio para a determinação do índice esclerométrico

Foram realizadas nove leituras em cada ensaio de forma a permitir um valor fiável da área de ensaio (Figura 58), assegurando que cada dois pontos de leitura distavam mais de 25 mm e nenhum estava a menos de 25 mm da margem (Figura 59).

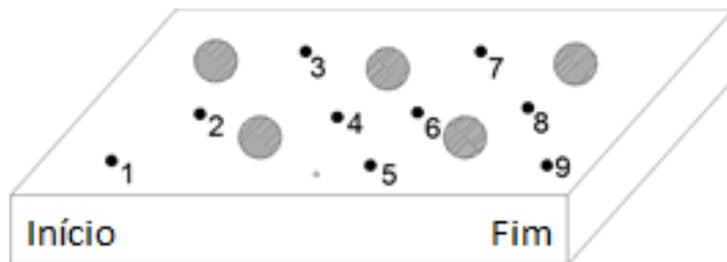


Figura 58 - Esquema representativo da disposição dos locais a ensaiar



Figura 59 - Zonas ensaiadas numeradas

A leitura lida no martelo esclerométrico foi relacionada com o ábaco junto ao próprio martelo e convertida em MPa (Figura 60/Figura 60).

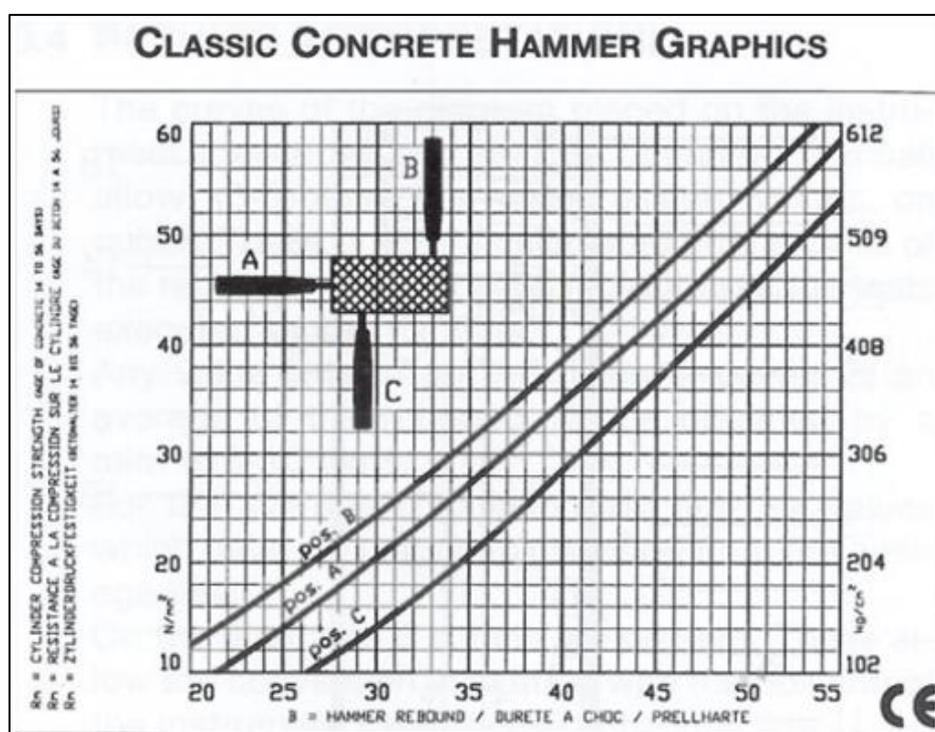


Figura 60 - Ábaco para conversão, da leitura dada pelo martelo, em MPa

### 3.2.13. Identificação das lajetas

Tendo em conta os cinco endurecedores, as duas composições para o betão de base e os dois instantes de aplicação do endurecedor, foram feitas 20 lajetas, o que corresponde a uma lajeta por situação. Tendo em conta o referido, foram feitas 10

lajetas com P e outras 10 lajetas com SP (Figura 61Figura 61). Contudo, tiveram de ser repetidas 2 lajetas com o adjuvante P.



Figura 61 - Total de lajetas fabricadas

Para se simplificar a identificação das lajetas de cada composição base com a aplicação de um determinado endurecedor adoptou-se a seguinte nomenclatura (Figura 62Figura 62):

- P\_X: para uma lajeta fabricada com incorporação de adjuvante P e aplicação de endurecedor X imediatamente a seguir à obtenção do valor de 8,5 MPa;
- P+45\_X: para uma lajeta fabricada com incorporação de adjuvante P e aplicação de endurecedor X após 45 minutos da obtenção do valor de 8,5 MPa;
- SP\_X: para uma lajeta fabricada com incorporação de adjuvante SP e aplicação de endurecedor X imediatamente a seguir à obtenção do valor de 8,5 MPa;
- SP+45\_X: para uma lajeta fabricada com incorporação de adjuvante SP e aplicação de endurecedor X após 45 minutos da obtenção do valor de 8,5 MPa.



Figura 62 - Nomenclatura das lajetas



## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Determinação da massa volúmica, da perda ao fogo e do resíduo insolúvel dos endurecedores

Para cada um dos endurecedores foi determinada a massa volúmica, a perda ao fogo e o resíduo insolúvel, características que estão indicadas na tabela seguinte.

**Tabela 10 - Resultados obtidos para os ensaios da determinação da massa volúmica, da perda ao fogo e do resíduo insolúvel, para cada endurecedor de superfície**

| Endurecedor  | B1   | B2   | Q1   | Q2   | C    |
|--|------|------|------|------|------|
| Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) [NP EN 196-6:2010] | 3070 | 3000 | 3000 | 3040 | 3020 |
| Perda ao fogo (%) [NP EN 196-2-7:2006]                 | 7,3  | 8,0  | 7,1  | 3,4  | 3,9  |
| Resíduo insolúvel (%) [NP EN 196-2-9:2006]             | 3,2  | 12,3 | 11,7 | 13,5 | 11,4 |

No que diz respeito à determinação da massa volúmica, e observando a Tabela 10, os resultados obtidos são muito semelhantes entre si, e muito próximos à massa volúmica de um CEM I, cerca de 3100 kg/m<sup>3</sup>, mas também são muito próximos da massa volúmica de um cimento CEM II/A-L 42,5R (3050 kg/m<sup>3</sup>). A amostra analisada (passado no peneiro de 0,250 mm) poderia conter outros componentes além do ligante, logo a Tabela 10 tem de ser analisada mais ao pormenor, como se verá a seguir. Os dados relativos a este ponto podem ser consultados nos Anexos E e F.

De acordo com os fabricantes, o cimento utilizado no fabrico dos endurecedores será o cimento Portland CEM I 42,5R, e por isso não seria de esperar valores de perda ao fogo superiores a 5%. A perda ao fogo para o cimento CEM I 42,5R está limitada aos 5%, sendo que o ideal é que esteja entre 3 a 4 %. Na Tabela 10 verifica-se que os resultados da determinação da perda ao fogo variam. A perda ao fogo é determinada aos 950°C na qual ocorre uma perda de massa, a partir da qual é possível determinar o grau de carbonatação e hidratação, por exposição atmosférica do CaO e do MgO livres. Tratando-se de um CEM I e não estando a perda ao fogo em 3 dos 5 endurecedores abaixo dos 5%, nomeadamente os endurecedores B1, B2 e Q1, verifica-se que os mesmos podem conter outro ligante, que não o CEM I. Cimentos com conteúdos superiores de calcário, vão perder o dióxido de carbono presente no fíler calcário, como é o caso do CEM II/A-L, pelo que se pensa que poderia ter sido utilizado este último ligante em vez do CEM I. A presença de fíler calcário tem o

inconveniente de aumentar a superfície de partículas não reactivas (carácter expansivo), diminuindo a capacidade de ligação dos endurecedores no betão de base. Convém referir também que o cimento CEM II/A-L é mais económico que o CEM I.

O resíduo insolúvel presente num cimento CEM I é geralmente inferior a 5,0%. No entanto como este ensaio foi efectuado a amostras com granulometria inferior a 0,250 mm e podendo estas conter alguns agregados não é possível concluir directamente estes resultados.

Por conseguinte, e apenas de acordo com o ensaio de determinação da perda ao fogo, poder-se-ia sugerir que o cimento utilizado no fabrico dos endurecedores de superfície Q2 e C é um CEM I. Nos endurecedores B1, B2 e Q1, o cimento utilizado no seu fabrico poderá ser, eventualmente, um cimento com características mais expansivas, como é o caso do CEM II/A-L.

Por outro lado, foi efectuada uma estimativa da percentagem de ligante que cada uma das amostras continha com base nas suas massas volúmicas. O que se verificou foi que o B2, Q1 e Q2 têm uma maior quantidade de ligante, com 32%, 33% e 32% da massa total, respectivamente. A seguir aparece o B1 com 29% e por último o C com 24%. Desta forma, e sem referir valores, é possível ordenar os endurecedores de superfície, desde o que contém maior quantidade de ligante para o que contém menor quantidade: Q1, B2, Q2, B1, C.

## **4.2.Lajetas executadas**

Neste ponto serão apresentados os valores obtidos para as temperaturas registadas no interior dos túneis, para a taxa de evaporação e os resultados provenientes dos ensaios de resistência à penetração, do arrancamento por pull-off e da determinação do índice esclerométrico.

Além dos resultados obtidos, por se achar pertinente para uma primeira abordagem à análise de resultados, são também apresentados dados relativos ao fabrico das lajetas e aplicação dos endurecedores.

Ao longo do texto, além da apresentação dos resultados obtidos são feitos comentários e críticas de forma a se conseguir uma análise mais adequada e equitativa.

#### **4.2.1. Dados relativos às lajetas**

##### **4.2.1.1. Adjuvante P**

No decorrer deste ponto serão apresentados os dados relativos à aplicação e afagamento dos endurecedores de superfície, aos problemas detectados na sua aplicação e ao aspecto geral das lajetas, nas composições do betão de base com adjuvante P. Estes dados podem ser consultados sob a forma de tabelas no Anexo J.

##### **Endurecedor B1**

O betão de base para aplicação do endurecedor B1 foi fabricado a uma temperatura ambiente de 16,4 °C e a uma humidade relativa de 53,5 %. Foi registada uma temperatura no betão de 17,3 °C, e após o ensaio de abaixamento, obteve-se um registo de 14,5 cm (classe de consistência S3).

Na lajeta P\_B1 foi obtida a resistência à penetração de 8,5 MPa após 7h01m do fabrico do betão, sendo o endurecedor aplicado 2 minutos depois. Foram feitos apenas 2 afagamentos até se darem por terminados os trabalhos nesta lajeta. Durante os afagamentos foram adicionados 0,170 l de água de forma a eliminar irregularidades e a proporcionar uma melhor aderência entre o endurecedor e a o betão de base.

Na lajeta P+45\_B1 o valor de 8,5 MPa foi obtido após 6h41m do fabrico do betão e o endurecedor aplicado passados 47 minutos. Nesta lajeta também só foram feitos 2 afagamentos, e foram adicionados 0,180 l de água com o mesmo intuito acima referido.

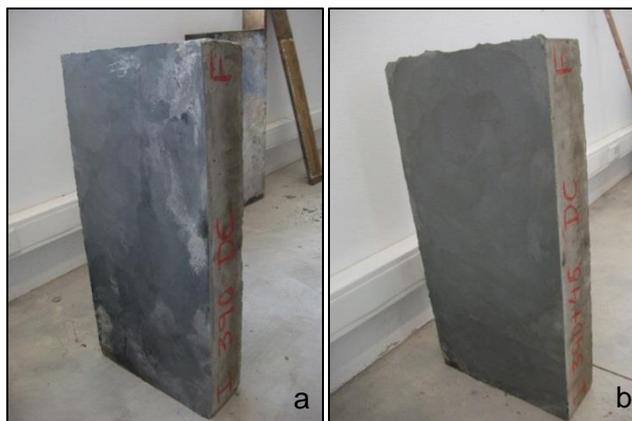


Figura 63 - Aspecto final da superfície das lajetas P\_B1 (a) e P+45\_B1 (b)

Tanto os afagamentos realizados como a adição de água foram escassos para ambas as lajetas, o que resultou numa superfície pouco lisa e sem brilho (Figura 63Figura 63).

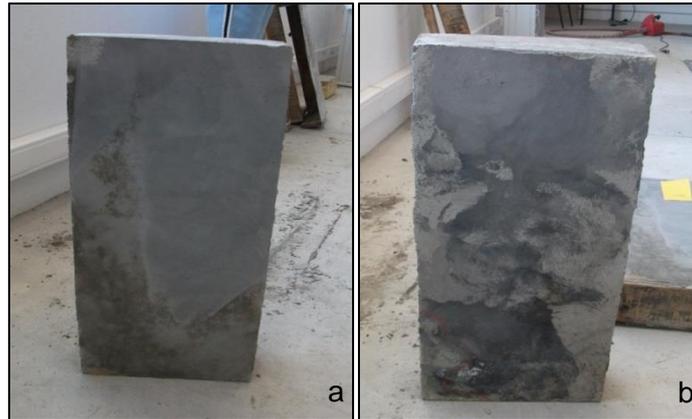
### Endurecedor B2

Para a aplicação do endurecedor B2 o betão de base foi fabricado a uma humidade relativa de 45,0 % e a uma temperatura ambiente de 19,3 °C. A temperatura registada no betão foi de 18,2 °C e obteve-se um abaixamento também de 14,5 cm (S3).

Na lajeta P\_B2 a resistência à penetração de 8,5 MPa foi obtida passadas 6h49m do fabrico do betão, 4 minutos depois foi feita a aplicação do endurecedor. Foram realizados também apenas 2 afagamentos até se darem por terminados os trabalhos. Durante os afagamentos foram adicionados 0,180 l de água de modo a eliminar irregularidades e promovendo uma melhor aderência entre o endurecedor e o betão de base.

Na lajeta P+45\_B2 o valor de 8,5 MPa foi obtido após 6h41m do fabrico do betão e o endurecedor aplicado 46 minutos depois. Nesta lajeta também só foram feitos 2 afagamentos, e foram adicionados 0,225 l de água com o intuito já mencionado.

Os afagamentos realizados e a adição de água também se revelaram escassos para ambas as lajetas, apesar de maior notoriedade na lajeta P+45\_B2 (Figura 64Figura 64).



**Figura 64 - Aspecto final das superfícies das lajetas P\_B2 (a) e P+45\_B2 (b)**

Como é possível verificar na Figura 65, um dos cantos da lajeta P+45\_B2 apresenta um destacamento do endurecedor do betão de base, muito provavelmente devido à falta de afagamento. Além disso, esta extremidade da lajeta foi a que esteve mais próxima da fonte de calor o que poderá ter influenciado a falta de água à superfície do betão, originando uma má aderência do endurecedor.



**Figura 65 - Destacamento de endurecedor do betão de base num dos cantos da lajeta P+45\_B2**

### **Endurecedor Q1**

Para a aplicação deste endurecedor foi necessário repetir o processo do fabrico das lajetas visto que uma das lajetas na primeira tentativa apresentou uma fissura a meio, em toda a largura e profundidade (Figura 66).



**Figura 66 - Fissura ocorrida a meio da lajeta**

Neste ensaio o betão de base foi fabricado a uma humidade relativa de 45,0 % e a uma temperatura ambiente de 18,0 °C. A temperatura registada no betão foi de 18,8 °C e verificou-se um abaixamento de 15,0 cm (S3).

A lajeta P\_Q1 apresentou resistência à penetração de 8,5 MPa após 6h52m do fabrico do betão, sendo o endurecedor aplicado 4 minutos depois. Nesta lajeta, e devido ao defeituoso acabamento nos primeiros ensaios, foram executados 6 afagamentos até se atingir o efeito pretendido. Durante os afagamentos foram adicionados 0,301 l de água para uma melhor aderência entre o endurecedor e o betão de base e eliminar qualquer desnivelamento detectado.

A lajeta P+45\_Q1 possibilitou a obtenção do valor de 8,5 MPa após 6h33m do fabrico do betão, tendo a aplicação do endurecedor ocorrido passados 45 minutos. Nesta lajeta também se realizaram mais afagamentos. Ao todo foram feitos 5 afagamentos e adicionados 0,310 l de água.

Na aplicação deste endurecedor foi necessário adicionar um pouco mais de água, quando comparado com os outros endurecedores, e logo no início do afagamento, uma vez que existia agregado de quartzo com dimensões um pouco maiores, o que juntamente com a dificuldade em criar pasta no endurecedor, dificultava a passagem do afagador.



**Figura 67 - Aspecto superficial queimado na generalidade das lajetas**

Observando a Figura 67 verificam-se zonas da superfície mais negras por estarem queimadas pela passagem do afagador. Estas queimaduras devem-se ao facto da chapa metálica do afagador não ser a mais apropriada para o efeito, no entanto a superfície em ambas as lajetas apresentava brilho e estava totalmente lisa e densificada.

### **Endurecedor Q2**

O betão de base para este ensaio foi fabricado a uma humidade relativa de 44,0 % e a uma temperatura ambiente de 19,0 °C. O betão apresentou uma temperatura de 19,8 °C e um abaixamento de 10,0 cm (S3).

Na lajeta P\_Q2 a resistência à penetração de 8,5 MPa foi obtida passadas 6h18m do fabrico do betão, sendo o endurecedor aplicado nos 3 minutos seguintes. Neste ensaio, foram realizados 3 afagamentos e adicionados 0,334 l de água de modo a promover a aderência entre o endurecedor e o betão de base e eliminar irregularidades.

A lajeta P+45\_Q2 apresentou resistência à penetração de 8,5 MPa passadas 6h12m do fabrico do betão. A aplicação do endurecedor teve lugar após 45 minutos. Nesta lajeta também foram efectuados 3 afagamentos e adicionados 0,280 l de água.



**Figura 68 - Verificação da densificação e regularidade numa das lajetas**

Na aplicação deste endurecedor foi necessário recorrer à adição de água pelos mesmos motivos referidos para a aplicação do endurecedor Q1. Contudo, ambas as lajetas apresentaram uma superfície lisa e brilhante como a da Figura 68.

### **Endurecedor C**

Para este ensaio, o betão de base foi fabricado a uma humidade relativa de 51,0 % e a uma temperatura ambiente de 19,6 °C. Registou-se uma temperatura no betão de 20,6 °C e um abaixamento de 15,0 cm (S3).

A resistência à penetração de 8,5 MPa para a lajeta P\_C foi obtida após 6h34m do fabrico do betão. O endurecedor foi aplicado passados 2 minutos. Neste ensaio, foram realizados 5 afagamentos até se dar por terminados os trabalhos. Quanto à água adicionada, inicialmente foram medidos 0,5 l de água num gobelé que fortuitamente foi partido. Desses 0,5 l foram utilizados aproximadamente 0,25 l. Depois do sucedido, mediram-se mais 0,3 l para os afagamentos finais, de onde foram utilizados apenas 0,056 l. Deste modo, assumiu-se que a água adicionada à lajeta P\_C foi de aproximadamente 0,250 l.

A lajeta P+45\_C apresentou resistência à penetração de 8,5 MPa após 6h07m do fabrico do betão. A aplicação do endurecedor teve lugar passados 46 minutos. Nesta lajeta também foram efectuados 5 afagamentos e adicionados 0,233 l de água.



**Figura 69 - Aspecto final da superfície da lajeta P+45\_C**

A superfície destas lajetas apresentou-se na sua generalidade, lisa e brilhante (Figura 69).

#### **4.2.1.2. Adjuvante SP**

Neste ponto serão relatados os mesmos dados e aspectos expostos no ponto anterior, mas relativos a composição do betão de base com adjuvante SP. Tal como no subcapítulo anterior, estes dados são expostos sob a forma de quadros no Anexo F.

#### **Endurecedor B1**

O betão de base para aplicação do endurecedor B1 foi fabricado a uma temperatura ambiente de 16,8 °C e a uma humidade relativa de 48,0 %. Foi registada uma temperatura no betão de 16,6 °C, e após o ensaio de abaixamento, obteve-se um registo de 15,5 cm. Apesar do abaixamento passar dos 15 cm, limite máximo para a classe de consistência S3, de acordo com a norma NP EN 206-1: 2007 existe uma tolerância de 3 cm para abaixamentos superiores a 10 cm, logo a classe de consistência para o betão de base pode ser considerada como S3.

Na lajeta SP\_B1 foi obtida a resistência à penetração de 8,5 MPa após 5h13m do fabrico do betão, sendo o endurecedor aplicado 2 minutos depois. Foram feitos 4 afagamentos até se darem por terminados os trabalhos nesta lajeta. Durante os afagamentos foram adicionados 0,306 l de água de forma a eliminar irregularidades e a proporcionar uma melhor aderência entre o endurecedor e a o betão de base.

Na lajeta SP+45\_B1 o valor de 8,5 MPa foi obtido após 4h52m do fabrico do betão e o endurecedor aplicado passados 48 minutos. Nesta lajeta também foram feitos 4 afagamentos, e foram adicionados 0,235 l de água com o mesmo intuito acima referido.



**Figura 70 - Aspecto final da superfície das lajetas SP\_B1 (a) e SP+45\_B1 (b)**

Nestas lajetas a superfície apresentava-se lisa mas com pouco brilho (Figura 70). As extremidades mais expostas ao calor foram mais difíceis de afagar havendo alguns cantos com superfície áspera.

## **Endurecedor B2**

Para a aplicação do endurecedor B2, o betão de base foi fabricado a uma humidade relativa de 35,0 % e a uma temperatura ambiente de 17,6 °C. A temperatura registada no betão foi de 17,1 °C e obteve-se um abaixamento de 15,0 cm (S3).

Na lajeta SP\_B2 a resistência à penetração de 8,5 MPa foi obtida passadas 4h42m do fabrico do betão, 3 minutos depois foi feita a aplicação do endurecedor. Foram realizados 4 afagamentos até se darem por terminados os trabalhos. Durante os afagamentos foram adicionados 0,204 l de água de modo a eliminar irregularidades e promovendo uma melhor aderência entre o endurecedor e o betão de base.

Na lajeta SP+45\_B2 o valor de 8,5 MPa foi obtido após 4h33m do fabrico do betão e o endurecedor aplicado 45 minutos depois. Nesta lajeta foram feitas apenas 3 afagamentos, e foram adicionados 0,255 l de água com o intuito já mencionado.

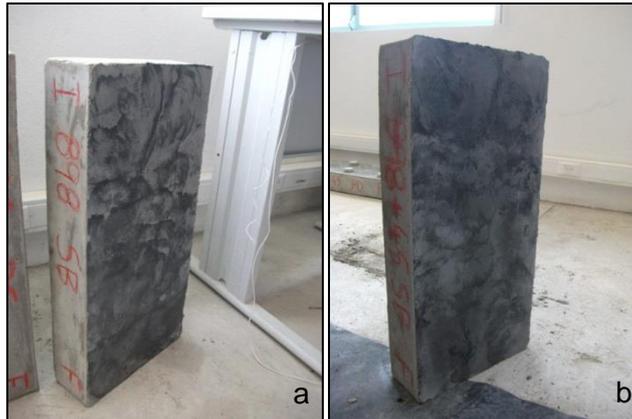


Figura 71 - Aspecto final da superfície das lajetas SP\_B2 (a) e SP+45\_B2 (b)

Apesar da Figura 71 não demonstrar a suavidade da superfície, esta encontrava-se lisa, havendo apenas alguma asperidade na extremidade mais exposta ao calor.

### Endurecedor Q1

Neste ensaio o betão de base foi fabricado a uma humidade relativa de 36,0 % e a uma temperatura ambiente de 18,0 °C. A temperatura registada no betão foi de 17,1 °C e verificou-se um abaixamento de 15,5 cm. Pelas mesmas razões referidas anteriormente a classe de consistência do betão também foi considerada S3.

A lajeta SP\_Q1 apresentou resistência à penetração de 8,5 MPa após 4h43m do fabrico do betão, sendo o endurecedor aplicado 3 minutos depois. Nesta lajeta foram executados 4 afagamentos até se atingir o efeito pretendido. Durante os afagamentos foram adicionados 0,185 l de água para uma melhor aderência entre o endurecedor e o betão de base e eliminar qualquer desnivelamento detectado.

A lajeta SP+45\_Q1 possibilitou a obtenção do valor de 8,5 MPa após 4h33m do fabrico do betão, tendo a aplicação do endurecedor ocorrido passados 45 minutos. Nesta lajeta também se realizaram 4 afagamentos e foram adicionados 0,265 l de água.

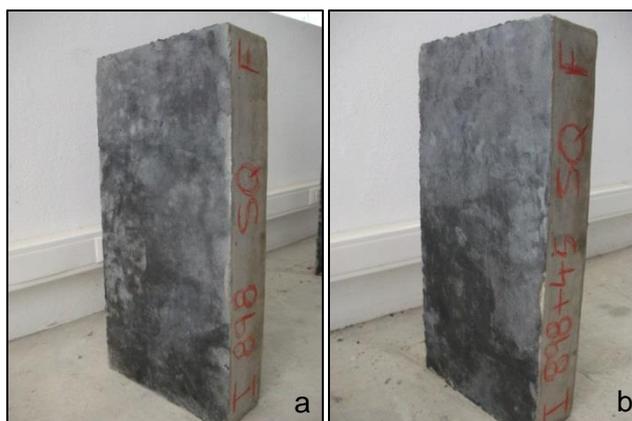


Figura 72 - Aspecto final da superfície das lajetas SP\_Q1 (a) e SP+45\_Q1 (b)

Nestas lajetas existiram alguns destacamentos nomeadamente ao longo das extremidades, mas as superfícies apresentavam-se lisas e densas (Figura 72Figura 72).

### Endurecedor Q2

O betão de base para este ensaio foi fabricado a uma humidade relativa de 36,0 % e a uma temperatura ambiente de 20,1 °C. O betão apresentou uma temperatura de 19,6 °C e um abaixamento de 14,7 cm (S3).

Na lajeta SP\_Q2 a resistência à penetração de 8,5 MPa foi obtida passadas 4h49m do fabrico do betão, sendo o endurecedor aplicado nos 2 minutos seguintes. Neste ensaio, foram realizados 4 afagamentos e adicionados 0,220 l de água de modo a promover a aderência entre o endurecedor e o betão de base e eliminar irregularidades.

A lajeta SP+45\_Q2 apresentou resistência à penetração de 8,5 MPa passadas 4h07m do fabrico do betão. A aplicação do endurecedor teve lugar após 52 minutos. Nesta lajeta também foram efectuados 4 afagamentos e adicionados 0,242 l de água.

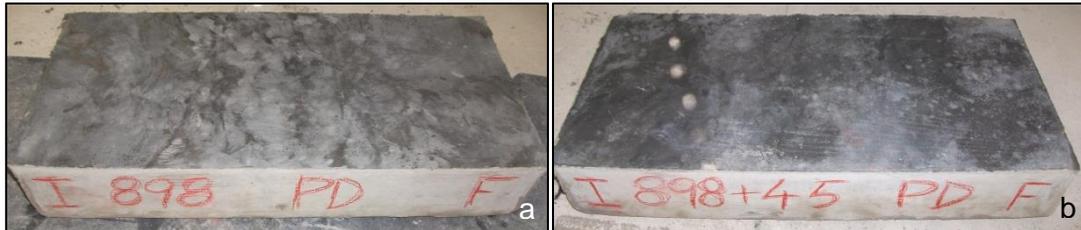


Figura 73 - Aspecto final da superfície das lajetas SP\_Q2 (a) e SP+45\_Q2 (b)

Estas lajetas apresentaram superfície lisa e com algum brilho (Figura 73). Figura 73).

### Endurecedor C

Para este ensaio, o betão de base foi fabricado a uma humidade relativa de 50,0 % e a uma temperatura ambiente de 18,6 °C. Registou-se uma temperatura no betão de 19,1 °C e um abaixamento de 15,5 cm. Pelas mesmas razões já referidas a classe de consistência do betão também foi considerada S3.

A resistência à penetração de 8,5 MPa para a lajeta SP\_C foi obtida após 4h35m do fabrico do betão. O endurecedor foi aplicado passados 3 minutos. Neste ensaio, foram realizados apenas 3 afagamentos até se dar por terminados os trabalhos, tendo sido adicionados 0,211 l de água.

A lajeta SP+45\_C apresentou resistência à penetração de 8,5 MPa após 4h09m do fabrico do betão. A aplicação do endurecedor teve lugar passados 45 minutos. Nesta lajeta também foram efectuados 3 afagamentos e adicionados 0,222 l de água.

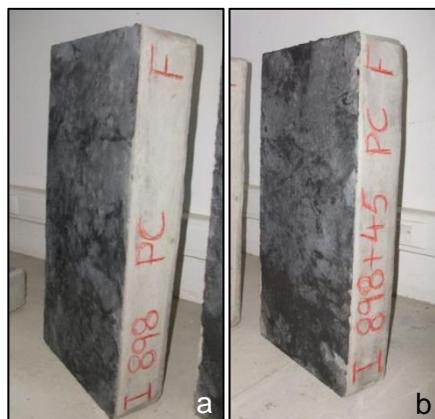


Figura 74 - Aspecto final da superfície das lajetas SP\_C (a) e SP+45\_C (b)

Nestas lajetas, as superfícies também ficaram lisas, tendo havido pequenos destacamentos de endurecedor ao longo das extremidades das lajetas (Figura 74).

De uma forma geral, todas as lajetas apresentaram algumas imperfeições, sobretudo nos cantos e ao longo das extremidades. Nestas zonas foi verificada alguma aspereza, e por vezes destacamento de endurecedor. Estas ocorrências devem-se ao impedimento de um correcto afogamento devido à madeira da cofragem, que por vezes dificultava a passagem do afogador.

#### 4.2.2. Temperaturas nos túneis

As temperaturas nos túneis são um factor importante uma vez que fornecem indicações sobre as condições a que as lajetas foram curadas, possibilitando averiguar a semelhança entre ensaios. Nas Tabelas 11 e 12 é possível verificar a humidade relativa, a temperatura ambiente, as temperaturas nos túneis e o túnel em que cada lajeta se inseria. As temperaturas médias nos túneis foram calculadas como média dos valores registados, quer à entrada quer à saída, de cada túnel. Os dados relativos ao controlo das temperaturas podem ser consultados no Anexo J.

As temperaturas registadas nos túneis são logicamente superiores à entrada do que à saída para ambas as composições de betão de base, dada a posição dos termoventiladores (Figura 30).

Uma vez que os túneis eram ligeiramente diferentes com já tendo sido descrito anteriormente, verifica-se que no túnel 1 as temperaturas são relativamente superiores em comparação com as registadas no túnel 2. Este facto deve-se às dimensões de cada túnel (Figura 33). O túnel 1 é mais comprido, medindo 3 m e formado por um semicírculo por sua vez mais pequeno em relação ao túnel 2, logo permitia maior concentração de calor. O túnel 2 é mais curto, com 2,5 m e com um semicírculo mais amplo relativamente ao túnel anterior, consentindo maior dissipação de calor.

Quando comparadas ambas as composições, as temperaturas médias e a temperatura obtida a meio da lajeta, tendo em conta o túnel em que cada lajeta se

insere, verifica-se que são semelhantes, havendo por vezes algumas discrepâncias. Estas variações pontuais poderão estar relacionadas com diversos factores, tais como, a humidade relativa, a temperatura ambiente, o funcionamento dos termo-ventiladores que por vezes se desligavam por estarem a trabalhar muitas horas e, a necessidade de levantar os túneis para a realização do ensaio de resistência à penetração.

Tabela 11 - Temperaturas registadas para as lajetas com P

| Identificação das lajetas |                       | P    |      |      |      |      | P+45 |      |      |      |      |
|---------------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                           |                       | B1   | B2   | Q1   | Q2   | C    | B1   | B2   | Q1   | Q2   | C    |
| Túnel                     |                       | 1    | 2    | 1    | 2    | 2    | 2    | 1    | 2    | 1    | 1    |
| Humidade relativa (%)     |                       | 53,5 | 45,0 | 45,0 | 44,0 | 51,0 | 53,5 | 45,0 | 45,0 | 44,0 | 51,0 |
| Temperaturas (°C)         | Ambiente              | 16,4 | 19,3 | 18,0 | 19,0 | 19,6 | 16,4 | 19,3 | 18,0 | 19,0 | 19,6 |
|                           | Média à entrada túnel | 61,8 | 56,5 | 67,3 | 54,3 | 56,2 | 62,1 | 70,8 | 64,7 | 73,9 | 69,2 |
|                           | Média à saída túnel   | 41,1 | 39,1 | 48,5 | 44,8 | 47,5 | 38,3 | 44,6 | 43,2 | 47,4 | 48,9 |
|                           | Média do túnel        | 47,0 | 43,0 | 53,2 | 48,0 | 50,0 | 45,1 | 50,4 | 48,6 | 56,2 | 54,7 |
|                           | A meio da lajeta      | 57,5 | 52,1 | 63,4 | 51,9 | 54,0 | 56,1 | 65,3 | 59,3 | 68,4 | 65,0 |

Tabela 12 - Temperaturas registadas para as lajetas com SP

| Identificação das lajetas |                     | SP   |      |      |      |      | SP+45 |      |      |      |      |
|---------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
|                           |                     | B1   | B2   | Q1   | Q2   | C    | B1    | B2   | Q1   | Q2   | C    |
| Túnel                     |                     | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 1     | 1    | 1    | 1    | 1    |
| Humidade relativa (%)     |                     | 48,0 | 35,0 | 36,0 | 36,0 | 50,0 | 48,0  | 35,0 | 36,0 | 36,0 | 50,0 |
| Temperaturas (°C)         | Ambiente            | 16,8 | 17,6 | 17,1 | 20,1 | 18,6 | 16,8  | 17,6 | 17,1 | 20,1 | 18,6 |
|                           | Média entrada túnel | 54,3 | 51,9 | 61,0 | 50,1 | 60,4 | 61,6  | 74,5 | 75,1 | 67,6 | 78,9 |
|                           | Média saída túnel   | 40,3 | 42,0 | 43,8 | 35,6 | 46,8 | 46,1  | 46,6 | 50,9 | 52,0 | 52,5 |
|                           | Média do túnel      | 44,3 | 44,0 | 47,3 | 40,4 | 51,3 | 50,5  | 55,9 | 55,7 | 57,2 | 61,3 |
|                           | A meio da lajeta    | 50,8 | 49,4 | 56,7 | 46,5 | 57,0 | 58,4  | 68,7 | 70,1 | 64,3 | 73,4 |

### 4.2.3. Determinação da taxa de evaporação

A taxa de evaporação é um parâmetro importante a determinar para a análise da incorporação dos endurecedores de superfície no betão de base, na medida em que poderá ser estimada a perda de água do betão de base desde que este foi colocado no túnel até à aplicação do endurecedor. Para a determinação deste parâmetro foi necessário alguns cálculos que resultaram na informação compilada na Tabela 13. No Anexo I é possível consultar todos os dados necessários para a obtenção da taxa de evaporação.

Para se obter os dados anteriormente referidos é importante ter em consideração a água colocada na amassadura: 170 l/m<sup>3</sup> para a composição com P e 150 l/m<sup>3</sup> para a composição com SP. Além deste factor, é igualmente significativo considerar factores como a humidade relativa, a temperatura ambiente e as temperaturas nos túneis.

Convém também salientar que para obter os valores correspondentes à água evaporada do betão foi necessário interpolar a posição do meio das lajetas em relação à posição dos tabuleiros com água e a posição dos termo-ventiladores. Os valores da água contida nos tabuleiros foram medidos no momento da aplicação dos endurecedores, que juntamente com a interpolação referida possibilitou averiguar a quantidade de água disponível na amassadura para aplicação dos mesmos.

Na Tabela 13 estão indicados os valores da água evaporada, no entanto, convém referir que na coluna da água na amassadura no instante da colocação do endurecedor, não está descontada a água que já reagiu com o cimento.

Analisando a Tabela 13, e comparando a água evaporada da amassadura antes da colocação dos endurecedores, entre P e SP, verifica-se que existe uma maior evaporação para as lajetas com P. Esta diferença deve-se ao facto da utilização de adjuvantes distintos no betão de base com endurecimentos diferentes. Apesar desta diferença, a água que fica disponível na amassadura é muito semelhante para todas as lajetas, havendo alguns casos pontuais em que se obteve um valor de água disponível inferior a 11 l/m<sup>2</sup>.

Tabela 13 - Taxa de evaporação para todas a lajetas

| Lajetas  | H.R. (%) | Temperatura ambiente (°C) | Água na amassadura (l/m <sup>2</sup> ) | Água evaporada até à colocação do endurecedor (l/m <sup>2</sup> ) | Água no betão no instante da colocação do endurecedor (l/m <sup>2</sup> ) |
|----------|----------|---------------------------|--|---|---|
| P_B1     | 53,5     | 16,4                      | 17,3                                   | 5,4   | 11,9  |
| P+45_B1  |          |                           | 17,3                                   | 5,7   | 11,6  |
| P_B2     | 45,0     | 19,3                      | 17,3                                   | 5,3   | 12,0  |
| P+45_B2  |          |                           | 17,3                                   | 5,7   | 11,6  |
| P_Q1     | 45,0     | 18,0                      | 17,3                                   | 5,3   | 12,0  |
| P+45_Q1  |          |                           | 17,3                                   | 6,5   | 10,8  |
| P_Q2     | 44,0     | 19,0                      | 17,3                                   | 5,6   | 11,7  |
| P+45_Q2  |          |                           | 17,3                                   | 6,3   | 11,0  |
| P_C      | 51,0     | 19,6                      | 17,3                                   | 5,7   | 11,6  |
| P+45_C   |          |                           | 17,3                                   | 6,3   | 11,0  |
| SP_B1    | 48,0     | 16,8                      | 15,0                                   | 3,3   | 11,7  |
| SP+45_B1 |          |                           | 15,0                                   | 3,6   | 11,4  |
| SP_B2    | 35,0     | 17,6                      | 15,0                                   | 4,2   | 10,8  |
| SP+45_B2 |          |                           | 15,0                                   | 5,3   | 9,7   |
| SP_Q1    | 36,0     | 17,1                      | 15,0                                   | 3,8   | 11,2  |
| SP+45_Q1 |          |                           | 15,0                                   | 4,6   | 10,4  |
| SP_Q2    | 36,0     | 20,1                      | 15,0                                   | 2,1   | 12,9  |
| SP+45_Q2 |          |                           | 15,0                                   | 4,3   | 10,7  |
| SP_C     | 50,0     | 18,6                      | 15,0                                   | 3,6   | 11,4  |
| SP+45_C  |          |                           | 15,0                                   | 4,7   | 10,3  |

As lajetas P+45\_Q1, SP\_B2, SP+45\_B2, SP+45\_Q1, SP+45\_Q2 e SP+45\_C são os casos em que os valores de água disponível na amassadura estão abaixo de 11 l/m<sup>2</sup>. No caso da lajeta P+45\_Q1, se for comparado o valor correspondente da temperatura ambiente e da humidade relativa com as temperaturas ambiente e humidades relativas de todas as outras lajetas com P, verifica-se que não existem diferenças pertinentes. A diminuição deste valor poderá estar relacionada com o aumento da água evaporada da amassadura, visto que esta lajeta se encontrava no túnel 1, onde foi registada uma temperatura média de 64,7 °C à entrada do túnel e uma temperatura a meio da lajeta de 63,4 °C (Tabela 11), o que contribui para um aumento da evaporação da água do betão, em detrimento da água que fica disponível.

Para as lajetas SP\_B2, SP+45\_B2, SP+45\_Q1 e SP+45\_Q2 verificam-se valores de temperatura e humidade relativa relativamente mais baixos quando comparados com

todos os valores do mesmo tipo, mas não relevantes para a diminuição da água disponível no betão.

O caso da lajeta SP+45\_Q1 poderá ser semelhante ao caso da lajeta P+45\_Q1, visto que esta também foi curada no interior do túnel 1, tendo sido registada uma temperatura média à entrada do túnel de 75,1 °C (Tabela 12), contribuindo do mesmo modo para o aumento da água evaporada do betão, fazendo diminuir a quantidade de água disponível no mesmo.

Tendo em conta o referido no parágrafo anterior em relação à temperatura ambiente e humidade relativa das lajetas SP\_B2, SP+45\_B2 e SP+45\_Q2, poder-se-á explicar a menor quantidade de água disponível no betão através das temperaturas registadas nos túneis. As lajetas SP\_B2 e SP+45\_B2 foram curadas ao mesmo tempo mas em túneis diferentes, logo com temperaturas diferentes: média de 51,9 °C à entrada do túnel da lajeta SP\_B2 e média de 74,5 °C à entrada do túnel da lajeta SP+45\_B2 (Tabela 12). Como é possível verificar, estes valores são bastantes diferentes mas contribuíram de igual modo para um aumento significativo da evaporação da água do betão o que, conseqüentemente conduziu à diminuição da água disponível. A lajeta SP+45\_Q2 foi curada no túnel 1, com uma temperatura média à entrada de 67,6 °C (Tabela 12), sendo estas as razões para a diminuição da água disponível no betão.

No caso da lajeta SP+45\_C, a humidade relativa é bastante superior às dos casos anteriores, o que aliado à temperatura registada a meio da lajeta de 73,4 °C (Tabela 12) ajudou à elevada evaporação de água, e conseqüente diminuição da água no betão.

#### **4.2.4. Determinação da resistência à penetração**

Neste ponto são descritos os resultados obtidos para a resistência à penetração, em particular, a caracterização do tempo de presa para ambas as composições, e o tempo necessário para a obtenção do valor de 8,5 MPa para cada composição. No Anexo K, é possível consultar em pormenor os resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração.

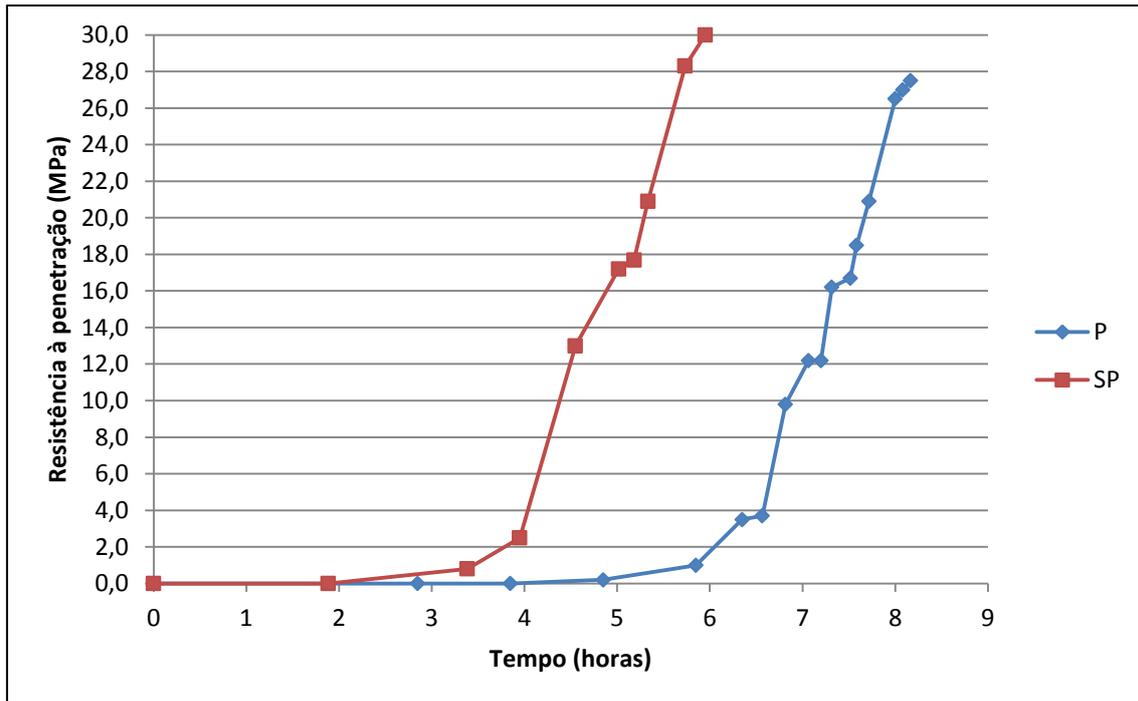


Figura 75 - Resistência à penetração - tempos de presa de P e SP

Analisando o gráfico da Figura 75, a diferença da presa do betão entre as duas composições de base é bastante evidente. Enquanto na composição de base com adjuvante SP o início de presa começa passadas 4 horas do fabrico do betão, a composição de base com adjuvante P apenas apresenta início de presa após 6 horas do fabrico do betão. O fim de presa também é atingido mais rapidamente para a composição de base com SP, após 6 horas do fabrico do betão, enquanto a composição de base com P apenas apresenta fim de presa passadas 8 horas do fabrico do betão. Este resultado deve-se à natureza do adjuvante SP, que envolvendo com maior eficácia as partículas de ligante (em comparação com o adjuvante P), promove a velocidade da evolução da presa da composição em que se insere. Tendo em conta a análise do gráfico da Figura 75, é de esperar que a obtenção do valor de 8,5 MPa seja alcançada mais tarde na composição de base com adjuvante P que com adjuvante SP.

A ligeira diferença entre as curvas para ambas as composições deve-se à necessidade de levantar os túneis para a realização deste ensaio, impedindo que o betão recebesse calor de forma constante, o que naturalmente condiciona o desenvolvimento. Este aspecto também é observável nas figuras seguintes.

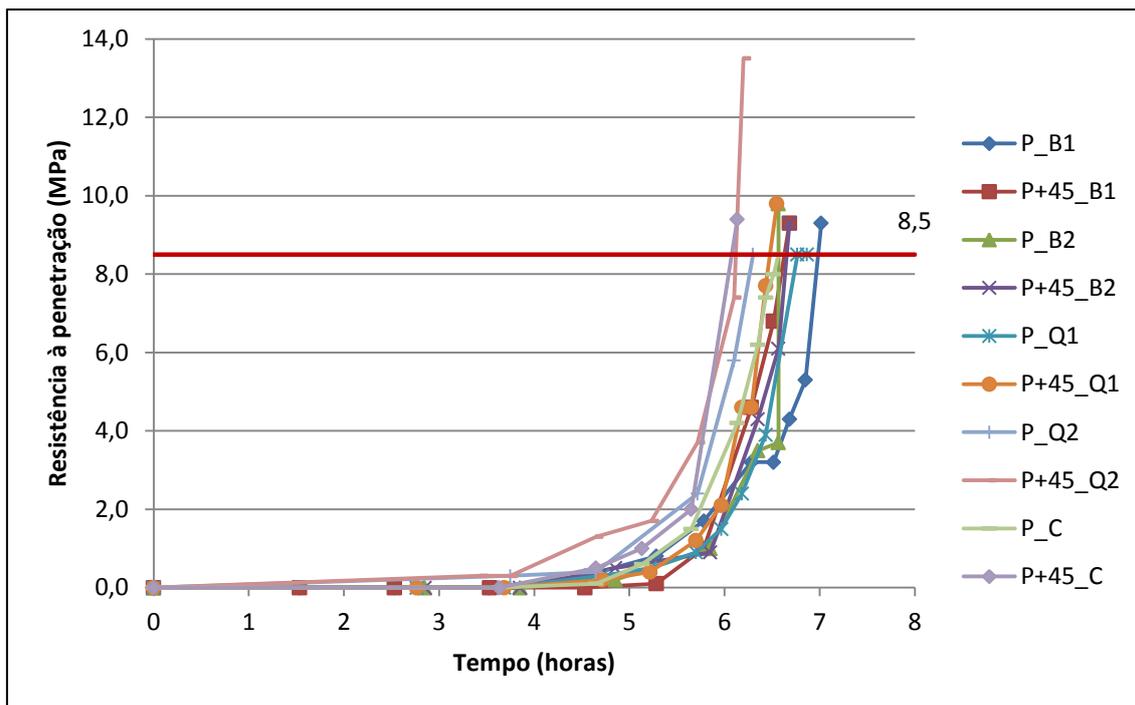


Figura 76 - Resistência à penetração - obtenção do valor de 8,5 MPa para lajetas P

Observando o gráfico da Figura 76, a obtenção do valor de 8,5 MPa é alcançada entre as 6 e 7 horas após o fabrico do betão com adjuvante P. Cruzando este dado com o gráfico da Figura 75 é possível verificar que após este instante o betão desenvolve muito rapidamente (cerca de 1 hora) a sua resistência até atingir o fim de presa.

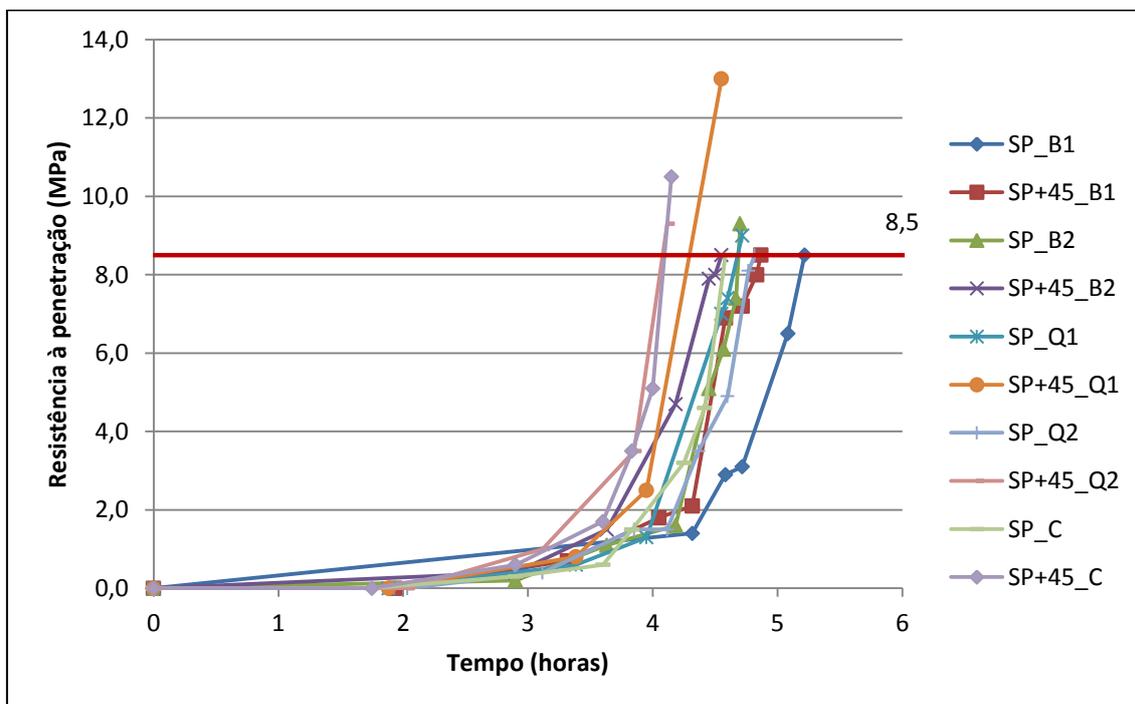


Figura 77 - Resistência à penetração - obtenção do valor de 8,5 MPa para lajetas SP

Como já foi mencionado, o valor de 8,5 MPa para o betão com adjuvante com SP é obtido mais rapidamente que o betão com o adjuvante P, entre as 4 e 5 horas após o fabrico do mesmo (Figura 77**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), desenvolvendo também rapidamente a sua resistência até ao fim de presa em cerca de 1 hora (Figura 75).

#### 4.2.5. Resistência ao arrancamento por pull-off

Ao longo deste ponto são apresentados os resultados obtidos através do ensaio de arrancamento por pull-off, os quais estão organizados em quadros que agrupam fotos com o tipo de rotura em cada um dos arrancamentos, relativas a cada tipo de endurecedor aplicado em cada composição de base. As roturas encontram-se coloridas e com siglas de forma a distinguir mais facilmente o tipo de rotura. Deste modo temos:

- **Rotura B** : rotura obtida pelo betão;
- **Rotura E/B** : rotura obtida pelo endurecedor/betão;
- **Rotura E** : rotura obtida pelo endurecedor ou pela ligação.

Antes da análise das roturas, é importante referir que a numeração presente nas fotos está disposta de forma a contemplar a extremidade da lajeta mais exposta ao calor e a extremidade menos exposta. Desta forma tem-se uma numeração de 1 a 5, em que 1 situa-se no início da lajeta e 5 no fim da lajeta (Figura 48**Figura 48**).

Os valores obtidos para no ensaio de arrancamento por pull-off podem ser consultados sob a forma de tabelas no Anexo M.

##### 4.2.5.1. Endurecedor B1

No ensaio do arrancamento por pull-off para as lajetas P, verificou-se que a maioria das roturas ocorreu pelo betão em ambas as lajetas (Tabela 14), o que indica uma boa ligação entre este e o betão de base. Porém, na P+45\_B1 lajeta houve 2 roturas que ocorreram pelo endurecedor/betão, apontando para a inexistência de uma boa ligação.

Os bons resultados obtidos para a lajeta P\_B1, poderão estar relacionados com a água disponível no betão que foi superior em relação aos ensaios com os endurecedores Q2 e C, mas inferior à água disponível nos ensaios com B2 e Q1. Apesar de mais tempo de exposição às condições extremas relativamente a todos esses ensaios, o que proporciona um elevado endurecimento do betão, a ligação estabelecida pelo endurecedor e o betão foi muito boa. Mesmo assim, na lajeta P\_B1 existiram algumas dificuldades de acabamento o que proporcionou algumas zonas com imperfeições. Estas imperfeições poderão estar relacionadas com a escassa água que foi adicionada durante a aplicação do endurecedor. Esta foi a lajeta em que se adicionou menos água (0,170 l) relativamente a todos os outros ensaios em ambas as composições. Nesta lajeta a tensão máxima registada foi de 3,2 MPa, verificando-se em duas roturas pelo betão.

Na lajeta P+45\_B1, a exposição às condições impostas também foi superior em relação a todos os outros endurecedores, mas tendo como água disponível para aplicação do endurecedor 11,6 l/m<sup>2</sup>, valor muito semelhante em relação aos outros endurecedores aplicados na mesma composição, proporcionando boas ligações entre o endurecedor e o betão. As roturas nas posições 1 e 3 poderão ter sido influenciadas pela proximidade à fonte de calor, o que aumentou a evaporação da água à superfície do betão necessária para a total incorporação do endurecedor. Além disso, a aplicação do endurecedor após 45 minutos da obtenção do valor de 8,5 MPa, num estado de endurecimento do betão de base bastante avançado, poderá ter contribuído de igual modo para a obtenção destas roturas. Nesta lajeta, embora não se tenha tido dificuldade no acabamento, houve o destacamento de endurecedor numa das extremidades, que poderá ser explicado pelo baixo valor na adição de água para aplicação de endurecedor (0,180 l). A tensão máxima de 3,3 MPa verificou-se numa rotura pelo endurecedor/betão.

Embora tenham estado inseridas em túneis diferentes, as temperaturas foram muito próximas nas lajetas P\_B1 e P+45\_B1, provavelmente devido ao levantamento dos túneis para a realização do ensaio de resistência à penetração. A humidade relativa de 53,5% registada na realização neste ensaio foi a mais alta comparada com todos os ensaios de ambas as composições.

Para as lajetas SP, obteve-se os 3 tipos de roturas acima mencionadas. As roturas pelo betão e pelo endurecedor/betão ocorreram na lajeta SP\_B1, enquanto a lajeta SP+45\_B1 apresentou todas as roturas pelo endurecedor.

Tabela 14 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor B1 em P e SP

| P_B1  | P+45_B1   | SP_B1  | SP+45_B1  |
|---|---|--|---|
|    |    |    |    |
| $f_h = 3,2$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 3,3$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>  | $f_h = 3,0$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>   | $f_h = 2,1$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|    |    |    |    |
| $f_h = 3,2$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,6$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,7$ MPa<br>Rotura <b>B</b>   | $f_h = 1,0$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|   |   |   |   |
| $f_h = 2,6$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,4$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>  | $f_h = 3,0$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>   | $f_h = 2,8$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,1$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,4$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 3,3$ MPa<br>Rotura <b>B</b>   | $f_h = 2,5$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,2$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,7$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,7$ MPa<br>Rotura <b>B</b>   | $f_h = 2,9$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |

Na lajeta SP\_B1 a água disponível na lajeta para aplicação o endurecedor foi superior face aos ensaios com os endurecedores B2, Q1 e C, mesmo estando mais tempo sob as condições adversas de calor. Face ao ensaio com o endurecedor Q2, a água disponível foi inferior uma vez que esteve mais tempo exposta ao calor. Nesta lajeta houve 2 roturas pelo endurecedor/betão nas posições 1 e 3. Na posição 1 o motivo poderá ter sido a exposição a alta temperatura, tal como na posição 3, o que poderá ter impossibilitado a presença de água suficiente para a aderência da totalidade do endurecedor, mas também a água adicionada (0,306 l) que poderá ter enfraquecido o endurecedor, impedindo uma adequada ligação ao betão de base. A tensão máxima registada foi de 3,3 MPa, verificando-se numa rotura pelo betão.

A água disponível para aplicação do endurecedor na lajeta SP+45\_B1 foi superior em relação aos ensaios com todos os outros endurecedores, apesar de ter permanecido mais tempo sob condições extremas. A totalidade das roturas obtidas pelo endurecedor nesta lajeta poderá estar relacionada com a adição de água (0,235 l), que enfraquecendo o endurecedor, impossibilitou uma boa ligação ao betão de base. Além disso, a presença de outro cimento que não o CEM I (ver ponto 4.1.) na composição deste endurecedor poderá também ter contribuído para a inadequada integração do endurecedor no betão de base. Para esta lajeta a tensão máxima de 2,9 MPa verificou-se numa rotura pelo endurecedor na posição 5, o que pode ser explicado pelo afastamento da fonte de calor, o que possibilitou uma ligação um pouco mais forte.

As temperaturas foram inferiores para a lajeta SP\_B1 e relativamente superiores na lajeta SP+45\_B1, visto que esta última lajeta se inseria no túnel 1. Na SP+45\_B1 foi registada a temperatura mais baixa em relação a todos os outros endurecedores aplicados na mesma composição de betão de base. O acabamento na lajeta SP+45\_B1 foi mais fácil do que na lajeta SP\_B1, apesar da dificuldade sentida nas extremidades. A humidade relativa para este ensaio foi de 48%.

#### **4.2.5.2. Endurecedor B2**

Nas lajetas P e SP, a generalidade das roturas ocorreu pelo endurecedor (Tabela 15). Contudo, uma rotura ocorreu pelo endurecedor/betão na lajeta P+45\_B2 e na lajeta SP\_B2 uma rotura ocorreu pelo betão.

A rotura dada pelo endurecedor/betão na lajeta P+45\_B2 poderá estar relacionada com um inadequado acabamento naquela zona e por ter sido aplicado num betão em elevado estado de endurecimento. Além disso, a quantidade água adicionada na aplicação do endurecedor foi das menores, 0,180 l.

A água disponível para aplicação do endurecedor na lajeta P\_B2 foi superior em relação aos ensaios com os endurecedores B1, Q2 e C, estando esta mais tempo exposta à situação adversa de calor em relação à lajeta com C, e menos tempo exposta que as lajetas com B1, Q1 e Q2. Na lajeta P+45\_B2, a água disponível foi igual à da lajeta com o endurecedor Q1 e superior a todos os outros ensaios, estando menos tempo sob as condições extremas que todos os outros ensaios, excepto o ensaio com C, em que esteve mais tempo.

Neste ensaio, a humidade relativa foi de 45 % e as temperaturas foram inferiores na lajeta P\_B2 devido ao túnel em que estava inserida, túnel 2.

Em ambos os ensaios, houve alguma dificuldade de acabamento, tendo a lajeta P\_B2 apresentado mais imperfeições, em particular, zonas ásperas.

Na lajeta P\_B2 a tensão máxima registada foi de 2,8 MPa, verificando-se numa rotura pelo endurecedor. Na lajeta P+45\_B2 a tensão máxima de 2,7 MPa sendo a rotura pelo endurecedor/betão. Estes valores máximos foram ambos obtidos na posição 5, por estarem mais longe da fonte de calor o que proporcionou uma melhor ligação do endurecedor.

Nas lajetas SP, o motivo para tantas roturas pelo endurecedor também poderá ser a falta de água, mas não por falta de adição durante a aplicação. Neste caso a razão poderá estar relacionada com as temperaturas no túneis e a água que ficou disponível no betão antes da aplicação do endurecedor. A água disponível para aplicação do endurecedor na lajeta SP\_B2 foi inferior em relação aos restantes ensaios, estando a lajeta menos tempo exposta às condições extremas que os ensaios com os endurecedores B1 e Q2, e o mesmo tempo que os ensaios com Q1 e C. A lajeta SP+45\_B2 apresentou água disponível inferior em relação aos restantes ensaios e esteve menos tempo exposta que o ensaio com o endurecedor B1, mais tempo em relação aos ensaios com os outros endurecedores. Este facto poderá ter sido, muito provavelmente, o factor que induziu a ocorrência das roturas pelo endurecedor, uma vez que não houve água suficiente para uma boa ligação do endurecedor ao betão de

base, bem como a aplicação do endurecedor num instante bastante tardio, 45 minutos após a obtenção do valor de 8,5 MPa.

Tabela 15 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor B2 em P e SP

| P_B2  | P+45_B2   | SP_B2  | SP+45_B2  |
|---|---|--|---|
|    |    |    |    |
| $f_h = 0,5$ MPa<br>Rotura E   | $f_h = 1,7$ MPa<br>Rotura E   | $f_h = 1,9$ MPa<br>Rotura E  | $f_h = 0,5$ MPa<br>Rotura E   |
|    |    |    |    |
| $f_h = 1,7$ MPa<br>Rotura E   | $f_h = 1,1$ MPa<br>Rotura E   | $f_h = 2,3$ MPa<br>Rotura E  | $f_h = 1,0$ MPa<br>Rotura E   |
|   |   |   |   |
| $f_h = 1,6$ MPa<br>Rotura E   | $f_h = 1,3$ MPa<br>Rotura E   | $f_h = 2,9$ MPa<br>Rotura E  | $f_h = 1,3$ MPa<br>Rotura E   |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,5$ MPa<br>Rotura E   | $f_h = 2,6$ MPa<br>Rotura E   | $f_h = 2,9$ MPa<br>Rotura B  | $f_h = 0,6$ MPa<br>Rotura E   |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,8$ MPa<br>Rotura E   | $f_h = 2,7$ MPa<br>Rotura E/B   | $f_h = 2,6$ MPa<br>Rotura E  | $f_h = 1,0$ MPa<br>Rotura E   |
|  |  |  |  |

As quantidades de água disponível nas lajetas SP\_B2 e SP+45\_B2 são as menores quando comparadas com as dos outros ensaios.

A humidade relativa neste ensaio foi de 35%, tendo sido registadas temperaturas superiores na lajeta SP+45\_B2 por estar inserida no túnel 1.

A lajeta SP\_B2 apresentou alguma dificuldade no acabamento, manifestando algumas imperfeições. Esta dificuldade poderá estar relacionada com o tamanho do agregado contido no endurecedor B2, uma vez que na sua análise granulométrica apresentou uma percentagem de material retido de 18,2 % no peneiro com abertura de 2 mm, dificultando tanto a criação de pasta na altura da sua aplicação como a passagem do afagador. No entanto, o acabamento na lajeta SP+45\_B2 não apresentou complicações, mas verificaram-se também algumas imperfeições.

Na lajeta SP\_B2 foi registada a tensão máxima de 2,9 MPa, verificando-se numa rotura pelo betão, enquanto na lajeta SP+45\_B2 obteve-se a tensão máxima de 1,3 MPa para uma rotura pelo endurecedor.

Uma hipótese para a generalidade das roturas pelo endurecedor em ambas as composições poderá estar, tal como no endurecedor B1, relacionada com o cimento presente no endurecedor. De acordo com o referido no ponto 4.1., o cimento que está no endurecedor B2 poderá ser um CEM II/A-L, que dadas as suas características expansivas não propicia a adesão do endurecedor de superfície ao betão de base.

#### **4.2.5.3. Endurecedor Q1**

Neste ensaio, tanto para as lajetas P como para as lajetas SP, as roturas obtidas não foram muito homogêneas, havendo os 3 tipos: pelo betão, pelo endurecedor/betão e pelo endurecedor (Tabela 16).

Na lajeta P\_Q1, a água disponível quando aplicado o endurecedor foi superior em relação aos ensaios com os endurecedores B1, Q2 e C, tendo estado o mesmo tempo sujeita à situação adversa de calor que o ensaio com Q2, menos tempo exposta que o ensaio com B1 e mais tempo que o ensaio com C. Comparando com o ensaio com o endurecedor B2, a água disponível no betão foi idêntica, apesar de ter sido sujeito às altas temperaturas durante mais tempo. A lajeta P+45\_Q1 apresentou água disponível

no betão para aplicação do endurecedor inferior em relação aos restantes ensaios, tendo estado menos tempo sob as condições extremas que os ensaios com os endurecedores B1 e Q2 e mais tempo que os ensaios com B2 e C.

Nestas duas lajetas as temperaturas registadas não diferem em demasia apesar da diferença dos túneis em se inserem. Na laje P\_Q1 foi obtida a temperatura mais elevada em relação aos outros ensaios. A humidade relativa deste ensaio foi igual à do ensaio com o endurecedor B2 (45%).

A quantidade de água adicionada durante a aplicação do endurecedor foi a mais alta na laje P+45\_Q1 (0,310 l), relativamente aos outros ensaios. À laje P\_Q1 também foi adicionada uma quantidade de água considerável de 0,301 l. Estas quantidades de água adicionada com o intuito de facilitar a aplicação do endurecedor poderão tê-lo enfraquecido, dificultando a sua integração no betão de base.

Apesar da água adicionada, estas lajetas apresentaram roturas desfavoráveis. Na laje P\_Q1 verificou-se uma rotura pelo endurecedor e outra pelo endurecedor/betão, enquanto na laje P+45\_Q1 obtiveram-se duas roturas pelo endurecedor. Dadas as quantidades de água adicionadas durante a aplicação do endurecedor, a justificação destas roturas poderá estar relacionada com o enfraquecimento do endurecedor, mas também com um inadequado acabamento. Porém, as roturas pelo endurecedor na laje P+45\_Q1 poderão estar relacionadas com o elevado estado de endurecimento do betão. Na laje P\_Q1 a tensão máxima registada foi de 2,6 MPa, verificando-se numa rotura pelo endurecedor/betão. Na laje P+45\_Q1 a tensão máxima foi de 2,7 MPa sendo a rotura pelo endurecedor.

O acabamento de ambas as lajetas foi um pouco complicado, o que resultou em áreas da superfície com algumas imperfeições, podendo ter contribuído para a obtenção das roturas menos boas.

Tabela 16 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor Q1 em P e SP

| P_Q1  | P+45_Q1   | SP_Q1  | SP+45_Q1  |
|---|---|--|---|
|    |    |    |    |
| $f_h = 2,0$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,7$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  | $f_h = 1,9$ MPa<br>Rotura <b>E</b>   | $f_h = 1,3$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|    |    |    |    |
| $f_h = 1,9$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 1,7$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,2$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>   | $f_h = 1,0$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|   |   |   |   |
| $f_h = 2,4$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  | $f_h = 2,2$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  | $f_h = 2,7$ MPa<br>Rotura <b>E</b>   | $f_h = 1,2$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,6$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>  | $f_h = 2,0$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,9$ MPa<br>Rotura <b>B</b>   | $f_h = 2,4$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,2$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,4$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,9$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>   | $f_h = 2,3$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |

A água disponível na lajeta SP\_Q1 quando aplicado o endurecedor foi inferior à dos ensaios com os endurecedores com B1, Q2 e C e esteve o mesmo tempo submetida às condições extremas impostas que o ensaio com C e menos tempo que os ensaios com B1 e Q2. A quantidade de água disponível nesta lajeta foi superior relativamente ao ensaio com o endurecedor B2, apesar de ter estado o mesmo tempo exposta às elevadas temperaturas. Na lajeta SP+45\_Q1 a quantidade de água disponível na altura da aplicação do endurecedor inferior à dos ensaios com os endurecedores B1 e Q2, estando menos tempo exposta que o ensaio com B1 e mais tempo o ensaio com Q2. Em relação aos ensaios B2 e C, a quantidade de água disponível é superior, estando sujeito às condições adversa durante menos tempo que o ensaio com B2 e mais tempo que o ensaio com C.

As temperaturas registadas no túnel da lajeta SP+45\_Q1 foram muito superiores, dado que a lajeta estava inserida no túnel 1. A temperatura registada na lajeta SP\_Q1 foi a maior em relação às temperaturas dos ensaios com os outros endurecedores. A humidade relativa foi de 36%, muito próxima à do ensaio com o endurecedor B2 (35%).

Na lajeta SP\_Q1, apenas existiu uma rotura positiva, pelo betão tendo ocorrido a meio da lajeta. As outras roturas foram, duas pelo endurecedor/betão e duas pelo endurecedor. Apesar de uma boa quantidade de água disponível no betão antes da colocação do endurecedor, a água adicionada durante a sua aplicação foi a mais baixa em relação aos outros ensaios. Possivelmente por este motivo, o endurecedor não estabeleceu a devida ligação com o betão de base, dando origem às roturas referidas. Nesta lajeta a tensão máxima registada foi de 2,9 MPa, verificando-se em duas roturas, uma pelo endurecedor/betão e outra pelo betão.

Na lajeta SP+45\_Q1, também se obteve apenas uma rotura pelo betão, tendo as outras roturas ocorrido pelo endurecedor. Neste caso, a má aderência do endurecedor ao betão poderá ser justificada pela quantidade de água adicionada durante a sua aplicação e pela quantidade de água disponível no betão antes da sua colocação, uma vez que este valor é dos mais baixos relativamente aos outros ensaios. Por outro lado, a aplicação tardia do endurecedor aliada a este factor poderá ter proporcionado as roturas mencionadas. Nesta lajeta a tensão máxima verificada foi de 2,4 MPa sendo a rotura pelo betão.

Neste ensaio o acabamento não foi fácil de atingir na lajeta SP\_Q1, apresentando algumas imperfeições. A outra lajeta não ofereceu dificuldades no acabamento, porém surgiram imperfeições, especialmente nas extremidades.

Este endurecedor, tal como os dois anteriores, poderá conter na sua composição um outro cimento que não o CEM I, o que poderá impedir uma boa incorporação do endurecedor no betão de base.

#### **4.2.5.4. Endurecedor Q2**

Nas lajetas P, verificou-se que a maioria das roturas ocorreu pelo betão em ambas as lajetas (Tabela 17). No entanto, houve 2 roturas que ocorreram pelo endurecedor/betão na lajeta P\_Q2, e uma rotura pelo endurecedor na lajeta P+45\_Q2.

A água disponível na lajeta P\_Q2 antes da colocação do endurecedor foi inferior relativamente aos ensaios com os endurecedores B1, B2 e Q1, estando mais tempo sob as condições impostas que o ensaio com o endurecedor B2, menos tempo que o ensaio com B1 e o mesmo tempo que o ensaio com Q1. Em relação ao ensaio com o endurecedor C, a quantidade de água disponível foi superior, estando mais tempo exposta às adversas condições impostas. Na lajeta P\_Q2 foi adicionada a maior quantidade de água durante a aplicação do endurecedor em comparação com os restantes ensaios (0,334 l). Apesar do possível enfraquecimento do endurecedor devido à água adicionada, verificou-se uma boa adesão do endurecedor ao betão de base. A rotura dada pelo endurecedor/betão poderá estar relacionada com a posição em que se encontra, posição 1, mais exposta à fonte de calor, o que promove maior evaporação, tanto da água disponível no betão como a adicionada ao endurecedor. A outra rotura pelo endurecedor/betão poderá ter ocorrido devido a um inadequado acabamento ou pela falta de água adicionada naquela zona durante a aplicação. A tensão máxima registada nesta lajeta foi de 2,8 MPa, verificando-se numa rotura pelo endurecedor/betão.

Na lajeta P+45\_Q2, a água disponível no betão foi inferior em relação aos ensaios com os endurecedores B1 e B2, tendo estado mais tempo exposta sob as condições extremas que o ensaio com B2 e menos tempo exposta que o ensaio com B1, superior ao ensaio com o endurecedor Q1 e igual ao ensaio com C, tendo estado mais tempo exposta que estes dois endurecedores. A quantidade de água disponível no betão

desta lajeta e a água adicionada ao endurecedor proporcionaram a obtenção de bons resultados em quase todas as roturas, pois uma das roturas ocorreu pelo endurecedor. Esta rotura poderá estar relacionada com a posição 1, pois está mais exposta à fonte de calor, o que promove maior evaporação, tanto da água disponível no betão como da adicionada ao endurecedor, impedindo uma boa ligação do endurecedor ao betão de base. Nesta lajeta a tensão máxima de 1,9 MPa verificou-se numa rotura pelo betão na lajeta.

Neste ensaio as temperaturas foram muito superiores na lajeta P+45\_Q2, sendo em simultâneo a maior temperatura registada relativamente aos outros ensaios para o mesmo instante. A humidade relativa foi de 44% e o acabamento deste ensaio não apresentou muita dificuldade.

Nas lajetas SP, verificou-se que as roturas obtidas foram apenas pelo endurecedor na lajeta SP+45\_Q2, enquanto na lajeta SP\_Q2 foram obtidas os três tipos de roturas.

A água disponível no betão na lajeta SP\_Q2 antes da colocação do endurecedor foi superior em relação aos restantes ensaios, tendo estado mais tempo exposta à situação extrema de calor que os ensaios com os endurecedores B2, Q1 e C e menos tempo exposta que o ensaio com B1. Nesta lajeta apenas foi obtida uma rotura pelo betão. Outra rotura foi obtida pelo endurecedor e poderá ter ocorrido devido à má aplicação/espalhamento do endurecedor. As outras roturas foram pelo endurecedor/betão sendo a justificação para a sua ocorrência a mesma que para a obtido pelo endurecedor. Nesta lajeta a tensão máxima registada foi de 2,8 MPa, verificando-se numa rotura pelo endurecedor/betão.

Na lajeta SP+45\_Q2 a quantidade de água disponível no betão foi superior em relação aos ensaios com os endurecedores B2, Q1 e C tendo estado menos tempo submetido às condições adversas do que estes ensaios. Em relação ao ensaio com o endurecedor B1, a quantidade de água no betão antes da colocação do endurecedor foi inferior, tendo estado menos tempo exposta às altas temperaturas. As roturas nesta lajeta ocorreram todas pelo endurecedor, tendo sido registada a tensão máxima de 2,4 MPa. Estas roturas são devidas a uma má integração do endurecedor ao betão de base devido à sua aplicação após 45 minutos da obtenção do betão de base, bem como a água disponível no betão (10,7 l/m<sup>2</sup>).

Tabela 17 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor Q2 em P e SP

| P_Q2  | P+45_Q2   | SP_Q2  | SP+45_Q2  |
|---|---|--|---|
|    |    |    |    |
| $f_h = 1,9$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>  | $f_h = 0,3$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  | $f_h = 1,7$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>   | $f_h = 1,3$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|    |    |    |    |
| $f_h = 1,9$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 1,6$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,8$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>   | $f_h = 0,1$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|   |   |   |   |
| $f_h = 1,8$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 1,9$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,6$ MPa<br>Rotura <b>E</b>   | $f_h = 2,3$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,2$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 1,7$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,0$ MPa<br>Rotura <b>B</b>   | $f_h = 1,6$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,8$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>  | $f_h = 1,6$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,5$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>   | $f_h = 2,4$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |

As temperaturas registadas foram superiores para a lajeta SP+45\_Q2 pois estava inserida no túnel 1. A humidade relativa registada foi de 36% muito próxima à do ensaio B2 (35%) e idêntica do ensaio com Q1. Em ambas as lajetas obteve-se o melhor acabamento, embora a lajeta SP+45\_Q2 tenha apresentado melhor aspecto.

#### 4.2.5.5. Endurecedor C

Para este endurecedor, as lajetas P apresentaram melhores resultados que as lajetas SP, uma vez que estas, em ambos os instantes, apresentaram roturas pelo endurecedor quase na sua totalidade (Tabela 18).

Na lajeta P\_C, a água disponível antes da aplicação do endurecedor foi inferior à dos restantes ensaios com os endurecedores B1, B2, Q1 e Q2, apesar de ter estado menos tempo sob as condições impostas em relação aos mesmos ensaios. Nesta lajeta apenas ocorreu uma rotura pelo endurecedor/betão que poderá estar relacionada com aplicação do endurecedor, o afagamento ou a falta de água adicionada durante a aplicação naquela zona. Todas as outras roturas foram pelo betão. A tensão máxima registada foi de 2,6 MPa, verificando-se numa rotura pelo betão.

A água no betão antes da colocação do endurecedor na lajeta P+45\_C foi inferior em relação aos ensaios com B1 e B2, tendo a lajeta estado menos tempo exposta às condições extremas de calor que estes. Relativamente ao com Q1, a lajeta esteve menos tempo submetida às condições impostas, tendo mais água disponível no betão. Comparando com o ensaio com Q2, a água disponível é idêntica, tendo estado exposta menos tempo. Nesta lajeta, a rotura dada pelo endurecedor encontra-se na posição 1, a mais próxima da fonte de calor, o que provoca maior evaporação da água do betão e da água adicionada à aplicação do endurecedor, impossibilitando uma boa incorporação deste. A rotura pelo endurecedor/betão poderá estar relacionada com um impróprio acabamento, falta de água naquela zona e a proximidade da posição 2 da fonte de calor.

Na lajeta P\_C a tensão máxima registada foi de 2,6 MPa, verificando-se numa rotura pelo betão. Na lajeta P+45\_C a tensão máxima verificada foi de 1,9 MPa sendo a rotura pelo endurecedor.

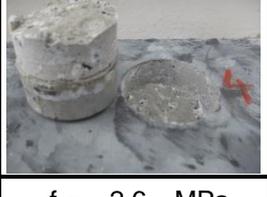
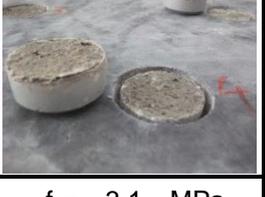
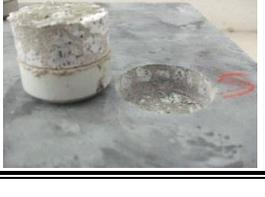
As temperaturas foram inferiores para a lajeta P\_C, embora não tenha havido grandes diferenças. A humidade relativa foi a segunda maior, registando-se 51%. O acabamento para ambas as lajetas ofereceu poucas dificuldades, embora a lajeta P\_C tenha ficado com a superfície áspera.

Convém, referir que este endurecedor, tal como o endurecedor B2, apresenta uma maior percentagem de material retido (17,7%) no peneiro de 2 mm, o que dificulta a criação da pasta na aplicação do endurecedor e o seu afagamento, e pode contribuir para impedir um bom acabamento, com boa ligação entre o endurecedor e o betão de base.

Na lajeta SP\_C a água disponível quando aplicado o endurecedor foi superior à dos ensaios com os endurecedores B2 e Q1 apesar de ter estado o mesmo tempo exposta às condições extremas que esses ensaios. Em relação aos ensaios com os endurecedores B1 e Q2, esteve menos tempo sujeito às condições adversas e a água disponível no betão é também inferior às destes ensaios. Nesta lajeta apenas houve uma rotura pelo betão, sendo todas as outras pelo endurecedor. As roturas pelo endurecedor poderão estar relacionadas com a aplicação do endurecedor e um inadequado afagamento, ou com a falta de água durante a aplicação do endurecedor. Nesta lajeta a tensão máxima registada foi de 2,9 MPa, verificando-se em duas roturas: uma pelo endurecedor e outra pelo betão.

Na lajeta SP+45\_C, a água disponível no betão foi inferior relativamente às dos ensaios com os endurecedores B1, Q1 e Q2, tendo estado submetida a altas temperaturas durante mais tempo que o ensaio com o endurecedor Q2 e menos tempo que os ensaios com B1 e Q1. Em relação ao ensaio com B2, a água no betão foi superior e a lajeta esteve menos tempo exposta às condições adversas. Neste ensaio as roturas obtidas foram todas pelo endurecedor, tendo como justificação a alta temperatura no túnel em que a lajeta se inseria, pois este valor foi o mais elevado em relação a todos os ensaios em ambas as composições. A alta temperatura poderá ter contribuído para o aumento da evaporação da água do betão como da água adicionada ao endurecedor, o que não propicia uma boa integração do endurecedor ao betão de base. Além deste factor, tem que se ter em conta o instante tardio em que o endurecedor foi aplicado. Nesta lajeta a tensão máxima verificada foi de 3,1 MPa sendo a rotura também pelo endurecedor.

Tabela 18 - Resultados ao arrancamento por pull-off - Endurecedor C em P e SP

| P_C   | P+45_C  | SP_C   | SP+45_C   |
|---|---|--|---|
|    |    |    |    |
| $f_h = 1,8$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 1,9$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  | $f_h = 0,5$ MPa<br>Rotura <b>E</b>   | $f_h = 0,4$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|    |    |    |    |
| $f_h = 2,0$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>  | $f_h = 1,4$ MPa<br>Rotura <b>E/B</b>  | $f_h = 2,2$ MPa<br>Rotura <b>E</b>   | $f_h = 0,2$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|   |   |   |   |
| $f_h = 2,2$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 1,8$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,9$ MPa<br>Rotura <b>E</b>   | $f_h = 0,7$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,0$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 1,6$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,6$ MPa<br>Rotura <b>E</b>   | $f_h = 0,3$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |
| $f_h = 2,6$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 1,7$ MPa<br>Rotura <b>B</b>  | $f_h = 2,9$ MPa<br>Rotura <b>B</b>   | $f_h = 3,1$ MPa<br>Rotura <b>E</b>  |
|  |  |  |  |

Neste ensaio as temperaturas foram superiores na lajeta SP+45\_C. Como já foi referido a temperatura máxima em todos os ensaios em ambas as composições foi obtida nesta lajeta e a humidade relativa de 50% foi a mais alta relativamente a esta composição de betão.

Nestas lajetas não foram sentidas dificuldades no acabamento, embora tenham surgido algumas imperfeições, em particular, o aparecimento de alguma microfissuração na superfície da lajeta SP+45\_C. Esta dificuldade, tal como no caso do endurecedor B2, poderá ter sido devido à elevada percentagem de material retido no peneiro de 2 mm (17,7%)

#### **4.2.6. Determinação do índice esclerométrico**

Neste ponto são apresentados os valores obtidos através do ensaio para a determinação do índice esclerométrico, no entanto são apenas expostos os que foram considerados validados segundo a norma NP EN 12504-2: 2012.

Convém referir que os valores apresentados são a mediana de um conjunto de 9 leituras. A diferença de resultados expostos entre lajetas tem a ver com o facto de vários conjuntos de leituras não terem sido validados para análise, visto que 20 % das leituras em cada um desses conjuntos diferiam da mediana em mais de 30% (NP EN 12504-2: 2012). No Anexo L, é possível consultar todos os dados obtidos para no ensaio de determinação do índice esclerométrico.

Comparando os gráficos das Figuras 78 e 79 verifica-se que os resultados, apesar de dispersos, são muito semelhantes em ambas as composições de betão de base. A dispersão de resultados poderá ser devido a diferenças na espessura do endurecedor e possível variação de agregados, tanto nos endurecedores como no betão. O tipo de agregado nos endurecedores poderá igualmente contribuir para esta dispersão.

Analisando o gráfico da Figura 78 não é possível estabelecer uma diferença entre o instante 8,5 MPa e o instante 8,5 mais 45 minutos.

De acordo com o referido em relação às granulometrias dos endurecedores era expectável que se obtivessem valores superiores para os endurecedores B2 e C,

devido à maior granulometria que estes apresentam no peneiro de 2 mm, 18,2% e 17,7% respectivamente.

Porém, é importante ter em conta também as características típicas dos endurecedores consoante o agregado presente na sua composição, o endurecedor C é o que apresenta maior dureza e maior resistência à compressão, seguido dos endurecedores Q1 e Q2 e por fim os endurecedores B1 e B2 (Tabela 1). Com base neste pressuposto, seria de esperar que as resistências à compressão obtidas através deste ensaio fossem maiores para o endurecedor C, seguido dos endurecedores Q1 e Q2 e dos endurecedores B1 e B2.

No gráfico da Figura 78 o valor mais elevado, 41 MPa, pertence à lajeta com endurecedor Q1. Este valor, não estando enquadrado com o referido nos dois parágrafos anteriores, pode ser devido à presença de um agregado britado situado na zona onde foi feito o ensaio o que conduziu ao aumento da dureza naquele ponto da superfície. Além disso, existe a possibilidade de uma maior espessura de endurecedor nesta zona levando ao aumento do valor de resistência à compressão registado.

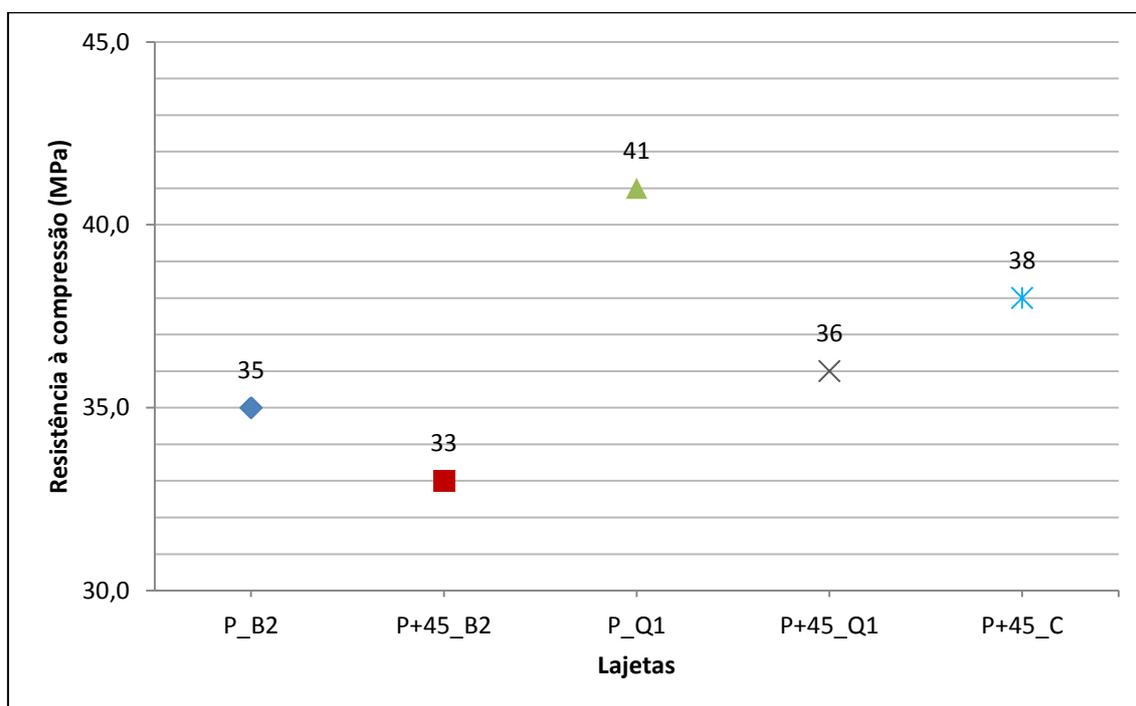


Figura 78 - Índice esclerométrico - lajetas P

O valor referente ao endurecedor C, que deveria ser mais elevado, surge como o segundo maior, provavelmente devido a uma menor espessura do endurecedor na zona ensaiada.

O valor correspondente ao endurecedor B2 surge como o mais correcto tendo em conta as características dos endurecedores com basalto. Considerando a sua granulometria no peneiro de 2 mm, o valor poderia ser um pouco superior.

No gráfico da Figura 79 verifica-se que os valores obtidos para o instante 8,5 MPa são superiores em relação aos valores obtidos para o instante 8,5 MPa mais 45 minutos. A lajeta SP\_C é a excepção, uma vez que o valor obtido aproxima-se dos valores para o instante 8,5 MPa mais 45 minutos. Porém, a diferença entre os valores superiores e inferiores é na generalidade cerca de 10 MPa.

Como já foi referido, esperavam-se valores superiores para os endurecedores B2 e C, tendo em conta as suas granulometrias, e valores superiores para o endurecedor C tendo em conta as características dos endurecedores com corindo. No entanto, verifica-se valores próximos entre todos os endurecedores consoante o instante em que se inserem.

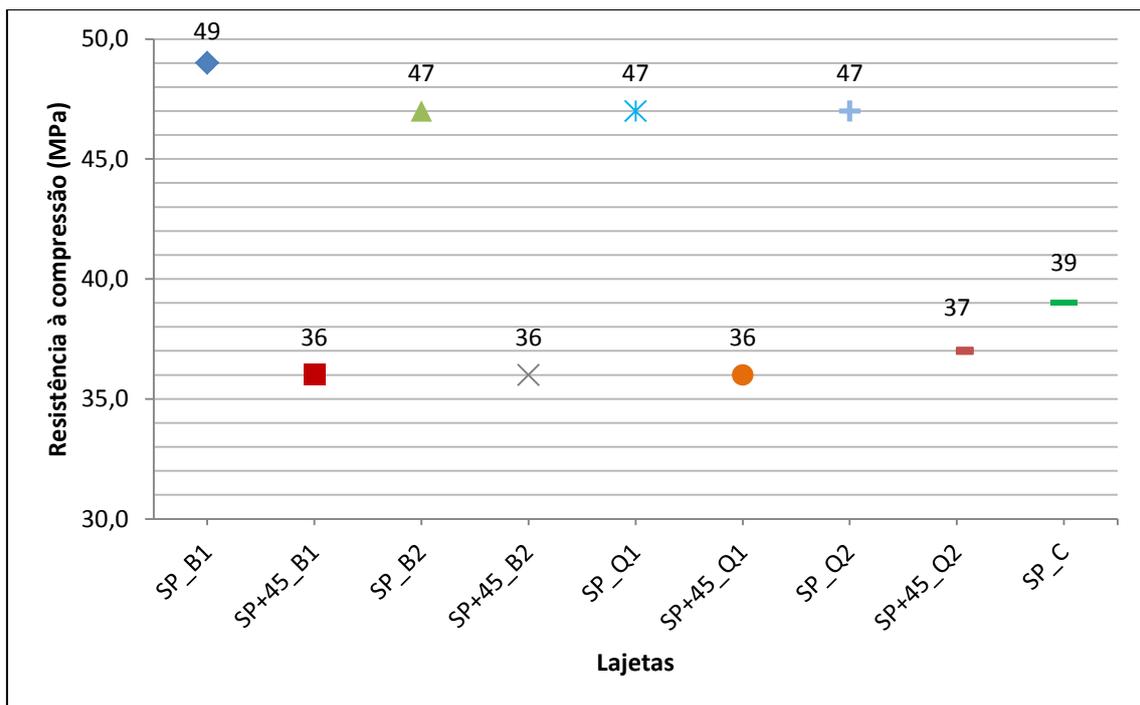


Figura 79 - Índice esclerométrico - lajetas SP

Desta forma, esta diferença não está relacionada nem com as características típicas dos endurecedores, nem com as suas granulometrias, visto que os resultados não se enquadram com o referido neste âmbito. A justificação para os valores mais elevados para as lajetas SP\_B1, SP\_B2, SP\_Q1 e SP\_Q2 poderá estar relacionada com a

presença de agregado britado à superfície do betão nas zonas ensaiadas, ou maiores espessuras de endurecedor nessas mesmas zonas.

Confrontando os valores mais elevados do gráfico da Figura 79 com a generalidade dos valores do gráfico da Figura 78, pode-se dizer que a utilização do adjuvante SP possibilita a obtenção de betões mais compactos e densos, proporcionado um maior número de resultados entre os 45 e 50 MPa. Este facto é verificado se for observado o endurecedor B2 no instante 8,5 MPa nas duas composições de betão de base.

Analisando os dois gráficos em conjunto, e tendo em conta que os valores mais elevados encontram-se associados ao instante 8,5 MPa com excepção dos valores das lajetas PB\_2 e SP\_C, pode-se dizer que este instante permite obter uma dureza superior à superfície, qualquer que seja a composição do betão de base.

De certa forma, este facto vai de encontro aos resultados obtidos no ensaio de arrancamento por pull-off, visto que as roturas pelo endurecedor ocorriam na generalidade e com maior frequência nas lajetas em que a aplicação do endurecedor era feita 45 minutos após a obtenção do valor de 8,5 MPa.

Contudo, há que ter em conta os factores da variação de agregados no betão ou a espessura do endurecedor aplicado, podendo serem estas as verdadeiras causas para a discrepâncias detectadas.

### **4.3. Resistência à compressão do betão de base**

Quanto à resistência à compressão convém referir que a comparação é feita entre duas composições de betão de base com classe de consistência igual (S3), apenas diferindo no tipo de adjuvante que é adicionado: uma com um adjuvante plastificante (P) e outra com um adjuvante superplastificante (SP). Este facto implica que a quantidade de água seja maior numa composição que na outra e como consequência razões de A/C também diferentes.

Voltando à Tabela 8 é possível verificar que as quantidades dos constituintes são muito idênticas para ambas as composições, porém tem-se uma razão de A/C maior para a composição com adjuvante plastificante do que para a composição com adjuvante superplastificante. Este dado pode ser relevante na medida em que uma

composição hidrata com menos quantidade de água do que outra, podendo ter como consequências, ligeiras diferenças tanto na trabalhabilidade como nas resistências.

Além da comparação entre as duas composições, é feita também uma comparação entre as resistências obtidas em provetes cúbicos com 15 cm de aresta e provetes cilíndricos com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro.

No gráfico da Figura 80 é possível observar as resistências para os provetes cúbicos obtidas aos 3, 7 e 28 dias. As resistências dos provetes cilíndricos foram obtidas aos 28 dias e estão indicadas no gráfico da Figura 81.

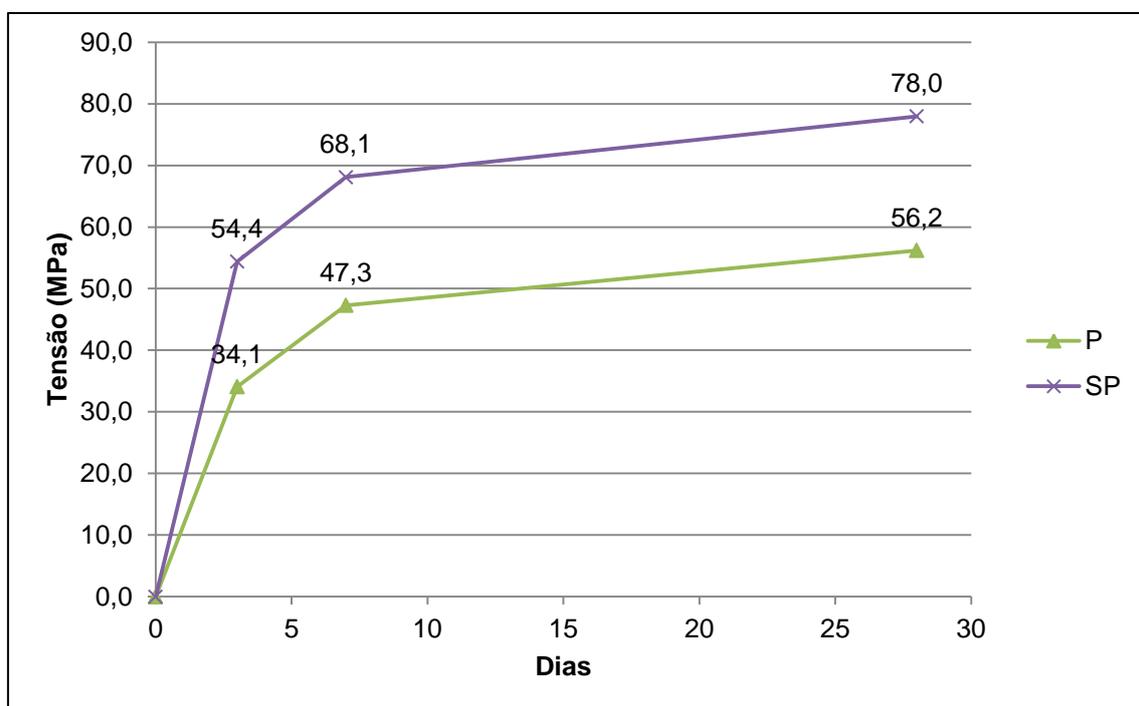


Figura 80 - Resistência à compressão - provetes cúbicos

Relativamente aos provetes cúbicos, é possível verificar um crescimento progressivo da resistência ao longo do tempo para ambas as composições.

A composição com adjuvante SP apresenta desde as primeiras idades valores de resistência superiores à composição com adjuvante P. Esta ocorrência deve-se ao adjuvante SP, que dado ser um superplastificante (forte redutor de água), a composição possui ainda menos quantidade de água tornando o betão muito mais compacto, e como consequência proporciona maiores resistências à compressão ao longo do tempo.

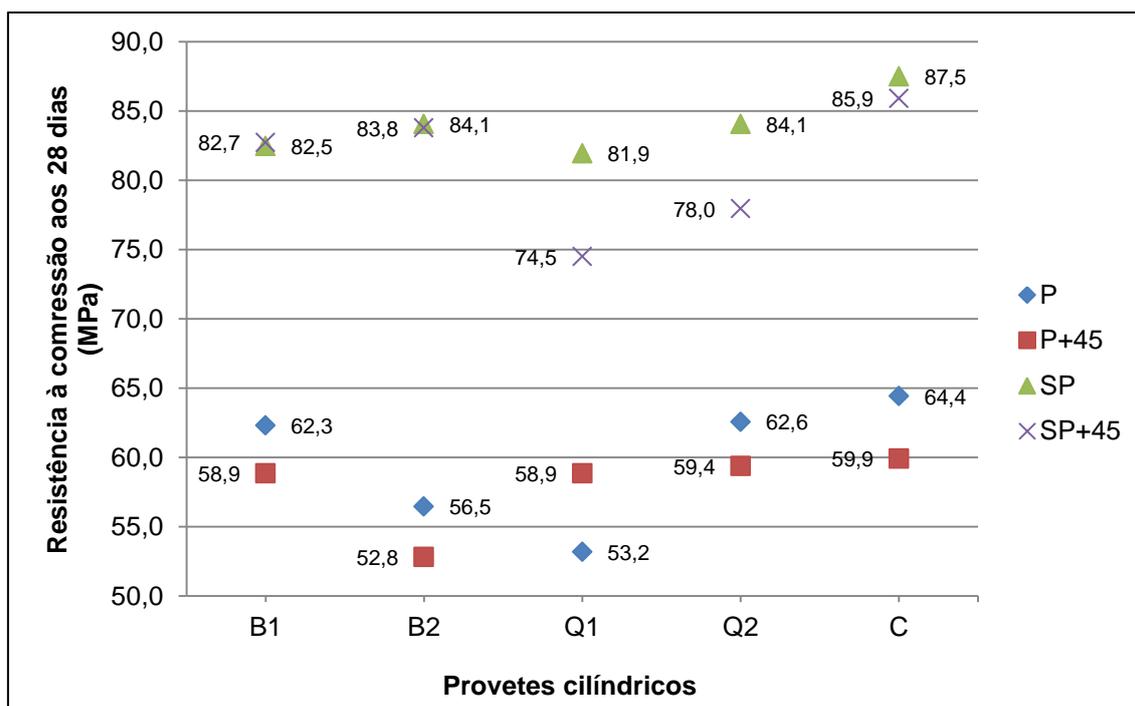


Figura 81 - Resistência à compressão - Provetes cilíndricos

Todos os provetes cilíndricos foram extraídos a meio da lajeta (Figura 46), tendo alguns deles apresentados fissuras, nomeadamente, um dos provetes extraído da lajeta P+45\_B2, outro da lajeta P\_Q1 e outro da lajeta P+45\_Q1.

Em relação aos provetes cilíndricos, a sua capacidade resistente à compressão foi obtida aos 28 dias e ambas as composições apresentam valores muito próximos às correspondentes resistências à compressão dos provetes cúbicos. Verificam-se ligeiros aumentos da capacidade resistente, os quais podem ser devidos à menor dimensão do provete cilíndrico.

No Anexo G, podem ser consultados sob a forma de tabelas os dados da resistência à compressão dos provetes cúbicos. Os dados relativos aos provetes cilíndricos podem ser consultados sob a forma de tabelas no Anexo H.

#### 4.4. Considerações gerais sobre os resultados obtidos

Neste ponto é feita uma análise global dos resultados obtidos de forma a compreender qual a melhor composição para a aplicação de endurecedor de superfície, a influência que o tipo e quantidade de ligante presente no endurecedor tem na sua aplicação, o

efeito que o tipo de agregado presente no endurecedor tem na sua aplicação, e a relação que os endurecedores têm entre si conforme o ligante e o tipo de agregado presente na sua constituição.

Tendo em conta a taxa de evaporação verifica-se que a água que fica disponível na composição com o adjuvante P é superior em relação à composição com adjuvante SP. Este facto permite dizer que a composição com adjuvante P dispõe de maior quantidade de água disponível no betão antes da aplicação do endurecedor, tanto para a hidratação do próprio betão como para o endurecedor a aplicar. Desta forma, o endurecedor tem maiores probabilidades que criar uma boa ligação com o betão de base.

Considerando os resultados obtidos para os ensaios de resistência à penetração é possível dizer que a composição com adjuvante P demora mais tempo a atingir o instante 8,5 MPa, ou seja, desenvolve mais lentamente o seu estado de presa, proporcionando maior disponibilidade de tempo para a aplicação do endurecedor até ao acabamento final, permitindo uma melhor adesão entre o endurecedor e o betão de base.

O adjuvante P tem influência na composição do betão de base, na medida em que sendo um redutor de água dispõe de maior quantidade água e menor quantidade de ligante em comparação com a composição com adjuvante SP, o que possibilita maior quantidade de água disponível no betão para reagir com o endurecedor e promover a sua integração no betão de base. Por sua vez, a composição com adjuvante SP, contém menos água e mais ligante, conduzindo à obtenção de maiores resistências à compressão.

Com base nos resultados obtidos na determinação da massa volúmica, do resíduo insolúvel e da perda ao fogo, é possível dizer que nem todos os endurecedores têm o mesmo tipo de ligante. Os endurecedores B1, B2 e Q1 poderão conter um ligante com carácter mais expansivo, que não o CEM I, o que pode impedir uma eficaz ligação do endurecedor ao betão de base. De acordo com os resultados obtidos na perda ao fogo, pode-se dizer que os endurecedores Q2 e C têm na sua constituição o ligante CEM I. O ensaio da determinação do resíduo insolúvel não foi conclusivo devido à presença de agregado com ligante nas amostras analisadas. Por isso, relacionando os valores obtidos na determinação da massa volúmica com a percentagem de material passado no peneiro de 0,250 mm foi possível estimar que, independentemente do tipo

de ligante, os endurecedores Q1, B2 e Q2 são os endurecedores que apresentam maior quantidade de ligante, enquanto os endurecedores B1 e C apresentam a menor quantidade.

Os resultados referentes ao arrancamento por pull-off permitem verificar que a maioria das roturas pelo betão, evidenciando uma boa ligação entre este e o endurecedor, ocorreu no instante 8,5 MPa em ambas as composições. Porém a composição com adjuvante P possibilitou um maior número de roturas pelo betão em detrimento da composição com adjuvante SP. A generalidade das roturas pelo endurecedor, evidenciando uma má ligação entre o endurecedor e o betão, ocorreu quando a aplicação do endurecedor foi feita 45 minutos depois da obtenção do valor de 8,5 MPa, em especial na composição com adjuvante SP.

Na determinação do índice esclerométrico, apesar da obtenção de valores de resistência à superfície superiores para o instante 8,5 MPa, não é possível dizer que este é o instante indicado para a aplicação do endurecedor, visto que apenas se tem como resultados mais expressivos, os obtidos para a composição com adjuvante SP. Os valores obtidos para o instante 8,5 MPa mais 45 minutos foram muito semelhantes para as duas composições. Este ensaio é inconclusivo uma vez que não foi possível averiguar a espessura do endurecedor em toda a área em que foi aplicado, nem a existência ou não de um agregado britado situado à superfície do betão, o que condiciona o aumento das resistências averiguadas.

Em relação aos endurecedores é possível dizer que todos tiveram melhores ligações com o betão de base na composição com adjuvante P, independentemente do tipo de agregado, com exceção do endurecedor de basalto B2, que foi o endurecedor que obteve piores resultados, sendo que as roturas foram quase na totalidade dadas pelo endurecedor. Este endurecedor apresenta um elevado teor de outro ligante que não o CEM I, sendo a sua quantidade a segunda mais elevada em relação aos outros endurecedores, apresentando também a maior percentagem de material retido no peneiro de 2 mm.

Contudo os melhores resultados foram obtidos com um endurecedor de basalto, B1. Apesar de os dois conterem outro ligante que não o CEM I, o B2 contém um teor superior visto que o resultado da perda ao fogo foi o mais elevado em relação a todos os outros endurecedores. O segundo endurecedor a obter piores resultados foi o endurecedor de quartzo Q1, que também poderá conter outro tipo de ligante, sendo o

seu teor o mais elevado em relação aos outros endurecedores. Este endurecedor possibilitou melhores resultados na composição com adjuvante P que na composição com SP.

Os endurecedores Q2 e C possuem na sua composição o cimento CEM I segundo os resultados obtidos para a perda ao fogo, sendo o teor de ligante do endurecedor C o menor em relação a todos os outros, e o teor do endurecedor Q2 o terceiro maior. As roturas obtidas no arrancamento por pull-off foram também muito semelhantes em ambas as composições, tendo ocorrido os melhores resultados no instante 8,5 MPa.

Na Tabela 19, a informação mais relevante aparece compilada possibilitando obter uma visão geral de todo o trabalho realizado e permitindo ir de encontro aos objectivos estabelecidos.

**Tabela 19 - Comparação dos endurecedores**

| Endurecedor  |   | B1      | B2      | Q1      | Q2      | C       |
|--|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| Quantidade de material retido no peneiro de 2 mm<br>(1 : maior → 5 : menor)  |   | 3       | 1       | 5       | 4       | 2       |
| Ligante  | Estimativa do teor<br>(1 : maior → 5 : menor) | 4       | 2       | 1       | 3       | 5       |
|  | Tipo  | outro   | outro   | outro   | CEM I   | CEM I   |
| Tipo de agregado   |   | basalto | basalto | quartzo | quartzo | corindo |
| Melhor instante para a aplicação   | Composição com P                              | 8,5 MPa | -       | 8,5 MPa | 8,5 MPa | 8,5 MPa |
|  | Composição com SP                             | 8,5 MPa | -       | 8,5 MPa | 8,5 MPa | -       |
| Composição com melhores resultados<br>(pull-off)                             |   | P       | -       | P       | P       | P       |
| Endurecedor com melhores resultados<br>(pull-off)<br>(1 : melhor → 5 : pior) | Composição com P                              | 1       | 5       | 4       | 3       | 2       |
|  | Composição com SP                             | 1       | 5       | 2       | 3       | 4       |

Analisando a Tabela 19 é possível comparar os endurecedores e tirar as primeiras conclusões.

Comparando os endurecedores B1 e B2, pode-se dizer que apesar de serem ambos de basalto e possuírem um ligante que não o CEM I produzem resultados contrários. A justificação pode estar relacionada com a quantidade de ligante presente em cada um deles, mas também com a quantidade de agregado grosso. Enquanto o endurecedor

B1 tem o segundo menor teor de ligante e a terceira maior quantidade de agregado grosso em relação a todos os outros endurecedores, o endurecedor B2 apresenta a segunda maior quantidade de ligante e a maior quantidade de agregado grosso em relação a todos os outros. O melhor instante para a aplicação do endurecedor B2 não foi possível averiguar visto que, com este endurecedor os resultados foram os piores nos dois instantes estipulados, tendo sido obtidas o maior número de roturas pelo endurecedor relativamente aos outros endurecedores. Para o endurecedor B1 é possível dizer que o melhor instante para a sua aplicação é aos 8,5 MPa. Este endurecedor proporcionou os melhores resultados em ambas as composições, tendo o maior número de roturas pelo betão em comparação com todos os outros endurecedores.

Os endurecedores Q1 e Q2 são de quartzo, mas possuem ligantes diferentes na sua composição e em quantidades diferentes, ainda que muito próximas. No entanto, o melhor instante para a aplicação de ambos não deixa de ser o mesmo para as duas composições de base (8,5 MPa). Em relação aos resultados obtidos por pull-off, estes são muito próximos entre os dois endurecedores para ambas as composições. O endurecedor Q1 possibilitou melhores resultados que o Q2 na composição com SP, enquanto o Q2 originou melhores resultados que o Q1 na composição com P. O endurecedor Q2 pode ser considerado o endurecedor intermédio uma vez que com este endurecedor foi obtido um número de roturas pelo endurecedor e um número de roturas pelo betão muito semelhantes em ambas as composições.

O endurecedor C, de corindo, possui na sua constituição o ligante indicado pelo fabricante, sendo a sua quantidade a menor relativamente a todos os outros endurecedores. O melhor instante para a aplicação deste endurecedor verifica-se aos 8,5 MPa para a composição com P. Para a composição com SP, não foi possível constatar, uma vez que as roturas ocorrem quase na totalidade pelo endurecedor. Os resultados obtidos pelo pull-off com este endurecedor são completamente contrários, verificando-se os segundos melhores resultados em termos de roturas para a composição P e os segundos piores resultados para a composição com adjuvante SP relativamente aos outros endurecedores.

Relativamente às composições do betão de base, verifica-se que o melhor instante para aplicação de todos os endurecedores é aos 8,5 MPa em qualquer uma das composições, pois são promovidas maior número de roturas pelo betão. Neste instante a água disponível do betão à superfície ainda não evaporou completamente, o

que proporciona adesões mais eficazes entre os endurecedores e o betão. No instante 8,5 MPa mais 45 minutos, a superfície das lajetas apresentou-se em algumas ocasiões bastante ressequida, observando-se por vezes algum encrostamento.

A composição com adjuvante P foi a que promoveu a obtenção de melhores resultados para todos os endurecedores. Este facto deve-se à maior quantidade de água que o betão possui o que permite uma melhor hidratação dos endurecedores aplicados. Além disso, a velocidade de endurecimento deste betão é mais lenta, dando mais tempo para a aplicação dos endurecedores e consequente acabamento. A composição com adjuvante SP possui menos água e o endurecimento do betão desenvolve-se com maior rapidez, o que pode conduzir a ligações mais fracas entre os endurecedores e o betão.

No geral, pode-se dizer que quanto menos ligante existir num endurecedor maior a probabilidade de ocorrência de roturas pelo betão. A presença de outro ligante que não o CEM I nos endurecedores pode ser um factor que impeça uma boa ligação destes ao betão de base. O agregado grosso presente em cada um dos endurecedores também pode influenciar a sua incorporação no betão de base, já que dificulta as operações de afagamento, e posteriormente conduz a possíveis más ligações endurecedor/betão.

Os endurecedores de quartzo e o endurecedor de corindo apresentam comportamentos semelhantes entre si, enquanto o comportamento dos endurecedores de basalto verifica-se oposto. As razões para estes factos poderão estar relacionadas com as quantidades de ligante e de agregado grosso presente em cada um dos endurecedores. Apesar dos endurecedores B1 e C possibilitarem a obtenção de resultados satisfatórios semelhantes, nota-se a ligeira superioridade do endurecedor B1 mesmo contendo outro ligante que não o CEM I e mais ligante que o endurecedor C. Neste caso, a quantidade de agregado grosso é importante na medida em que poderá ter sido este o factor que conduziu a um pior comportamento do endurecedor C, visto que este contém mais agregado grosso que o endurecedor B1.

O tipo de agregado pode ter alguma influência na aplicação visto que o afagamento diferiu em cada um dos ensaios. Neste aspecto pode-se dizer que no afagamento existiu alguma dificuldade, visto que a superfície das lajetas não continha água suficiente que proporcionasse a criação de pasta com o endurecedor aplicado, sendo necessária a adição de água. Todos os outros endurecedores ofereceram dificuldades

em afagar inicialmente pelo mesmo motivo. O endurecedor B2 foi o que ofereceu mais dificuldade no afagamento inicial, devido ao material mais grosseiro que o constitui, chegando a sentir-se no disco do afagador. Este endurecedor apresentou a maior percentagem de material retido no peneiro de 2 mm, em comparação com todos os outros. O endurecedor C continha uma percentagem relativamente inferior em relação ao endurecedor B2, mas o afagamento fez-se sem dificuldades. Globalmente, todas as lajetas proporcionaram o acabamento pretendido embora tenha-se verificado sempre algumas imperfeições como destacamento e aspereza, sobretudo nos cantos e ao longo das extremidades das lajetas.

De uma maneira geral os melhores resultados, relativamente ao ensaio de arrancamento por pull-off, foram obtidos com o endurecedor B1, seguido dos endurecedores Q1, Q2 e C, sendo o endurecedor B2 o que proporcionou os piores resultados. Em relação ao acabamento final das lajetas, o melhor foi obtido com o endurecedor B1, seguido dos endurecedores Q2, C e Q1. O pior acabamento foi obtido com o endurecedor B2

## 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 5.1. Conclusões

O trabalho desenvolvido permitiu a percepção da existência de informação e investigação no que se refere à utilização de adjuvantes e endurecedores de superfície, ainda que apresentem resultados inconclusivos. Com base neste pressuposto, a presente dissertação foi desenvolvida com a intenção de contribuir para maior conhecimento sobre o assunto.

No que diz respeito à análise de resultados obtidos, podem ser consideradas as seguintes conclusões:

- o endurecedor B1, mesmo contendo outro ligante na sua composição que não o CEM I, apresentou os melhores resultados em todos os aspectos, essencialmente devido às menores quantidades de ligante e agregado grosso que apresenta em relação aos outros endurecedores. Este é o melhor endurecedor para aplicação em condições extremas de vento e calor, de preferência aplicado numa composição com adjuvante P em qualquer dos instantes ou numa composição com SP no instante 8,5 MPa;
- o endurecedor B2 apresentou os piores resultados em todos os aspectos, e por isso não é aconselhável para aplicação em condições extremas devido ao ligante que o compõe (provavelmente CEM II A/L), mas principalmente devido às quantidades de ligante e de material mais grosseiro, que são as maiores em relação aos outros endurecedores;
- o tipo de cimento presente na composição dos endurecedores não tem grande influência na sua integração no betão de base, sendo a quantidade de ligante a condição para uma boa ligação endurecedor/betão. A quantidade de ligante influencia a ligação do endurecedor ao betão de base, na medida em que quanto menor for o teor em ligante melhor a ligação estabelecida entre este e o betão de base;
- o endurecedor com maior teor de ligante é o Q1, seguido do B2, Q2 e B1. O endurecedor com menor teor de ligante em relação a todos os outros é o endurecedor C;
- o tipo de agregado presente no endurecedor não tem grande influencia na ligação deste ao betão de base, sendo a quantidade de agregado grosso o factor que

condiciona os afagamentos iniciais necessários para uma boa adesão endurecedor/betão. Deste modo, quanto maior for a quantidade de material mais grosseiro, mais difícil é o afagamento inicial e a obtenção de uma boa ligação endurecedor/betão;

- o endurecedor com maior quantidade de material grosseiro é o B2, seguido do C, B1 e Q2. O endurecedor com menor quantidade de material grosseiro em relação a todos os outros é o endurecedor Q1;
- a composição com adjuvante P permite mais tempo até à obtenção do valor de 8,5 MPa e mais água no betão para aplicar o endurecedor, proporcionando melhores ligações endurecedor/betão;
- a composição com adjuvante SP atinge mais rapidamente o valor de 8,5 MPa e proporciona um betão mais hidratado (menos água), proporcionando piores ligações endurecedor/betão, mas maior resistência à compressão;
- as roturas pelo betão, que evidenciam uma boa ligação endurecedor/betão, ocorrem com maior frequência quando o endurecedor é aplicado imediatamente após a obtenção do valor 8,5 MPa, verificando-se com maior incidência na composição com adjuvante P;
- as roturas pelo endurecedor ou pela ligação, que evidenciam uma má ligação endurecedor/betão, ocorrem com maior frequência quando o endurecedor é aplicado após a obtenção dos 8,5 MPa, verificando-se maior incidência na composição com adjuvante SP;
- no que diz respeito à obtenção de ligações endurecedor/betão mais favoráveis para as menos favoráveis tem-se como melhor endurecedor o B1, seguido dos endurecedores Q1, Q2, C e B2;
- apesar de terem agregado e ligante diferentes na sua composição, os endurecedores B1 e C possibilitam comportamentos semelhantes devido à reduzida quantidade de ligante comparada com a dos outros endurecedores, podendo ser aplicados em condições extremas em qualquer composição e instante;
- os endurecedores Q1 e Q2, apesar de serem de fabricantes diferentes, terem ligantes diferentes, mas quantidades destes e de material grosso muito próximas, são muito parecidos, proporcionando um conjunto de resultados semelhantes, podendo ser aplicados em condições extremas, preferencialmente em composições com adjuvante P no instante 8,5 MPa;

- a adição de água é importante na aplicação do endurecedor de forma a promover a criação de pasta, de modo a facilitar o afagamento e a aderência do endurecedor ao betão, a qual não necessariamente ocorrerá;
- para a obtenção de uma superfície lisa e brilhante interessa fazer os afagamentos que forem necessários, tendo sido obtido como melhor acabamento o endurecedor o B1, seguido dos endurecedores Q2, C, Q1 e B2,
- a resistência à compressão da superfície está relacionada, não com o tipo de agregado, mas com a espessura do endurecedor aplicado e com a variação dos agregados no betão.

## 5.2.Desenvolvimentos futuros

De forma a reunir ainda mais conhecimento sobre este tema, e visto que a evolução dos produtos de construção está em constante evolução, penso que seja necessário realizar novos estudos em que se apliquem outros tipos de endurecedores, inovando os ensaios a realizar e utilizando composições de betão base mais diversificadas.

Em relação aos endurecedores, penso que seja necessário realizar ensaios mais específicos de forma a averiguar qual o melhor estado de presa do betão de base para a aplicação de determinado tipo de endurecedor, tendo em conta as condições climatéricas da obra a executar, de forma a promover a melhor ligação endurecedor/betão possível.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### LIVROS / ARTIGOS / DISSERTAÇÕES

**Broekmans, M.** (2004). Microscale sedimentar transport phenomena reveal the origin of delamination in an industrial floor. *Materials Characterization*. 53: 233-241.

**Fernandes, A. A.** (2012). *Compatibilidade de diferentes tipos de betões de base com adições e endurecedores de superfície de quartzo*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade de Évora, Évora.

**Oliveira, L. A.** (2010). *Dissertação e Tese em Ciência e Tecnologia Segundo Bolonha*. LIDEL. Lisboa.

**Pimenta, J. G.** (2008). *Pavimento Urbano: Adequação ao Uso – Reflexões a Propósito do Espaço Público no Contexto do Centro Histórico de Lisboa*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Arquitectura. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

**Schumann, W.** (2001). *Guia dos Minerais*. Editorial Presença. Barcarena

**Sequeira, A. R.** (2012). *Influência dos adjuvantes no comportamento de um endurecedor de superfície de quartzo aplicado em diferentes betões de base*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade de Évora, Évora.

### FICHAS TÉCNICAS

#### ENDURECEDORES

**Ficha Técnica Durochape**, Duro-Europa, Fabricação de Produtos Endurecedores de Pavimentos Lda, Grupo FGO (2007).

**Ficha Técnica Prochape**, JRP, Produtos & Revestimentos para Construção Civil S.A., Grupo TPB (Janeiro de 2009).

**Ficha Técnica Produr**, JRP, Produtos & Revestimentos para Construção Civil S.A., Grupo TPB (Janeiro de 2009).

**Ficha Técnica Sibasal**, SIB, Sociedade Industrial de Britagem de Pedra Lda (2007).

**Ficha Técnica Sibquartzo**, SIB, Sociedade Industrial de Britagem de Pedra Lda (Dezembro de 2011).

**Ficha Técnica Superquartz**, Duro-Europa, Fabricação de Produtos Endurecedores de Pavimentos Lda, Grupo FGO (2007).

#### ADJUVANTES

**Ficha Técnica Pozzolith® 390 NP**, Prontuário da BASF Chemical Products Portugal (Edição de 2010), pp. 97-98.

**Ficha Técnica Sikaplast® 898**, SIKA, Sika Portugal S.A. (Edição de Abril de 2011).

#### CIMENTO E AGREGADOS

**Ficha Técnica CEM II/A-L 42,5R**, SECIL, Secil Companhia Geral de Cal e Cimento S.A. (Setembro de 2004).

**Resultados do autocontrolo – Valores médios**, CEM II/A-L 42,5R, 10 de Maio de 2011, Fábrica SECIL, Secil Companhia Geral de Cal e Cimento S.A..

**Resultados do autocontrolo – Amostra 3**, Areia fina, 12 de Fevereiro de 2010, Unibetão – Indústria de Betão Preparado, S.A..

**Resultados do autocontrolo – Amostra 1**, Brita 1, 12 de Fevereiro de 2010, Unibetão – Indústria de Betão Preparado, S.A..

**Resultados do autocontrolo – Amostra 1**, Brita 2, 12 de Fevereiro de 2010, Unibetão – Indústria de Betão Preparado, S.A..

## **ENDEREÇOS ELECTRÓNICOS**

**BASF The Chemical Company** (2007). *BASF Performance Flooring – Dry Shake Concrete Hardeners*. Acedido em 14 de Fevereiro de 2012, em:

<http://www.buildingsystems.basf.com/p02/USWeb->

[Internet/buildingsystems/en/function/conversions:/publish/content/microsites/buildingsystems/Brochures/Brochure\\_Docs/Flooring\\_CemDryShake.pdf](http://www.buildingsystems.basf.com/p02/USWeb-Internet/buildingsystems/en/function/conversions:/publish/content/microsites/buildingsystems/Brochures/Brochure_Docs/Flooring_CemDryShake.pdf).

**The Concrete Floor Contractors Association of Ontario**. *Dry-Shake Aggregate Hardeners*. Acedido em 14 de Fevereiro de 2012, em: <http://www.concretefloors.ca/>.

**Laticrete** (2009). *TDS 154 – Concrete Curing Compounds and Surface Hardeners*. Acedido em 14 de Fevereiro de 2012, em: <http://www.laticrete.com/>.

**National Ready Mixed Concrete Association** (2004). *CIP 20 – Delamination of Troweled Concrete Surfaces*. Acedido em 17 de Fevereiro de 2012, em: <http://www.nrmca.org/>.

**Portland Cement Association** (1995). *CTT V.16, No.3 – Early Sawing to Control Slab Cracking*. Acedido em 17 de Fevereiro de 2012, em: <http://www.cement.org/>.

## **NORMAS**

**ACI 302.1R** (2004). *Guide for Concrete Floor and Slab Construction*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

**NP EN 196-7** (2008). *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 7: Métodos de colheita e preparação de amostras de cimento*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**NP EN 206-1** (2007). *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**NP EN 933-1** (2000). *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

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

**NP 1387** (2008). *Betões. Determinação dos tempos de presa.* Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**EN 1542** (1999). *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off.* Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

**NP EN 12350-2** (2009). *Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento.* Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**NP EN 12390-2** (2009). *Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.* Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**NP EN 12390-3** (2009). *Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes.* Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**NP EN 12504-1** (2009). *Ensaio do betão nas estruturas. Parte 1: Carotes – Extracção, exame e ensaio à compressão.* Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**NP EN 12504-2** (2003). *Ensaio do betão nas estruturas. Parte 2: Ensaio não destrutivo – Determinação do índice esclerométrico.* Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**NP EN 12504-2** (2012). *Ensaio do betão nas estruturas. Parte 2: Ensaio não destrutivo – Determinação do índice esclerométrico.* Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.

**EN 13892-2** (2002) – *Method of test for screed materials. Part 2: Determination of flexural and compressive strength.* Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

**EN 13892-3** (2004) – *Method of test for screed materials. Part 3: Determination of wear resistance* – Bohme. Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.



# ANEXOS



## ANEXO A

## Granulometria da areia fina

## Análise granulométrica da areia fina

|                        |
|------------------------|
| Designação: Areia fina |
| Nº amostra: 3          |

|                |
|----------------|
| Tipo: Rolado   |
| Central: Évora |

|                         |
|-------------------------|
| Origem: Castelo Ventoso |
| Fornecedor: Sifucel     |

|                              |
|------------------------------|
| Data de colheita: 11.02.2010 |
| Data de ensaio: 12.02.2010   |

| Peneiro          | Malha mm | Resíduo |       | Resíduos acumulados % |        | Água de molhagem % |         |           |  |
|------------------|----------|---------|-------|-----------------------|--------|--------------------|---------|-----------|--|
|                  |          | g       | %     | passado               | retido | Coeficientes       |         | Agregados |  |
|                  |          |         |       |                       |        | rolado             | britado |           |  |
| 6"               | 150,0    | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,08               | 0,08    | 0,00      |  |
| 4"               | 100,0    | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,12               | 0,13    | 0,00      |  |
| 3"               | 75,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,16               | 0,18    | 0,00      |  |
| 2"               | 50,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,20               | 0,23    | 0,00      |  |
| 1 1/2"           | 37,5     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,24               | 0,28    | 0,00      |  |
| 1"               | 25,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,39               | 0,44    | 0,00      |  |
| 3/4"             | 19,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,55               | 0,60    | 0,00      |  |
| 1/2"             | 12,5     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,92               | 1,10    | 0,00      |  |
| 3/8"             | 9,50     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 1,30               | 1,60    | 0,00      |  |
| 1/4"             | 6,30     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 1,75               | 2,20    | 0,00      |  |
| n. 4             | 4,75     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 2,25               | 2,80    | 0,00      |  |
| n. 8             | 2,36     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 4,0                | 5,2     | 0,00      |  |
| n. 16            | 1,18     | 3,0     | 0,3   | 99,7                  | 0,3    | 7,0                | 8,6     | 0,02      |  |
| n. 30            | 0,600    | 136,0   | 13,6  | 86,1                  | 13,9   | 10,0               | 12,3    | 1,36      |  |
| n.50             | 0,300    | 547,0   | 54,7  | 31,4                  | 68,6   | 13,0               | 17,2    | 7,11      |  |
| n. 100           | 0,150    | 301,0   | 30,1  | 1,3                   | 98,7   | 20,0               | 24,6    | 6,02      |  |
| n.200            | 0,075    | 12,0    | 1,2   | 0,1                   | 99,9   | 26,0               | 26,0    | 0,31      |  |
| refugo           |          | 1,0     | 0,1   | 0,0                   | 100,0  | 26,0               | 26,0    | 0,03      |  |
| Totais           |          | 1000,0  | 100,0 |                       |        |                    |         | 14,85     |  |
| Módulo de finura |          | 1,81    |       |                       |        |                    |         |           |  |



## ANEXO B

## Granulometria da brita 1

## Análise granulométrica da brita 1

|                     |
|---------------------|
| Designação: Brita 1 |
| Nº amostra: 1       |

|                |
|----------------|
| Tipo: Britado  |
| Central: Évora |

|                          |
|--------------------------|
| Origem: Monte das Flores |
| Fornecedor: Tecnovia     |

|                              |
|------------------------------|
| Data de colheita: 11.02.2010 |
| Data de ensaio: 12.02.2010   |

| Peneiro          | Malha mm | Resíduo |       | Resíduos acumulados % |        | Água de molhagem % |         |           |  |
|------------------|----------|---------|-------|-----------------------|--------|--------------------|---------|-----------|--|
|                  |          | g       | %     | passado               | retido | Coeficientes       |         | Agregados |  |
|                  |          |         |       |                       |        | rolado             | britado |           |  |
| 6"               | 150,0    | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,08               | 0,08    | 0,00      |  |
| 4"               | 100,0    | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,12               | 0,13    | 0,00      |  |
| 3"               | 75,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,16               | 0,18    | 0,00      |  |
| 2"               | 50,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,20               | 0,23    | 0,00      |  |
| 1 1/2"           | 37,5     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,24               | 0,28    | 0,00      |  |
| 1"               | 25,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,39               | 0,44    | 0,00      |  |
| 3/4"             | 19,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,55               | 0,60    | 0,00      |  |
| 1/2"             | 12,5     | 372,0   | 12,4  | 87,6                  | 12,4   | 0,92               | 1,10    | 0,14      |  |
| 3/8"             | 9,50     | 991,0   | 33,0  | 54,6                  | 45,4   | 1,30               | 1,60    | 0,53      |  |
| 1/4"             | 6,30     | 1000,0  | 33,3  | 21,2                  | 78,8   | 1,75               | 2,20    | 0,73      |  |
| n. 4             | 4,75     | 460,0   | 15,3  | 5,9                   | 94,1   | 2,25               | 2,80    | 0,43      |  |
| n. 8             | 2,36     | 148,0   | 4,9   | 0,9                   | 99,1   | 4,0                | 5,2     | 0,26      |  |
| n. 16            | 1,18     | 0,0     | 0,0   | 0,9                   | 99,1   | 7,0                | 8,6     | 0,00      |  |
| n. 30            | 0,600    | 0,0     | 0,0   | 0,9                   | 99,1   | 10,0               | 12,3    | 0,00      |  |
| n.50             | 0,300    | 0,0     | 0,0   | 0,9                   | 99,1   | 13,0               | 17,2    | 0,00      |  |
| n. 100           | 0,150    | 0,0     | 0,0   | 0,9                   | 99,1   | 20,0               | 24,6    | 0,00      |  |
| n.200            | 0,075    | 0,0     | 0,0   | 0,9                   | 99,1   | 26,0               | 26,0    | 0,00      |  |
| refugo           |          | 28,0    | 0,9   | 0,0                   | 100,0  | 26,0               | 26,0    | 0,24      |  |
| Totais           |          | 2999,0  | 100,0 |                       |        |                    |         | 2,33      |  |
| Módulo de finura |          | 6,35    |       |                       |        |                    |         |           |  |



## ANEXO C

## Granulometria da brita 2

## Análise granulométrica da brita 2

|                     |
|---------------------|
| Designação: Brita 2 |
| Nº amostra: 1       |

|                |
|----------------|
| Tipo: Britado  |
| Central: Évora |

|                          |
|--------------------------|
| Origem: Monte das Flores |
| Fornecedor: Tecnovia     |

|                              |
|------------------------------|
| Data de colheita: 11.02.2010 |
| Data de ensaio: 12.02.2010   |

| Peneiro          | Malha mm | Resíduo |       | Resíduos acumulados % |        | Água de molhagem % |         |           |  |
|------------------|----------|---------|-------|-----------------------|--------|--------------------|---------|-----------|--|
|                  |          | g       | %     | passado               | retido | Coeficientes       |         | Agregados |  |
|                  |          |         |       |                       |        | rolado             | britado |           |  |
| 6"               | 150,0    | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,08               | 0,08    | 0,00      |  |
| 4"               | 100,0    | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,12               | 0,13    | 0,00      |  |
| 3"               | 75,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,16               | 0,18    | 0,00      |  |
| 2"               | 50,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,20               | 0,23    | 0,00      |  |
| 1 1/2"           | 37,5     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,24               | 0,28    | 0,00      |  |
| 1"               | 25,0     | 0,0     | 0,0   | 100,0                 | 0,0    | 0,39               | 0,44    | 0,00      |  |
| 3/4"             | 19,0     | 867,0   | 27,2  | 72,8                  | 27,2   | 0,55               | 0,60    | 0,16      |  |
| 1/2"             | 12,5     | 1931,0  | 60,5  | 12,4                  | 87,6   | 0,92               | 1,10    | 0,67      |  |
| 3/8"             | 9,50     | 361,0   | 11,3  | 1,1                   | 98,9   | 1,30               | 1,60    | 0,18      |  |
| 1/4"             | 6,30     | 10,0    | 0,3   | 0,8                   | 99,2   | 1,75               | 2,20    | 0,01      |  |
| n. 4             | 4,75     | 0,0     | 0,0   | 0,8                   | 99,2   | 2,25               | 2,80    | 0,00      |  |
| n. 8             | 2,36     | 0,0     | 0,0   | 0,8                   | 99,2   | 4,0                | 5,2     | 0,00      |  |
| n. 16            | 1,18     | 0,0     | 0,0   | 0,8                   | 99,2   | 7,0                | 8,6     | 0,00      |  |
| n. 30            | 0,600    | 0,0     | 0,0   | 0,8                   | 99,2   | 10,0               | 12,3    | 0,00      |  |
| n.50             | 0,300    | 0,0     | 0,0   | 0,8                   | 99,2   | 13,0               | 17,2    | 0,00      |  |
| n. 100           | 0,150    | 0,0     | 0,0   | 0,8                   | 99,2   | 20,0               | 24,6    | 0,00      |  |
| n.200            | 0,075    | 0,0     | 0,0   | 0,8                   | 99,2   | 26,0               | 26,0    | 0,00      |  |
| refugo           |          | 24,0    | 0,8   | 0,0                   | 100,0  | 26,0               | 26,0    | 0,20      |  |
| Totais           |          | 3193,0  | 100,0 |                       |        |                    |         | 1,21      |  |
| Módulo de finura |          | 7,22    |       |                       |        |                    |         |           |  |



## ANEXO D

## Granulometria dos endurecedores

## Análise granulométrica dos endurecedores

| Data de ensaio | Amostras | Peso gobelés (g) | Massa total antes estufa (g) | Massa total depois estufa (g) | Massa total depois estufa - peso gobelé (g) |
|----------------|----------|------------------|------------------------------|-------------------------------|---|
| 11.01.2012     | Q1       | 120,54           | 205,00                       | 324,70                        | 204,16                                      |
| 11.01.2012     | B1       | 105,69           | 205,00                       | 309,85                        | 204,16                                      |
| 12.01.2012     | C        | 119,85           | 205,00                       | 323,98                        | 204,13                                      |
| 12.01.2012     | Q2       | 103,22           | 205,00                       | 307,47                        | 204,25                                      |
| 20.01.2012     | B2       | 117,26           | 205,00                       | 319,83                        | 202,57                                      |

| Crivos (mm)     | Massa material retido (g) |       |       |       |       | % material retido |       |       |       |       |
|-----------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
|                 | Q1                        | B1    | C     | Q2    | B2    | Q1                | B1    | C     | Q2    | B2    |
| 4               | 0,10                      | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,05              | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| 2               | 26,78                     | 30,62 | 36,09 | 27,99 | 36,90 | 13,13             | 15,02 | 17,69 | 13,71 | 18,24 |
| 1               | 61,84                     | 70,80 | 48,83 | 47,22 | 51,31 | 30,32             | 34,74 | 23,93 | 23,13 | 25,36 |
| 0,5             | 27,83                     | 31,81 | 35,99 | 38,05 | 22,18 | 13,65             | 15,61 | 17,64 | 18,64 | 10,96 |
| 0,25            | 12,41                     | 5,23  | 16,82 | 17,64 | 10,95 | 6,09              | 2,57  | 8,24  | 8,64  | 5,41  |
| inferior a 0,25 | 74,98                     | 65,36 | 66,31 | 73,27 | 81,01 | 36,77             | 32,07 | 32,50 | 35,89 | 40,03 |

| Crivos (mm)     | % cumulativa do material passado |        |        |        |        |
|-----------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                 | Q1                               | B1     | C      | Q2     | B2     |
| 4               | 99,95                            | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 2               | 86,82                            | 84,98  | 82,31  | 86,29  | 81,76  |
| 1               | 56,50                            | 50,24  | 58,38  | 63,16  | 56,41  |
| 0,5             | 42,85                            | 34,63  | 40,74  | 44,53  | 45,45  |
| 0,25            | 36,77                            | 32,07  | 32,50  | 35,89  | 40,03  |
| inferior a 0,25 | 0,00                             | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |



## ANEXO E

### Massa volúmica dos endurecedores

#### Massa volúmica - Ensaio realizado segundo NP EN 196-6 de 2010

| Endurecedor   | B1     | B2     | Q1     | Q2    | C      |
|---|--------|--------|--------|-------|--------|
| Data do ensaio (2012)   | 15.05  | 07.05  | 07.05  | 15.05 | 15.05  |
| Massa do provete a secar (g)  | 200    | 200    | 200    | 200   | 200    |
| Temperatura do banho<br>(20±0,2°C)                                    | 19,8   | 19,8   | 19,8   | 19,8  | 19,8   |
| Massa do provete seco <b>m</b> (g)                                    | 65,691 | 59,612 | 53,215 | 62,68 | 59,282 |
| Volume inicial de líquido <b>V1</b><br>(cm <sup>3</sup> )             | 0,20   | -0,05  | 0,85   | 0,00  | 0,60   |
| Volume final do líquido com o<br>provete <b>V2</b> (cm <sup>3</sup> ) | 21,60  | 19,85  | 18,60  | 20,65 | 20,20  |
| Massa volúmica = $m/(V2-V1)$<br>(g.cm <sup>-3</sup> )                 | 3,07   | 3,00   | 3,00   | 3,04  | 3,02   |



**ANEXO F****Perda ao fogo e resíduo insolúvel dos endurecedores****Perda ao fogo e Resíduo insolúvel**

| <b>Endurecedor</b>                         | <b>B1</b>  | <b>B2</b> | <b>Q1</b> | <b>Q2</b> | <b>C</b> |
|--|------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Data início dos ensaios                    | 17.05.2012 |           |           |           |          |
| Data fim dos ensaios                       | 22.05.2012 |           |           |           |          |
| Perda ao fogo (%) [NP EN 196-2-7:2006]     | 7,3        | 8,0       | 7,1       | 3,4       | 3,9      |
| Resíduo insolúvel (%) [NP EN 196-2-9:2006] | 3,2        | 12,3      | 11,7      | 13,5      | 11,4     |



## ANEXO G

### Resistência à compressão de provetes cúbicos

#### Resistência à compressão - cubos 150mm

|                   |             |            |             |            |             |            |
|-------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| Data fabrico      | 13.03.2011  |            |             |            |             |            |
| Data teste        | 16.03.2012  | 20.03.2012 |             | 10.04.2012 |             |            |
| Hora              | 11:50       | 10:23      |             | 14:30      |             |            |
| Cubos             | <b>SP-1</b> | <b>P-1</b> | <b>SP-2</b> | <b>P-2</b> | <b>SP-3</b> | <b>P-3</b> |
| Massa (kg)        | 8,349       | 8,167      | 8,319       | 8,127      | 8,329       | 8,257      |
| Idade (dias)      | 3           |            | 7           |            | 28          |            |
| Resistência (kN)  | 1224        | 766,6      | 1532        | 1064       | 1754,4      | 1264,8     |
| Resistência (Mpa) | 54,4        | 34,1       | 68,1        | 47,3       | 78,0        | 56,2       |

|                                   | Adj.      | Data       | Hora  | Temperatura da amassadura (°C) | Hora abaixamento | Abaixamento (cm) | Classe    |
|-----------------------------------|-----------|------------|-------|--------------------------------|------------------|------------------|-----------|
| Composição<br>CEM II A/L<br>42,5R | <b>SP</b> | 13.03.2012 | 17:24 | 22,5                           | 17:28            | 15,0             | <b>S3</b> |
|                                   | <b>P</b>  |            | 16:25 | 23,7                           | 16:29            | 15,0             | <b>S3</b> |

Temperatura água tanque = 19,3 °C (colocados no tanque no dia 07.03.2012)



## ANEXO H

## Resistência à compressão de provetes cilíndricos

## Resistência à compressão de provetes cilíndricos - P

Conservação dos  
provetes: ArCondição de humidade  
superficial: SecoMétodo de preparação:  
Rectificação

| Data do ensaio | Identificação da carote | Idade (dias) | Ø (mm) | Altura (mm) | Massa (kg) | Secção (mm <sup>2</sup> ) | Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Carga de rotura (kN) | Tensão de rotura (MPa) | Média tensão de rotura (MPa) |
|----------------|-------------------------|--------------|--------|-------------|------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------|
| 04.04.2012     | P_B1 - 1                | 28           | 49     | 49          | 0,218      | 1886                      | 2359                                | 119                  | 63,1                   | 60,6                         |
|                | P_B1 - 2                |              |        |             | 0,215      | 1886                      | 2327                                | 116                  | 61,5                   |                              |
|                | P+45_B1 - 1             |              |        |             | 0,220      | 1886                      | 2381                                | 104                  | 55,1                   |                              |
|                | P+45_B1 - 2             |              |        |             | 0,218      | 1886                      | 2359                                | 118                  | 62,6                   |                              |
| 05.04.2012     | P_B2 - 1                | 28           | 49     | 49          | 0,217      | 1886                      | 2348                                | 104                  | 55,1                   | 54,6                         |
|                | P_B2 - 2                |              |        |             | 0,218      | 1886                      | 2359                                | 109                  | 57,8                   |                              |
|                | P+45_B2 - 1             |              |        |             | 0,216      | 1886                      | 2338                                | 114                  | 60,4                   |                              |
|                | P+45_B2 - 2             |              |        |             | 0,217      | 1886                      | 2348                                | 85,3                 | 45,2                   |                              |
| 09.04.2012     | P_Q11 - 1               | 31           | 49     | 49          | 0,225      | 1886                      | 2435                                | 100                  | 53,0                   | 56,7                         |
|                | P_Q11 - 2               |              |        |             | 0,224      | 1886                      | 2424                                | 89,4                 | 47,4                   |                              |
|                | P+45_Q11-1              |              |        |             | 0,223      | 1886                      | 2413                                | 118                  | 62,6                   |                              |
|                | P+45_Q11-2              |              |        |             | 0,222      | 1886                      | 2403                                | 120                  | 63,6                   |                              |
| 12.04.2012     | P_Q2 - 1                | 28           | 49     | 49          | 0,222      | 1886                      | 2403                                | 121                  | 64,2                   | 61,0                         |
|                | P_Q2 - 2                |              |        |             | 0,226      | 1886                      | 2446                                | 115                  | 61,0                   |                              |
|                | P+45_Q2 - 1             |              |        |             | 0,224      | 1886                      | 2424                                | 117                  | 62,0                   |                              |
|                | P+45_Q2 - 2             |              |        |             | 0,225      | 1886                      | 2435                                | 107                  | 56,7                   |                              |
| 13.04.2012     | P_C - 1                 | 28           | 49     | 49          | 0,223      | 1886                      | 2413                                | 120                  | 63,6                   | 62,2                         |
|                | P_C - 2                 |              |        |             | 0,223      | 1886                      | 2413                                | 123                  | 65,2                   |                              |
|                | P+45_C - 1              |              |        |             | 0,223      | 1886                      | 2413                                | 109                  | 57,8                   |                              |
|                | P+45_C - 2              |              |        |             | 0,221      | 1886                      | 2392                                | 117                  | 62,0                   |                              |

**Resistência à compressão de provetes cilíndricos - SP**

Conservação dos provetes: Ar

Condição de humidade superficial: Seco

Método de preparação: Rectificação

| Data do ensaio | Identificação da carote | Idade (dias) | Ø (mm) | Altura (mm) | Massa (kg) | Secção (mm <sup>2</sup> ) | Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Carga de rotura (kN) | Tensão de rotura (MPa) | Média tensão de rotura (MPa) |
|----------------|-------------------------|--------------|--------|-------------|------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------|
| 17.04.2012     | SP_B1 - 1               | 28           | 49     | 49          | 0,232      | 1886                      | 2511                                | 160                  | 84,8                   | 82,6                         |
|                | SP_B1 - 2               |              |        |             | 0,230      | 1886                      | 2489                                | 151                  | 80,1                   |                              |
|                | SP+45_B1 - 1            |              |        |             | 0,230      | 1886                      | 2489                                | 153                  | 81,1                   |                              |
|                | SP+45_B1 - 2            |              |        |             | 0,229      | 1886                      | 2478                                | 159                  | 84,3                   |                              |
| 18.04.2012     | SP_B2 - 1               | 28           | 49     | 49          | 0,229      | 1886                      | 2478                                | 166                  | 88,0                   | 83,9                         |
|                | SP_B2 - 2               |              |        |             | 0,227      | 1886                      | 2457                                | 151                  | 80,1                   |                              |
|                | SP+45_B2 - 1            |              |        |             | 0,228      | 1886                      | 2467                                | 157                  | 83,2                   |                              |
|                | SP+45_B2 - 2            |              |        |             | 0,226      | 1886                      | 2446                                | 159                  | 84,3                   |                              |
| 19.04.2012     | SP_Q1 - 1               | 28           | 49     | 49          | 0,228      | 1886                      | 2467                                | 155                  | 82,2                   | 78,2                         |
|                | SP_Q1 - 2               |              |        |             | 0,228      | 1886                      | 2467                                | 154                  | 81,7                   |                              |
|                | SP+45_Q1 - 1            |              |        |             | 0,226      | 1886                      | 2446                                | 138                  | 73,2                   |                              |
|                | SP+45_Q1 - 2            |              |        |             | 0,227      | 1886                      | 2457                                | 143                  | 75,8                   |                              |
| 20.04.2012     | SP_Q2 - 1               | 28           | 49     | 49          | 0,229      | 1886                      | 2478                                | 164                  | 87,0                   | 81,0                         |
|                | SP_Q2 - 2               |              |        |             | 0,228      | 1886                      | 2467                                | 153                  | 81,1                   |                              |
|                | SP+45_Q2 - 1            |              |        |             | 0,229      | 1886                      | 2478                                | 144                  | 76,4                   |                              |
|                | SP+45_Q2 - 2            |              |        |             | 0,228      | 1886                      | 2467                                | 150                  | 79,5                   |                              |
| 23.04.2012     | SP_C - 1                | 28           | 49     | 49          | 0,227      | 1886                      | 2457                                | 162                  | 85,9                   | 86,7                         |
|                | SP_C - 2                |              |        |             | 0,228      | 1886                      | 2467                                | 168                  | 89,1                   |                              |
|                | SP+45_C - 1             |              |        |             | 0,227      | 1886                      | 2457                                | 161                  | 85,4                   |                              |
|                | SP+45_C - 2             |              |        |             | 0,227      | 1886                      | 2457                                | 163                  | 86,4                   |                              |

**Quadro resumo da resistência à compressão de provetes cilíndricos**

| Identificação da carote | Idade (dias) | Média tensão de rotura de todos provetes cilíndricos (MPa) |
|-------------------------|--------------|--|
| P                       | 28           | 58,9   |
| SP                      | 28           | 82,5   |

## ANEXO I

## Taxa de evaporação

| Taxa de evaporação |                              |                                 |                               |                              |
|--------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Lajetas            | Temperatura média túnel (°C) | Hora colocação do betão de base | Hora colocação do endurecedor | Hora conclusão dos trabalhos |
| P_B1               | 47,0                         | 11:06                           | 17:38                         | 09:18                        |
| P+45_B1            | 45,1                         | 11:06                           | 18:02                         | 09:18                        |
| P_B2               | 43,0                         | 11:02                           | 17:04                         | 09:07                        |
| P+45_B2            | 50,4                         | 11:02                           | 17:37                         | 09:07                        |
| P_Q1               | 53,2                         | 10:59                           | 17:15                         | 09:20                        |
| P+45_Q1            | 48,6                         | 10:59                           | 17:37                         | 09:20                        |
| P_Q2               | 48,0                         | 10:24                           | 16:40                         | 09:26                        |
| P+45_Q2            | 56,2                         | 10:24                           | 17:16                         | 09:26                        |
| P_C                | 50,0                         | 11:17                           | 17:00                         | 11:28                        |
| P+45_C             | 54,7                         | 11:17                           | 17:17                         | 11:28                        |
| SP_B1              | 44,3                         | 11:05                           | 15:27                         | 09:15                        |
| SP+45_B1           | 50,5                         | 11:05                           | 15:52                         | 09:15                        |
| SP_B2              | 44,0                         | 11:13                           | 15:05                         | 09:16                        |
| SP+45_B2           | 55,9                         | 11:13                           | 15:38                         | 09:16                        |
| SP_Q1              | 47,3                         | 10:56                           | 14:48                         | 09:07                        |
| SP+45_Q1           | 55,7                         | 10:56                           | 15:20                         | 09:07                        |
| SP_Q2              | 40,4                         | 11:04                           | 15:00                         | 11:50                        |
| SP+45_Q2           | 57,2                         | 11:04                           | 15:08                         | 11:50                        |
| SP_C               | 51,3                         | 10:56                           | 14:48                         | 09:22                        |
| SP+45_C            | 61,3                         | 10:56                           | 15:04                         | 09:22                        |

## Taxa de evaporação

| Lajetas  | Diferença entre hora colocação endurecedor e colocação do betão de base |       | Diferença entre hora colocação endurecedor e conclusão dos trabalhos |       | Razão A/C |
|----------|---|-------|--|-------|-----------|
|          | Horário   | Valor | Horário  | Valor |           |
| P_B1     | 06:32   | 6,53  | 15:40  | 15,67 | 0,50      |
| P+45_B1  | 06:56   | 6,93  | 15:16  | 15,27 | 0,50      |
| P_B2     | 06:02   | 6,03  | 16:03  | 16,05 | 0,50      |
| P+45_B2  | 06:35   | 6,58  | 15:30  | 15,50 | 0,50      |
| P_Q1     | 06:16   | 6,53  | 16:05  | 16,08 | 0,50      |
| P+45_Q1  | 06:38   | 6,63  | 15:43  | 15,72 | 0,50      |
| P_Q2     | 06:16   | 6,27  | 16:46  | 16,77 | 0,50      |
| P+45_Q2  | 06:52   | 6,87  | 16:10  | 16,17 | 0,50      |
| P_C      | 05:43   | 6,72  | 18:28  | 18,47 | 0,50      |
| P+45_C   | 06:00   | 6,00  | 18:11  | 18,18 | 0,50      |
| SP_B1    | 04:22   | 4,37  | 17:48  | 17,80 | 0,42      |
| SP+45_B1 | 04:47   | 4,78  | 17:23  | 17,38 | 0,42      |
| SP_B2    | 03:52   | 3,87  | 18:11  | 18,18 | 0,42      |
| SP+45_B2 | 04:25   | 4,42  | 17:38  | 17,63 | 0,42      |
| SP_Q1    | 03:52   | 3,87  | 18:19  | 18,32 | 0,42      |
| SP+45_Q1 | 04:24   | 4,40  | 17:47  | 17,78 | 0,42      |
| SP_Q2    | 16:48   | 3,93  | 20:50  | 20,83 | 0,42      |
| SP+45_Q2 | 04:04   | 4,07  | 20:42  | 20,70 | 0,42      |
| SP_C     | 03:52   | 3,87  | 18:34  | 18,57 | 0,42      |
| SP+45_C  | 04:08   | 4,13  | 18:18  | 18,30 | 0,42      |

|                           |
|---------------------------|
| <b>Taxa de evaporação</b> |
|---------------------------|

| Lajetas  | Água na amassadura (l/m <sup>3</sup> ) | Água na amassadura (l/m <sup>2</sup> ) | Água evaporada amassadura - colocação endurecedor (l/m <sup>2</sup> ) | Água disponível p/ colocação do endurecedor (l/m <sup>2</sup> ) |
|----------|--|--|---|---|
| P_B1     | 173                                    | 17,3                                   | 5,4   | 11,9  |
| P+45_B1  | 173                                    | 17,3                                   | 5,7   | 11,6  |
| P_B2     | 173                                    | 17,3                                   | 5,3   | 12,0  |
| P+45_B2  | 173                                    | 17,3                                   | 5,7   | 11,6  |
| P_Q1     | 173                                    | 17,3                                   | 5,3   | 12,0  |
| P+45_Q1  | 173                                    | 17,3                                   | 6,5   | 10,8  |
| P_Q2     | 173                                    | 17,3                                   | 5,6   | 11,7  |
| P+45_Q2  | 173                                    | 17,3                                   | 6,3   | 11,0  |
| P_C      | 173                                    | 17,3                                   | 5,7   | 11,6  |
| P+45_C   | 173                                    | 17,3                                   | 6,3   | 11,0  |
| SP_B1    | 150                                    | 15,0                                   | 3,3   | 11,7  |
| SP+45_B1 | 150                                    | 15,0                                   | 3,6   | 11,4  |
| SP_B2    | 150                                    | 15,0                                   | 4,2   | 10,8  |
| SP+45_B2 | 150                                    | 15,0                                   | 5,3   | 9,7   |
| SP_Q1    | 150                                    | 15,0                                   | 3,8   | 11,2  |
| SP+45_Q1 | 150                                    | 15,0                                   | 4,6   | 10,4  |
| SP_Q2    | 150                                    | 15,0                                   | 2,1   | 12,9  |
| SP+45_Q2 | 150                                    | 15,0                                   | 4,3   | 10,7  |
| SP_C     | 150                                    | 15,0                                   | 3,6   | 11,4  |
| SP+45_C  | 150                                    | 15,0                                   | 4,7   | 10,3  |

**Taxa de evaporação**

| Lajetas  | Água evaporada amassadura - colocação endurecedor (l/m <sup>2</sup> ) |                                      |  | Água adicionada durante aplicação do endurecedor (l) |
|----------|---|--------------------------------------|--|--|
|          | Tina entrada túnel (l/m <sup>2</sup> )                                | Tina saída túnel (l/m <sup>2</sup> ) | Interpolação posição das lajetas (l/m <sup>2</sup> ) |  |
| P_B1     | 7,5   | 2,4                                  | 5,4  | 0,170  |
| P+45_B1  | 7,9   | 2,6                                  | 5,7  | 0,180  |
| P_B2     | 7,9   | 1,5                                  | 5,3  | 0,180  |
| P+45_B2  | 7,8   | 2,6                                  | 5,7  | 0,225  |
| P_Q1     | 7,2   | 2,5                                  | 5,3  | 0,301  |
| P+45_Q1  | 9,5   | 2,2                                  | 6,5  | 0,310  |
| P_Q2     | 7,7   | 2,5                                  | 5,6  | 0,334  |
| P+45_Q2  | 8,5   | 3,1                                  | 6,3  | 0,280  |
| P_C      | 8,0   | 2,5                                  | 5,7  | 0,250  |
| P+45_C   | 8,9   | 3,6                                  | 6,3  | 0,233  |
| SP_B1    | 4,5   | 1,5                                  | 3,3  | 0,306  |
| SP+45_B1 | 4,8   | 2,0                                  | 3,6  | 0,235  |
| SP_B2    | 5,8   | 1,8                                  | 4,2  | 0,204  |
| SP+45_B2 | 7,2   | 2,5                                  | 5,3  | 0,255  |
| SP_Q1    | 5,2   | 1,7                                  | 3,8  | 0,185  |
| SP+45_Q1 | 6,4   | 2,0                                  | 4,6  | 0,265  |
| SP_Q2    | 2,5   | 1,5                                  | 2,1  | 0,220  |
| SP+45_Q2 | 5,7   | 2,4                                  | 4,3  | 0,242  |
| SP_C     | 5,0   | 1,7                                  | 3,6  | 0,211  |
| SP+45_C  | 6,6   | 2,1                                  | 4,7  | 0,222  |

|                                      | Distância (cm) |
|--------------------------------------|----------------|
| dos aquecedores até à 1ª tina        | 51,60          |
| dos aquecedores até à 2ª tina        | 167,90         |
| dos aquecedores até a meio da lajeta | 99,55          |

## ANEXO J

### Dados relativos ao fabrico das lajetas, aplicação dos endurecedores e controlo de temperatura no interior dos túneis

#### Dados relativos à amassadura com P e aplicação do endurecedor B1

| Identificação do molde              | 8,5 MPa          | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 07.03.2012       | 07.03.2013       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 16,4             | 16,4             |
| Humidade (%)                        | 53,5             | 53,5             |
| Hora de fabrico                     | 10:34            | 10:34            |
| Temperatura do betão (°C)           | 17,3             | 17,3             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:41            | 10:41            |
| Abaixamento registado (cm)          | 14,5 (Classe S3) | 14,5 (Classe S3) |
| Hora colocação betão base           | 11:06            | 11:06            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 17:35            | 17:15            |
| Hora colocação endurecedor          | 17:38            | 18:02            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72             | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 0,944            | 1,000            |
| Hora 1º afagamento                  | 17:40            | 18:11            |
| Hora 2º afagamento                  | 17:59            | 18:25            |
| Hora 3º afagamento                  | -                | -                |
| Hora 4º afagamento                  | -                | -                |
| Hora 5º afagamento                  | -                | -                |
| Hora Fim Trabalhos                  | 18:04            | 18:33            |

#### Controlo de temperatura no interior dos túneis – P e B1

| Hora                 | Identificação do molde |         |                             |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min (°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                       | entrada |
| 11:41                | -                      | -       | 33,0                        | -       |
| 11:54                | 40,1                   | -       | -                           | -       |
| 13:02                | 42,8                   | -       | 39,1                        | -       |
| 13:59                | 39,9                   | -       | 40,5                        | -       |
| 14:26                | -                      | 62,2    | -                           | 56,1    |
| 15:00                | -                      | 61,3    | -                           | 68,1    |
| 16:12                | 41,5                   | -       | 39,3                        | -       |
| 17:53                | 41,1                   | -       | 39,7                        | -       |
| <b>Média</b>         | 41,1                   | 61,8    | 38,3                        | 62,1    |
| <b>Média T túnel</b> | 47,0                   |         | 45,1                        |         |

Dados relativos à amassadura com P e aplicação do endurecedor B2

| Identificação do molde              | 8,5 MPa          | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 08.03.2012       | 08.03.2013       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 19,3             | 19,3             |
| Humidade (%)                        | 45,0             | 45,0             |
| Hora de fabrico                     | 10:11            | 10:11            |
| Temperatura do betão (°C)           | 18,2             | 18,2             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:18            | 10:18            |
| Abaixamento registado (cm)          | 14,5 (Classe S3) | 14,5 (Classe S3) |
| Hora colocação betão base           | 11:02            | 11:02            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 17:00            | 16:52            |
| Hora colocação endurecedor          | 17:04            | 17:37            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72             | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 1,028            | 1,250            |
| Hora 1º afagamento                  | 17:08            | 17:42            |
| Hora 2º afagamento                  | 17:27            | 18:09            |
| Hora 3º afagamento                  | -                | -                |
| Hora 4º afagamento                  | -                | -                |
| Hora 5º afagamento                  | -                | -                |
| Hora Fim Trabalhos                  | 17:33            | 18:11            |

Controlo de temperatura no interior dos túneis - P e B2

| Hora                 | Identificação do molde |         |                             |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min (°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                       | entrada |
| 11:07                | 25,7                   | -       | 38,4                        | -       |
| 11:42                | 39,7                   | -       | 44,2                        | -       |
| 12:55                | 41,9                   | -       | 47,0                        | -       |
| 13:55                | 42,0                   | -       | 45,2                        | -       |
| 14:28                | -                      | 55,9    | -                           | 70,5    |
| 14:56                | -                      | 57,1    | -                           | 71,0    |
| 15:59                | 44,5                   | -       | 46,8                        | -       |
| 17:00                | 41,0                   | -       | 43,2                        | -       |
| 18:00                | 39,0                   | -       | 47,1                        | -       |
| <b>Média</b>         | 39,1                   | 56,5    | 44,6                        | 70,8    |
| <b>Média T túnel</b> | 43,0                   |         | 50,4                        |         |

## Dados relativos à amassadura com P e aplicação do endurecedor Q1

| Identificação do molde              | 8,5 MPa          | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 14.03.2012       | 14.03.2012       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 18,0             | 18,0             |
| Humidade (%)                        | 45,0             | 45,0             |
| Hora de fabrico                     | 10:19            | 10:19            |
| Temperatura do betão (°C)           | 18,8             | 18,8             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:23            | 10:23            |
| Abaixamento registado (cm)          | 15,0 (Classe S3) | 15,0 (Classe S3) |
| Hora colocação betão base           | 10:59            | 10:59            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 17:11            | 16:52            |
| Hora colocação endurecedor          | 17:15            | 17:37            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72             | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 1,672            | 1,722            |
| Hora 1º afagamento                  | 17:19            | 17:41            |
| Hora 2º afagamento                  | 17:24            | 17:50            |
| Hora 3º afagamento                  | 17:29            | 18:14            |
| Hora 4º afagamento                  | 17:43            | 18:28            |
| Hora 5º afagamento                  | 18:00            | 18:38            |
| Hora 6º afagamento                  | 18:21            | -                |
| Hora Fim Trabalhos                  | 18:27            | 18:46            |

## Controlo de temperatura no interior dos túneis - P e Q1

| Hora                 | Identificação do molde |         |                             |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min (°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                       | entrada |
| 11:22                | 45,5                   | -       | 36,8                        | -       |
| 11:47                | 46,9                   | -       | 41,1                        | -       |
| 13:02                | 50,0                   | -       | 44,0                        | -       |
| 13:56                | 50,1                   | -       | 44,5                        | -       |
| 15:00                | 50,2                   | -       | 46,3                        | -       |
| 15:31                | -                      | 59,3    | -                           | 66,1    |
| 15:58                | -                      | 75,3    | -                           | 63,3    |
| 16:16                | 48,5                   | -       | 46,6                        | -       |
| <b>Média</b>         | 48,5                   | 67,3    | 43,2                        | 64,7    |
| <b>Média T túnel</b> | 53,2                   |         | 48,6                        |         |

Dados relativos à amassadura com P e aplicação do endurecedor Q2

| Identificação do molde              | 8,5 MPa          | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 15.03.2012       | 15.03.2012       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 19,0             | 19,0             |
| Humidade (%)                        | 44,0             | 44,0             |
| Hora de fabrico                     | 10:19            | 10:19            |
| Temperatura do betão (°C)           | 19,8             | 19,8             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:24            | 10:24            |
| Abaixamento registado (cm)          | 10,0 (Classe S3) | 10,0 (Classe S3) |
| Hora colocação betão base           | 11:04            | 11:04            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 16:37            | 16:31            |
| Hora colocação endurecedor          | 16:40            | 17:16            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72             | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 1,856            | 1,556            |
| Hora 1º afagamento                  | 16:44            | 17:23            |
| Hora 2º afagamento                  | 17:01            | 17:35            |
| Hora 3º afagamento                  | 17:09            | 17:43            |
| Hora 4º afagamento                  | -                | -                |
| Hora 5º afagamento                  | -                | -                |
| Hora Fim Trabalhos                  | 17:15            | 17:48            |

Controlo de temperatura no interior dos túneis - P e Q2

| Hora                 | Identificação do molde |         |                             |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min (°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                       | entrada |
| 11:30                | 40,4                   | -       | 45,2                        | -       |
| 11:56                | 43,7                   | -       | 47,5                        | -       |
| 13:41                | 47,4                   | -       | 50,7                        | -       |
| 14:02                | -                      | 56,7    | -                           | 72,4    |
| 14:57                | -                      | 51,8    | -                           | 75,3    |
| 16:01                | 47,8                   | -       | 46,0                        | -       |
| <b>Média</b>         | 44,8                   | 54,3    | 47,4                        | 73,9    |
| <b>Média T túnel</b> | 48,0                   |         | 56,2                        |         |

## Dados relativos à amassadura com P e aplicação do endurecedor C

| Identificação do molde              | 8,5 MPa          | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 16.03.2012       | 16.03.2012       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 19,6             | 19,6             |
| Humidade (%)                        | 51,0             | 51,0             |
| Hora de fabrico                     | 10:24            | 10:24            |
| Temperatura do betão (°C)           | 20,6             | 20,6             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:28            | 10:28            |
| Abaixamento registado (cm)          | 15,0 (Classe S3) | 15,0 (Classe S3) |
| Hora colocação betão base           | 11:17            | 11:17            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 16:58            | 16:31            |
| Hora colocação endurecedor          | 17:00            | 17:17            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72             | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 1,389            | 1,294            |
| Hora 1º afagamento                  | 17:04            | 17:23            |
| Hora 2º afagamento                  | 17:15            | 17:37            |
| Hora 3º afagamento                  | 17:29            | 17:51            |
| Hora 4º afagamento                  | 17:46            | 18:03            |
| Hora 5º afagamento                  | 17:57            | 18:17            |
| Hora Fim Trabalhos                  | 18:01            | 18:20            |

## Controlo da temperatura no interior dos túneis - P e C

| Hora                 | Identificação do molde |         |                             |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min (°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                       | entrada |
| 12:04                | 46,2                   | -       | 48,5                        | -       |
| 13:15                | 49,3                   | -       | 46,6                        | -       |
| 14:00                | 47,8                   | -       | 46,5                        | -       |
| 15:02                | 47,5                   | -       | 52,0                        | -       |
| 15:30                | -                      | 56,1    | -                           | 73,0    |
| 16:02                | -                      | 56,3    | -                           | 65,4    |
| 16:30                | 46,5                   | -       | 51,0                        | -       |
| <b>Média</b>         | 47,5                   | 56,2    | 48,9                        | 69,2    |
| <b>Média T túnel</b> | 50,0                   |         | 54,7                        |         |

Dados relativos à amassadura com SP e aplicação do endurecedor B1

| Identificação do molde              | 8,5 MPa    | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 20.03.2012 | 20.03.2012       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 16,8       | 16,8             |
| Humidade (%)                        | 48,0       | 48,0             |
| Hora de fabrico                     | 10:12      | 10:12            |
| Temperatura do betão (°C)           | 16,6       | 16,6             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:16      | 10:16            |
| Abaixamento registado (cm)          | 15,5       | 15,5             |
| Hora colocação betão base           | 11:05      | 11:05            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 15:25      | 15:04            |
| Hora colocação endurecedor          | 15:27      | 15:52            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72       | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 1,700      | 1,306            |
| Hora 1º afagamento                  | 15:31      | 15:55            |
| Hora 2º afagamento                  | 15:44      | 16:11            |
| Hora 3º afagamento                  | 16:04      | 16:31            |
| Hora 4º afagamento                  | 16:18      | 16:52            |
| Hora 5º afagamento                  | -          | -                |
| Hora Fim Trabalhos                  | 16:28      | 16:59            |

Controlo da temperatura no interior dom túneis - SP e B1

| Hora                 | Identificação do molde |         |                             |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min (°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                       | entrada |
| 12:06                | 40,3                   | -       | 44,9                        | -       |
| 13:29                | 40,4                   | -       | 43,1                        | -       |
| 14:13                | 39,5                   | -       | 50,0                        | -       |
| 14:30                | 40,1                   | -       | 46,8                        | -       |
| 14:46                | -                      | 53,5    | -                           | 62,1    |
| 14:54                | -                      | 55,0    | -                           | 61,0    |
| 15:25                | 41,0                   | -       | 45,9                        | -       |
| <b>Média</b>         | 40,3                   | 54,3    | 46,1                        | 61,6    |
| <b>Média T túnel</b> | 44,3                   |         | 50,5                        |         |

**Dados relativos à amassadura com SP e aplicação do endurecedor B2**

| Identificação do molde              | 8,5 MPa    | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 21.03.2012 | 21.03.2012       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 17,6       | 17,6             |
| Humidade (%)                        | 35,0       | 35,0             |
| Hora de fabrico                     | 10:20      | 10:20            |
| Temperatura do betão (°C)           | 17,1       | 17,1             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:25      | 10:25            |
| Abaixamento registado (cm)          | 15,0       | 15,0             |
| Hora colocação betão base           | 11:13      | 11:13            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 15:02      | 14:53            |
| Hora colocação endurecedor          | 15:05      | 15:38            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72       | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 1,133      | 1,417            |
| Hora 1º afagamento                  | 15:09      | 15:42            |
| Hora 2º afagamento                  | 15:20      | 16:00            |
| Hora 3º afagamento                  | 15:31      | 16:17            |
| Hora 4º afagamento                  | 15:51      | -                |
| Hora 5º afagamento                  | -          | -                |
| Hora Fim Trabalhos                  | 15:58      | 16:30            |

**Controlo de temperatura no interior dos túneis - SP e B2**

| Hora                 | Identificação do molde |         |                             |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min (°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                       | entrada |
| 11:55                | 39,2                   | -       | 43,1                        | -       |
| 13:13                | 43,0                   | -       | 45,6                        | -       |
| 13:55                | 43,3                   | -       | 47,6                        | -       |
| 14:30                | 42,5                   | -       | 50,0                        | -       |
| 14:46                | -                      | 51,9    | -                           | 74,4    |
| 15:31                | -                      | -       | -                           | 74,6    |
| <b>Média</b>         | 42,0                   | 51,9    | 46,6                        | 74,5    |
| <b>Média T túnel</b> | 44,0                   |         | 55,9                        |         |

## Dados relativos à amassadura com SP e aplicação do endurecedor Q1

| Identificação do molde              | 8,5 MPa    | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 22.03.2012 | 22.03.2012       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 17,1       | 17,1             |
| Humidade (%)                        | 36,0       | 36,0             |
| Hora de fabrico                     | 10:02      | 10:02            |
| Temperatura do betão (°C)           | 17,6       | 17,6             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:06      | 10:06            |
| Abaixamento registado (cm)          | 15,5       | 15,5             |
| Hora colocação betão base           | 10:56      | 10:56            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 14:45      | 14:35            |
| Hora colocação endurecedor          | 14:48      | 15:20            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72       | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 1,028      | 1,472            |
| Hora 1º afagamento                  | 14:51      | 15:23            |
| Hora 2º afagamento                  | 15:07      | 15:47            |
| Hora 3º afagamento                  | 15:15      | 16:00            |
| Hora 4º afagamento                  | 15:35      | 16:21            |
| Hora 5º afagamento                  | -          | -                |
| Hora Fim Trabalhos                  | 15:42      | 16:26            |

## Controlo de temperaturas no interior dos túneis - SP e Q1

| Hora                 | Identificação do molde |         |                             |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min (°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                       | entrada |
| 11:52                | 37,6                   | -       | 50,0                        | -       |
| 13:24                | 45,5                   | -       | 53,0                        | -       |
| 13:58                | 46,6                   | -       | 50,1                        | -       |
| 14:30                | 45,6                   | -       | 50,5                        | -       |
| 14:45                | -                      | 61,0    | -                           | 75,1    |
| <b>Média</b>         | 43,8                   | 61,0    | 50,9                        | 75,1    |
| <b>Média T túnel</b> | 47,3                   |         | 55,7                        |         |

**Dados relativos à amassadura com SP e aplicação do endurecedor Q2**

| Identificação do molde              | 8,5 MPa    | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 23.03.2012 | 23.03.2012       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 20,1       | 20,1             |
| Humidade (%)                        | 36,0       | 36,0             |
| Hora de fabrico                     | 10:09      | 10:09            |
| Temperatura do betão (°C)           | 19,6       | 19,6             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:13      | 10:13            |
| Abaixamento registado (cm)          | 14,7       | 14,7             |
| Hora colocação betão base           | 11:04      | 11:04            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 14:58      | 14:16            |
| Hora colocação endurecedor          | 15:00      | 15:08            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72       | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 1,222      | 1,344            |
| Hora 1º afagamento                  | 15:01      | 15:10            |
| Hora 2º afagamento                  | 15:18      | 15:23            |
| Hora 3º afagamento                  | 15:33      | 15:41            |
| Hora 4º afagamento                  | 15:47      | 16:05            |
| Hora 5º afagamento                  | -          | -                |
| Hora Fim Trabalhos                  | 16:01      | 16:09            |

**Controlo da temperatura no interior dos túneis - SP e Q2**

| Hora                 | Identificação do molde |         |                            |         |
|----------------------|------------------------|---------|----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min(°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                      | entrada |
| 12:09                | 33,3                   | -       | 51,2                       | -       |
| 13:15                | 36,9                   | -       | 51,7                       | -       |
| 13:59                | 36,4                   | -       | 53,4                       | -       |
| 14:15                | 35,9                   | -       | 51,6                       | -       |
| 14:44                | -                      | 45,0    | -                          | 67,1    |
| 14:55                | -                      | 55,1    | -                          | 68,1    |
| <b>Média</b>         | 35,6                   | 50,1    | 52,0                       | 67,6    |
| <b>Média T túnel</b> | 40,4                   |         | 57,2                       |         |

Dados relativos à amassadura com SP e aplicação do endurecedor C

| Identificação do molde              | 8,5 MPa    | 8,5 MPa + 45 min |
|-------------------------------------|------------|------------------|
| Dia da amassadura                   | 26.03.2012 | 26.03.2012       |
| Temperatura ambiente (°C)           | 18,6       | 18,6             |
| Humidade (%)                        | 50,0       | 50,0             |
| Hora de fabrico                     | 10:10      | 10:10            |
| Temperatura do betão (°C)           | 19,1       | 19,1             |
| Hora ensaio de abaixamento          | 10:14      | 10:14            |
| Abaixamento registado (cm)          | 15,5       | 15,5             |
| Hora colocação betão base           | 10:56      | 10:56            |
| Hora obtenção 8,5 MPa               | 14:45      | 14:19            |
| Hora colocação endurecedor          | 14:48      | 15:04            |
| Quant. Endurecedor colocado (kg)    | 0,72       | 0,72             |
| Água adicionada (l/m <sup>2</sup> ) | 1,172      | 1,233            |
| Hora 1º afagamento                  | 14:50      | 15:06            |
| Hora 2º afagamento                  | 15:25      | 15:40            |
| Hora 3º afagamento                  | 15:50      | 16:00            |
| Hora 4º afagamento                  | -          | -                |
| Hora 5º afagamento                  | -          | -                |
| Hora Fim Trabalhos                  | 15:57      | 16:08            |

Controlo da temperatura no interior dos túneis - SP e C

| Hora                 | Identificação do molde |         |                             |         |
|----------------------|------------------------|---------|-----------------------------|---------|
|                      | Temperatura 8,5 (°C)   |         | Temperatura 8,5+45 min (°C) |         |
|                      | saída                  | entrada | saída                       | entrada |
| 11:54                | 45,1                   | -       | 49,8                        | -       |
| 13:02                | 47,0                   | -       | 53,5                        | -       |
| 13:45                | 48,5                   | -       | 54,4                        | -       |
| 14:18                | 46,4                   | -       | 52,4                        | -       |
| 14:32                | -                      | 54,5    | -                           | 77,3    |
| 14:45                | -                      | 66,3    | -                           | 80,5    |
| <b>Média</b>         | 46,8                   | 60,4    | 52,5                        | 78,9    |
| <b>Média T túnel</b> | 51,3                   |         | 61,3                        |         |

## ANEXO K

## Resistência à penetração

## Resistência à penetração – Medições P B1

| Hora         | Secção agulha<br>(mm <sup>2</sup> ) |               | Resistência à compressão |               |     |               |            |               |
|--------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|-----|---------------|------------|---------------|
|              |                                     |               | kgf                      |               | N   |               | MPa        |               |
|              | 8,5                                 | 8,5+45<br>min | 8,5                      | 8,5+45<br>min | 8,5 | 8,5+45<br>min | 8,5        | 8,5+45<br>min |
| 12:06        | 638                                 | 638           | 0                        | 0             | 0   | 0             | 0,0        | 0,0           |
| 13:06        | 638                                 | 638           | 0                        | 0             | 0   | 0             | 0,0        | 0,0           |
| 14:06        | 638                                 | 638           | 2                        | 0             | 16  | 0             | 0,0        | 0,0           |
| 15:06        | 638                                 | 638           | 17                       | 1             | 136 | 8             | 0,3        | 0,0           |
| 15:51        | 320                                 | 320           | 26                       | 3,5           | 208 | 28            | 0,8        | 0,1           |
| 16:21        | 163                                 | 320           | 9                        | 33            | 72  | 264           | 1,7        | 1,0           |
| 16:51        | 32                                  | 65            | 10,5                     | 30            | 84  | 240           | 3,2        | 4,6           |
| 17:05        | 16                                  | 32            | 5                        | 22            | 40  | 176           | 3,2        | 6,8           |
| <b>17:15</b> | 16                                  | 16            | 7                        | 15,5          | 56  | 124           | 4,3        | <b>9,3</b>    |
| 17:25        | 16                                  | -             | 8,5                      | -             | 68  | -             | 5,3        | -             |
| <b>17:35</b> | 16                                  | -             | 15                       | -             | 120 | -             | <b>9,3</b> | -             |
| <b>18:02</b> | -                                   | 16            | -                        | 29            | -   | 232           | -          | <b>17,7</b>   |

**Resistência à penetração – Medições P B2**

| Hora         | Secção agulha<br>(mm <sup>2</sup> ) |               | Resistência à compressão |               |       |               |            |               |
|--------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|-------|---------------|------------|---------------|
|              | 8,5                                 | 8,5+45<br>min | kgf                      |               | N     |               | MPa        |               |
|              |                                     |               | 8,5                      | 8,5+45<br>min | 8,5   | 8,5+45<br>min | 8,5        | 8,5+45<br>min |
| 13:02        | 638                                 | 638           | 0                        | 0             | 0     | 0             | 0,0        | 0,0           |
| 14:02        | 638                                 | 638           | 1                        | 2,5           | 8     | 20            | 0,0        | 0,0           |
| 15:02        | 320                                 | 320           | 6                        | 15            | 48    | 120           | 0,2        | 0,5           |
| 16:02        | 65                                  | 65            | 6,5                      | 6             | 52    | 48            | 1,0        | 0,9           |
| 16:32        | 32                                  | 32            | 11,3                     | 17            | 90,4  | 136           | 3,5        | 4,3           |
| 16:45        | 16                                  | 16            | 6                        | 10            | 48    | 80            | 3,7        | 6,1           |
| <b>16:52</b> | -                                   | 16            | -                        | 15            | -     | 120           | -          | <b>9,3</b>    |
| <b>17:00</b> | 16                                  | -             | 16                       | -             | 128   | -             | <b>9,8</b> | -             |
| 17:15        | 16                                  | -             | 20                       | -             | 160   | -             | 12,2       | -             |
| 17:23        | 16                                  | -             | 20                       | -             | 160   | -             | 12,2       | -             |
| 17:30        | 16                                  | -             | 26                       | -             | 208   | -             | 16,2       | -             |
| <b>17:39</b> | -                                   | 16            | -                        | 30            | -     | 240           | -          | <b>18,5</b>   |
| 17:42        | 16                                  | -             | 27                       | -             | 216   | -             | 16,7       | -             |
| 17:46        | 16                                  | -             | 30                       | -             | 240   | -             | 18,5       | -             |
| 17:54        | 16                                  | -             | 34                       | -             | 272   | -             | 20,9       | -             |
| 18:11        | 16                                  | -             | 43,2                     | -             | 345,6 | -             | 26,5       | -             |
| 18:16        | 16                                  | -             | 44                       | -             | 352   | -             | 27,0       | -             |
| 18:21        | 16                                  | -             | 45                       | -             | 360   | -             | 27,5       | -             |

## Resistência à penetração – Medições P Q1

| Hora  | Secção agulha<br>(mm <sup>2</sup> ) |               | Resistência à compressão |               |       |               |     |               |
|-------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|-------|---------------|-----|---------------|
|       |                                     |               | kgf                      |               | N     |               | MPa |               |
|       | 8,5                                 | 8,5+45<br>min | 8,5                      | 8,5+45<br>min | 8,5   | 8,5+45<br>min | 8,5 | 8,5+45<br>min |
| 13:05 | 638                                 | 638           | 0                        | 0             | 0     | 0             | 0,0 | 0,0           |
| 14:00 | 638                                 | 638           | 2,5                      | 0             | 20    | 0             | 0,0 | 0,0           |
| 15:02 | 638                                 | 638           | 18,3                     | 12,1          | 146,4 | 96,8          | 0,3 | 0,2           |
| 15:32 | 320                                 | 320           | 16                       | 13,9          | 128   | 111,2         | 0,5 | 0,4           |
| 16:01 | 163                                 | 163           | 15                       | 20            | 120   | 160           | 0,9 | 1,2           |
| 16:17 | 163                                 | 163           | 24                       | 35,5          | 192   | 284           | 1,5 | 2,1           |
| 16:30 | 65                                  | 65            | 15,5                     | 30,5          | 124   | 244           | 2,4 | 4,6           |
| 16:36 | -                                   | 32            | -                        | 15,5          | -     | 124           | -   | 4,6           |
| 16:45 | 32                                  | 32            | 12,6                     | 25            | 100,8 | 200           | 3,9 | 7,7           |
| 16:52 | -                                   | 16            | -                        | 16            | -     | 128           | -   | 9,8           |
| 17:05 | 32                                  | -             | 27,5                     | -             | 220   | -             | 8,5 | -             |
| 17:11 | 16                                  | -             | 14                       | -             | 112   | -             | 8,5 | -             |

17:37

esqueci  
tirar  
valor

## Resistência à penetração – Medições P Q2

| Hora  | Secção agulha<br>(mm <sup>2</sup> ) |               | Resistência à compressão |               |     |               |     |               |
|-------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|-----|---------------|-----|---------------|
|       |                                     |               | kgf                      |               | N   |               | MPa |               |
|       | 8,5                                 | 8,5+45<br>min | 8,5                      | 8,5+45<br>min | 8,5 | 8,5+45<br>min | 8,5 | 8,5+45<br>min |
| 13:45 | -                                   | 638           | -                        | 20            | -   | 160           | -   | 0,3           |
| 14:04 | 320                                 | 320           | 8                        | 11            | 64  | 88            | 0,3 | 0,3           |
| 14:58 | 163                                 | 163           | 7                        | 21            | 56  | 168           | 0,4 | 1,3           |
| 15:33 | -                                   | 65            | -                        | 11            | -   | 88            | -   | 1,7           |
| 16:02 | 65                                  | 65            | 16                       | 24,5          | 128 | 196           | 2,4 | 3,7           |
| 16:25 | 32                                  | 32            | 19                       | 24            | 152 | 192           | 5,8 | 7,4           |
| 16:31 | -                                   | 16            | -                        | 22            | -   | 176           | -   | 13,5          |
| 16:37 | 16                                  | -             | 14                       | -             | 112 | -             | 8,5 | -             |
| 17:16 | -                                   | 16            | -                        | 41            | -   | 328           | -   | 25,1          |

**Resistência à penetração – Medições P C**

| Hora         | Secção agulha (mm <sup>2</sup> ) |            | Resistência à compressão |            |     |            |            |             |
|--------------|----------------------------------|------------|--------------------------|------------|-----|------------|------------|-------------|
|              | 8,5                              | 8,5+45 min | kgf                      |            | N   |            | MPa        |             |
|              |                                  |            | 8,5                      | 8,5+45 min | 8,5 | 8,5+45 min | 8,5        | 8,5+45 min  |
| 14:02        | 638                              | 638        | 0                        | 3          | 0   | 24         | 0,0        | 0,0         |
| 15:03        | 320                              | 320        | 2,5                      | 17         | 20  | 136        | 0,1        | 0,5         |
| 15:32        | 163                              | 163        | 10,5                     | 16         | 84  | 128        | 0,6        | 1,0         |
| 16:03        | 163                              | 65         | 25                       | 13         | 200 | 104        | 1,5        | 2,0         |
| <b>16:32</b> | 65                               | 32         | 26                       | 30,7       | 208 | 245,6      | 4,2        | <b>9,4</b>  |
| 16:45        | 32                               | -          | 20                       | -          | 160 | -          | 6,2        | -           |
| 16:50        | 16                               | -          | 12                       | -          | 96  | -          | 7,4        | -           |
| <b>16:51</b> | -                                | 16         | -                        | 29         | -   | 232        | -          | <b>17,7</b> |
| 16:55        | 16                               | -          | 13                       | -          | 104 | -          | 8,0        | -           |
| <b>16:58</b> | 16                               | -          | 14                       | -          | 112 | -          | <b>8,5</b> | -           |
| <b>17:17</b> | -                                | 16         | -                        | 43         | -   | 344        | -          | <b>26,5</b> |

**Resistência à penetração – Medições SP B1**

| Hora         | Secção agulha (mm <sup>2</sup> ) |            | Resistência à compressão |            |     |            |            |             |
|--------------|----------------------------------|------------|--------------------------|------------|-----|------------|------------|-------------|
|              | 8,5                              | 8,5+45 min | kgf                      |            | N   |            | MPa        |             |
|              |                                  |            | 8,5                      | 8,5+45 min | 8,5 | 8,5+45 min | 8,5        | 8,5+45 min  |
| 12:08        | -                                | 638        | -                        | 0          | -   | 0          | -          | 0,0         |
| 13:31        | -                                | 320        | -                        | 22         | -   | 176        | -          | 0,7         |
| 14:15        | -                                | 163        | -                        | 30         | -   | 240        | -          | 1,8         |
| 14:31        | 65                               | 65         | 9                        | 14         | 72  | 112        | 1,4        | 2,1         |
| 14:47        | 65                               | 32         | 19                       | 22,5       | 152 | 180        | 2,9        | 6,9         |
| 14:55        | 32                               | 32         | 10                       | 23,5       | 80  | 188        | 3,1        | 7,2         |
| 15:02        | -                                | 16         | -                        | 13         | -   | 104        | -          | 8,0         |
| <b>15:04</b> | -                                | 16         | -                        | 14         | -   | 112        | -          | <b>8,5</b>  |
| 15:17        | 32                               | -          | 21                       | -          | 168 | -          | 6,5        | -           |
| <b>15:25</b> | 16                               | -          | 14                       | -          | 112 | -          | <b>8,5</b> | -           |
| <b>15:50</b> | -                                | 16         | -                        | 48         | -   | 384        | -          | <b>29,6</b> |

**Resistência à penetração – Medições SP B2**

| Hora         | Secção agulha<br>(mm <sup>2</sup> ) |               | Resistência à compressão |               |     |               |            |               |
|--------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|-----|---------------|------------|---------------|
|              | 8,5                                 | 8,5+45<br>min | kgf                      |               | N   |               | MPa        |               |
|              |                                     |               | 8,5                      | 8,5+45<br>min | 8,5 | 8,5+45<br>min | 8,5        | 8,5+45<br>min |
| 13:14        | 638                                 | 638           | 12                       | 26            | 96  | 208           | 0,2        | 0,4           |
| 13:58        | 163                                 | 163           | 18                       | 25            | 144 | 200           | 1,1        | 1,5           |
| 14:31        | 163                                 | 65            | 26                       | 31            | 208 | 248           | 1,6        | 4,7           |
| 14:47        | 65                                  | 32            | 34                       | 26            | 272 | 208           | 5,1        | 7,9           |
| 14:50        | -                                   | 16            | -                        | 13            | -   | 104           | -          | 8,0           |
| <b>14:53</b> | -                                   | 16            | -                        | 14            | -   | 112           | -          | <b>8,5</b>    |
| 14:54        | 32                                  | -             | 20                       | -             | 160 | -             | 6,1        | -             |
| 15:00        | 16                                  | -             | 12                       | -             | 96  | -             | 7,4        | -             |
| <b>15:02</b> | 16                                  | -             | 15                       | -             | 120 | -             | <b>9,3</b> | -             |
| <b>15:44</b> | -                                   | 16            | -                        | 39,5          | -   | 316           | -          | <b>24,3</b>   |

**Resistência à penetração – Medições SP Q1**

| Hora         | Secção agulha<br>(mm <sup>2</sup> ) |               | Resistência à compressão |               |     |               |            |               |
|--------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|-----|---------------|------------|---------------|
|              | 8,5                                 | 8,5+45<br>min | kgf                      |               | N   |               | MPa        |               |
|              |                                     |               | 8,5                      | 8,5+45<br>min | 8,5 | 8,5+45<br>min | 8,5        | 8,5+45<br>min |
| 11:55        | 638                                 | 638           | 0                        | 0             | 0   | 0             | 0,0        | 0,0           |
| 13:25        | 320                                 | 320           | 19                       | 27            | 152 | 216           | 0,6        | 0,8           |
| 13:59        | 163                                 | 163           | 22                       | 41            | 176 | 328           | 1,3        | 2,5           |
| <b>14:35</b> | 32                                  | 16            | 23                       | 21            | 184 | 168           | 7,0        | <b>13,0</b>   |
| 14:38        | 16                                  | -             | 12                       | -             | 96  | -             | 7,4        | -             |
| <b>14:45</b> | 16                                  | -             | 14,5                     | -             | 116 | -             | <b>9,0</b> | -             |
| 15:03        | -                                   | 16            | -                        | 26            | -   | 208           | -          | 17,2          |
| 15:13        | -                                   | 16            | -                        | 29            | -   | 232           | -          | 17,7          |
| <b>15:22</b> | -                                   | 16            | -                        | 34            | -   | 272           | -          | <b>20,9</b>   |
| 15:46        | -                                   | 16            | -                        | 46            | -   | 368           | -          | 28,3          |
| 15:59        | -                                   | 16            | -                        | 51            | -   | 408           | -          | 30,9          |

## Resistência à penetração – Medições SP Q2

| Hora         | Secção agulha<br>(mm <sup>2</sup> ) |               | Resistência à compressão |               |     |               |            |               |
|--------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|-----|---------------|------------|---------------|
|              | 8,5                                 | 8,5+45<br>min | kgf                      |               | N   |               | MPa        |               |
|              |                                     |               | 8,5                      | 8,5+45<br>min | 8,5 | 8,5+45<br>min | 8,5        | 8,5+45<br>min |
| 12:11        | 638                                 | 638           | 0                        | 0,5           | 0   | 4             | 0,0        | 0,0           |
| 13:16        | 320                                 | 320           | 13                       | 33            | 104 | 264           | 0,4        | 1,0           |
| 14:00        | 163                                 | 65            | 25                       | 23            | 200 | 184           | 1,5        | 3,5           |
| <b>14:16</b> | 65                                  | 16            | 10                       | 15            | 80  | 120           | 1,5        | <b>9,3</b>    |
| 14:31        | 32                                  | -             | 11                       | -             | 88  | -             | 3,5        | -             |
| 14:45        | 32                                  | -             | 16                       | -             | 128 | -             | 4,9        | -             |
| 14:55        | 32                                  | -             | 26,5                     | -             | 212 | -             | 8,1        | -             |
| <b>14:58</b> | 16                                  | -             | 14                       | -             | 112 | -             | <b>8,5</b> | -             |
| <b>15:15</b> | -                                   | 16            | -                        | 40            | -   | 320           | -          | <b>24,6</b>   |

## Resistência à penetração – Medições SP C

| Hora         | Secção agulha<br>(mm <sup>2</sup> ) |               | Resistência à compressão |               |     |               |            |               |
|--------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------|-----|---------------|------------|---------------|
|              | 8,5                                 | 8,5+45<br>min | kgf                      |               | N   |               | MPa        |               |
|              |                                     |               | 8,5                      | 8,5+45<br>min | 8,5 | 8,5+45<br>min | 8,5        | 8,5+45<br>min |
| 11:55        | 638                                 | 638           | 0                        | 0             | 0   | 0             | 0          | 0             |
| 13:04        | 320                                 | 320           | 8                        | 18            | 64  | 144           | 0,3        | 0,6           |
| 13:46        | 163                                 | 163           | 9,5                      | 28            | 76  | 224           | 0,6        | 1,7           |
| 14:00        | 163                                 | 65            | 25                       | 23            | 200 | 184           | 1,5        | 3,5           |
| 14:10        | -                                   | 65            | -                        | 34            | -   | 272           | -          | 5,1           |
| <b>14:19</b> | -                                   | 32            | -                        | 34            | -   | 272           | -          | <b>10,5</b>   |
| 14:25        | 65                                  | -             | 21                       | -             | 168 | -             | 3,2        | -             |
| 14:35        | 32                                  | -             | 15                       | -             | 120 | -             | 4,6        | -             |
| <b>14:45</b> | 16                                  | -             | 14                       | -             | 112 | -             | <b>8,5</b> | -             |
| <b>15:02</b> | -                                   | 16            | -                        | 32            | -   | 256           | -          | <b>19,6</b>   |

## ANEXO L

## Resistência à compressão – índice esclerométrico

| P                 | B1  | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 31     | 30  | 41          | 31           | 30  | 45          |
|                   | 2   | 43     | 50  |             | 45           | 53  |             |
|                   | 3   | 37     | 40  |             | 36           | 37  |             |
|                   | 4   | 41     | 46  |             | 48           | 60  |             |
|                   | 5   | 38     | 41  |             | 40           | 45  |             |
|                   | 6   | 46     | 56  |             | 42           | 49  |             |
|                   | 7   | 36     | 38  |             | 36           | 37  |             |
|                   | 8   | 51     | 65  |             | 46           | 56  |             |
|                   | F 9 | 32     | 31  |             | 36           | 38  |             |

| P                 | B2  | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 28     | 25  | 35          | 30           | 28  | 33          |
|                   | 2   | 36     | 38  |             | 34,5         | 35  |             |
|                   | 3   | 34     | 34  |             | 27           | 23  |             |
|                   | 4   | 37     | 39  |             | 28           | 25  |             |
|                   | 5   | 24     | 20  |             | 34           | 34  |             |
|                   | 6   | 36     | 38  |             | 33           | 33  |             |
|                   | 7   | 35     | 35  |             | 33           | 33  |             |
|                   | 8   | 35     | 36  |             | 35           | 36  |             |
|                   | F 9 | 32     | 31  |             | 34           | 34  |             |

| P                 | Q1  | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 31     | 30  | 41          | 31           | 30  | 36          |
|                   | 2   | 38     | 41  |             | 38           | 41  |             |
|                   | 3   | 32     | 31  |             | 32           | 31  |             |
|                   | 4   | 41     | 47  |             | 33           | 33  |             |
|                   | 5   | 37     | 40  |             | 37           | 39  |             |
|                   | 6   | 42     | 49  |             | 41           | 47  |             |
|                   | 7   | 32     | 31  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 8   | 47     | 58  |             | 35           | 36  |             |
|                   | F 9 | 38     | 41  |             | 32           | 31  |             |

| P                 | Q2  | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 31     | 29  | 52          | 29           | 27  | 40          |
|                   | 2   | 47     | 57  |             | 38           | 41  |             |
|                   | 3   | 44     | 52  |             | 34           | 34  |             |
|                   | 4   | 44     | 52  |             | 47           | 57  |             |
|                   | 5   | 35     | 35  |             | 34           | 34  |             |
|                   | 6   | 49     | 62  |             | 37           | 40  |             |
|                   | 7   | 36     | 38  |             | 40           | 45  |             |
|                   | 8   | 49     | 62  |             | 42           | 49  |             |
|                   | F 9 | 41     | 47  |             | 30           | 28  |             |

| P                 | C   | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 30     | 28  | 41          | 30           | 28  | 38          |
|                   | 2   | 36     | 38  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 3   | 34     | 34  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 4   | 47     | 58  |             | 42           | 49  |             |
|                   | 5   | 56     | 70  |             | 34           | 34  |             |
|                   | 6   | 67     | 70  |             | 36           | 37  |             |
|                   | 7   | 43     | 51  |             | 38           | 41  |             |
|                   | 8   | 43     | 51  |             | 47           | 58  |             |
|                   | F 9 | 38     | 41  |             | 30           | 28  |             |

| SP                | B1  | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 31     | 30  | 49          | 31           | 30  | 36          |
|                   | 2   | 50     | 63  |             | 37           | 39  |             |
|                   | 3   | 35     | 35  |             | 35           | 36  |             |
|                   | 4   | 48     | 60  |             | 35           | 35  |             |
|                   | 5   | 37     | 40  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 6   | 42     | 49  |             | 38           | 40  |             |
|                   | 7   | 42     | 49  |             | 34           | 34  |             |
|                   | 8   | 46     | 56  |             | 36           | 38  |             |
|                   | F 9 | 38     | 40  |             | 31           | 30  |             |

| SP                | B2  | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 30     | 28  | 47          | 30           | 28  | 36          |
|                   | 2   | 37     | 40  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 3   | 33     | 33  |             | 33           | 32  |             |
|                   | 4   | 46     | 56  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 5   | 38     | 41  |             | 35           | 36  |             |
|                   | 6   | 44     | 52  |             | 35           | 36  |             |
|                   | 7   | 41     | 47  |             | 34           | 34  |             |
|                   | 8   | 47     | 57  |             | 38           | 41  |             |
|                   | F 9 | 44     | 52  |             | 32           | 31  |             |

| SP                | Q1  | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 35     | 36  | 47          | 32           | 31  | 36          |
|                   | 2   | 43     | 50  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 3   | 36     | 38  |             | 34           | 34  |             |
|                   | 4   | 44     | 52  |             | 38           | 40  |             |
|                   | 5   | 34     | 34  |             | 35           | 36  |             |
|                   | 6   | 42     | 48  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 7   | 41     | 47  |             | 33           | 33  |             |
|                   | 8   | 52     | 67  |             | 35           | 36  |             |
|                   | F 9 | 36     | 38  |             | 31           | 31  |             |

| SP                | Q2  | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 36     | 38  | 47          | 30           | 28  | 37          |
|                   | 2   | 42     | 49  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 3   | 41     | 47  |             | 34           | 34  |             |
|                   | 4   | 42     | 49  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 5   | 35     | 36  |             | 36           | 38  |             |
|                   | 6   | 41     | 47  |             | 39           | 42  |             |
|                   | 7   | 34     | 34  |             | 33           | 33  |             |
|                   | 8   | 43     | 51  |             | 36           | 37  |             |
|                   | F 9 | 35     | 35  |             | 31           | 30  |             |

| SP                | C   | Lajeta |     |             |              |     |             |
|-------------------|-----|--------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|
|                   |     | 8,5    |     |             | 8,5 + 45 min |     |             |
|                   |     | Valor  | MPa | Mediana MPa | Valor        | MPa | Mediana MPa |
| Número da leitura | I 1 | 31     | 30  | 39          | 28           | 25  | 40          |
|                   | 2   | 40     | 45  |             | 41           | 46  |             |
|                   | 3   | 37     | 39  |             | 38           | 40  |             |
|                   | 4   | 46     | 56  |             | 38           | 41  |             |
|                   | 5   | 36     | 38  |             | 34           | 34  |             |
|                   | 6   | 41     | 47  |             | 46           | 56  |             |
|                   | 7   | 34     | 34  |             | 37           | 40  |             |
|                   | 8   | 40     | 45  |             | 43           | 51  |             |
|                   | F 9 | 32     | 31  |             | 30           | 28  |             |



## ANEXO M

## Arrancamento por pull-off

| P            |           | B1   |      | 14.03.2012                       |     | 19h15m              |  |
|--------------|-----------|------|------|----------------------------------|-----|---------------------|--|
| Lajeta       | Pastilhas | KN   | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa | Rotura              |  |
| 8,5          | I 1       | 6,25 | 6250 | 1963                             | 3,2 | Betão               |  |
|              | 2         | 6,38 | 6380 |                                  | 3,2 | Betão               |  |
|              | 3         | 5,14 | 5140 |                                  | 2,6 | Betão               |  |
|              | 4         | 4,05 | 4050 |                                  | 2,1 | Betão               |  |
|              | F 5       | 4,31 | 4310 |                                  | 2,2 | Betão               |  |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 6,41 | 6410 |                                  | 3,3 | Endurecedor / Betão |  |
|              | 2         | 5,16 | 5160 |                                  | 2,6 | Betão               |  |
|              | 3         | 4,75 | 4750 |                                  | 2,4 | Endurecedor / Betão |  |
|              | 4         | 4,72 | 4720 |                                  | 2,4 | Betão               |  |
|              | F 5       | 5,27 | 5270 |                                  | 2,7 | Betão               |  |

| P            |           | B2   |      | 15.03.2012                       |     | 15h10m              |  |
|--------------|-----------|------|------|----------------------------------|-----|---------------------|--|
| Lajeta       | Pastilhas | KN   | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa | Rotura              |  |
| 8,5          | I 1       | 0,91 | 910  | 1963                             | 0,5 | Endurecedor         |  |
|              | 2         | 3,27 | 3270 |                                  | 1,7 | Endurecedor         |  |
|              | 3         | 3,14 | 3140 |                                  | 1,6 | Endurecedor         |  |
|              | 4         | 4,9  | 4900 |                                  | 2,5 | Endurecedor         |  |
|              | F 5       | 5,52 | 5520 |                                  | 2,8 | Endurecedor         |  |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 3,4  | 3400 |                                  | 1,7 | Endurecedor         |  |
|              | 2         | 2,1  | 2100 |                                  | 1,1 | Endurecedor         |  |
|              | 3         | 2,46 | 2460 |                                  | 1,3 | Endurecedor         |  |
|              | 4         | 5,06 | 5060 |                                  | 2,6 | Endurecedor         |  |
|              | F 5       | 5,37 | 5370 |                                  | 2,7 | Endurecedor / Betão |  |

| P            | Q1        | 21.03.2012 |      | 14h02m                           |     |                     |
|--------------|-----------|------------|------|----------------------------------|-----|---------------------|
| Lajeta       | Pastilhas | KN         | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa | Rotura              |
| 8,5          | I 1       | 3,92       | 3920 | 1963                             | 2,0 | Betão               |
|              | 2         | 3,79       | 3790 |                                  | 1,9 | Betão               |
|              | 3         | 4,69       | 4690 |                                  | 2,4 | Endurecedor         |
|              | 4         | 5,01       | 5010 |                                  | 2,6 | Endurecedor / Betão |
|              | F 5       | 4,23       | 4230 |                                  | 2,2 | Betão               |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 5,29       | 5290 |                                  | 2,7 | Endurecedor         |
|              | 2         | 3,42       | 3420 |                                  | 1,7 | Betão               |
|              | 3         | 4,38       | 4380 |                                  | 2,2 | Endurecedor         |
|              | 4         | 3,92       | 3920 |                                  | 2,0 | Betão               |
|              | F 5       | 4,77       | 4770 |                                  | 2,4 | Betão               |

| P            | Q2        | 22.03.2012 |      | 13h30m                           |     |                     |
|--------------|-----------|------------|------|----------------------------------|-----|---------------------|
| Lajeta       | Pastilhas | KN         | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa | Rotura              |
| 8,5          | I 1       | 3,79       | 3790 | 1963                             | 1,9 | Endurecedor / Betão |
|              | 2         | 3,76       | 3760 |                                  | 1,9 | Betão               |
|              | 3         | 3,5        | 3500 |                                  | 1,8 | Betão               |
|              | 4         | 4,41       | 4410 |                                  | 2,2 | Betão               |
|              | F 5       | 5,55       | 5550 |                                  | 2,8 | Endurecedor / Betão |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 0,60       | 600  |                                  | 0,3 | Endurecedor         |
|              | 2         | 3,09       | 3090 |                                  | 1,6 | Betão               |
|              | 3         | 3,68       | 3680 |                                  | 1,9 | Betão               |
|              | 4         | 3,35       | 3350 |                                  | 1,7 | Betão               |
|              | F 5       | 3,09       | 3090 |                                  | 1,6 | Betão               |

| P            |           | C    |      | 23.03.2012                       |     | 13h26m              |  |
|--------------|-----------|------|------|----------------------------------|-----|---------------------|--|
| Lajeta       | Pastilhas | KN   | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa | Rotura              |  |
| 8,5          | I 1       | 3,45 | 3450 | 1963                             | 1,8 | Betão               |  |
|              | 2         | 3,84 | 3840 |                                  | 2,0 | Endurecedor / Betão |  |
|              | 3         | 4,33 | 4330 |                                  | 2,2 | Betão               |  |
|              | 4         | 3,97 | 3970 |                                  | 2,0 | Betão               |  |
|              | F 5       | 5,19 | 5190 |                                  | 2,6 | Betão               |  |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 3,66 | 3660 |                                  | 1,9 | Endurecedor         |  |
|              | 2         | 2,83 | 2830 |                                  | 1,4 | Endurecedor / Betão |  |
|              | 3         | 3,48 | 3480 |                                  | 1,8 | Betão               |  |
|              | 4         | 3,11 | 3110 |                                  | 1,6 | Betão               |  |
|              | F 5       | 3,37 | 3370 |                                  | 1,7 | Betão               |  |

| SP           |           | B1   |      | 27.03.2012                       |     | 13h40m              |  |
|--------------|-----------|------|------|----------------------------------|-----|---------------------|--|
| Lajeta       | Pastilhas | KN   | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa | Rotura              |  |
| 8,5          | I 1       | 5,94 | 5940 | 1963                             | 3,0 | Endurecedor / Betão |  |
|              | 2         | 5,37 | 5370 |                                  | 2,7 | Betão               |  |
|              | 3         | 5,91 | 5910 |                                  | 3,0 | Endurecedor / Betão |  |
|              | 4         | 6,43 | 6430 |                                  | 3,3 | Betão               |  |
|              | F 5       | 5,29 | 5290 |                                  | 2,7 | Betão               |  |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 4,10 | 4100 |                                  | 2,1 | Endurecedor         |  |
|              | 2         | 2,05 | 2050 |                                  | 1,0 | Endurecedor         |  |
|              | 3         | 5,47 | 5470 |                                  | 2,8 | Endurecedor         |  |
|              | 4         | 4,95 | 4950 |                                  | 2,5 | Endurecedor         |  |
|              | F 5       | 5,65 | 5650 |                                  | 2,9 | Endurecedor         |  |

| SP           | B2        | 28.03.2012 |      |                                  | 12h20m |             |
|--------------|-----------|------------|------|----------------------------------|--------|-------------|
| Lajeta       | Pastilhas | KN         | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa    | Rotura      |
| 8,5          | I 1       | 3,71       | 3710 | 1963                             | 1,9    | Endurecedor |
|              | 2         | 4,51       | 4510 |                                  | 2,3    | Endurecedor |
|              | 3         | 5,63       | 5630 |                                  | 2,9    | Endurecedor |
|              | 4         | 5,63       | 5630 |                                  | 2,9    | Betão       |
|              | F 5       | 5,01       | 5010 |                                  | 2,6    | Endurecedor |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 0,96       | 960  |                                  | 0,5    | Endurecedor |
|              | 2         | 2,05       | 2050 |                                  | 1,0    | Endurecedor |
|              | 3         | 2,57       | 2570 |                                  | 1,3    | Endurecedor |
|              | 4         | 1,12       | 1120 |                                  | 0,6    | Endurecedor |
|              | F 5       | 1,95       | 1950 |                                  | 1,0    | Endurecedor |

| SP           | Q1        | 29.03.2012 |      |                                  | 14h20m |                     |
|--------------|-----------|------------|------|----------------------------------|--------|---------------------|
| Lajeta       | Pastilhas | KN         | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa    | Rotura              |
| 8,5          | I 1       | 3,69       | 3690 | 1963                             | 1,9    | Endurecedor         |
|              | 2         | 4,31       | 4310 |                                  | 2,2    | Endurecedor/ Betão  |
|              | 3         | 5,39       | 5390 |                                  | 2,7    | Endurecedor         |
|              | 4         | 5,65       | 5650 |                                  | 2,9    | Betão               |
|              | F 5       | 5,78       | 5780 |                                  | 2,9    | Endurecedor / Betão |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 2,49       | 2490 |                                  | 1,3    | Endurecedor         |
|              | 2         | 1,97       | 1970 |                                  | 1,0    | Endurecedor         |
|              | 3         | 2,41       | 2410 |                                  | 1,2    | Endurecedor         |
|              | 4         | 4,64       | 4640 |                                  | 2,4    | Betão               |
|              | F 5       | 4,56       | 4560 |                                  | 2,3    | Endurecedor         |

| SP           |           | Q2   |      | 30.03.2012                       |     | 16h05m              |  |
|--------------|-----------|------|------|----------------------------------|-----|---------------------|--|
| Lajeta       | Pastilhas | KN   | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa | Rotura              |  |
| 8,5          | I 1       | 3,4  | 3400 | 1963                             | 1,7 | Endurecedor / Betão |  |
|              | 2         | 5,55 | 5550 |                                  | 2,8 | Endurecedor / Betão |  |
|              | 3         | 5,08 | 5080 |                                  | 2,6 | Endurecedor         |  |
|              | 4         | 3,86 | 3860 |                                  | 2,0 | Betão               |  |
|              | F 5       | 4,93 | 4930 |                                  | 2,5 | Endurecedor / Betão |  |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 2,52 | 2520 |                                  | 1,3 | Endurecedor         |  |
|              | 2         | 0,1  | 100  |                                  | 0,1 | Endurecedor         |  |
|              | 3         | 4,56 | 4560 |                                  | 2,3 | Endurecedor         |  |
|              | 4         | 3,22 | 3220 |                                  | 1,6 | Endurecedor         |  |
|              | F 5       | 4,62 | 4620 |                                  | 2,4 | Endurecedor         |  |

| SP           |           | C    |      | 02.04.2010                       |     | 15h00m      |  |
|--------------|-----------|------|------|----------------------------------|-----|-------------|--|
| Lajeta       | Pastilhas | KN   | N    | Área pastilha (mm <sup>2</sup> ) | MPa | Rotura      |  |
| 8,5          | I 1       | 0,91 | 910  | 1963                             | 0,5 | Endurecedor |  |
|              | 2         | 4,36 | 4360 |                                  | 2,2 | Endurecedor |  |
|              | 3         | 5,63 | 5630 |                                  | 2,9 | Endurecedor |  |
|              | 4         | 5,06 | 5060 |                                  | 2,6 | Endurecedor |  |
|              | F 5       | 5,63 | 5630 |                                  | 2,9 | Betão       |  |
| 8,5 + 45 min | I 1       | 0,7  | 700  |                                  | 0,4 | Endurecedor |  |
|              | 2         | 0,44 | 440  |                                  | 0,2 | Endurecedor |  |
|              | 3         | 1,43 | 1430 |                                  | 0,7 | Endurecedor |  |
|              | 4         | 0,65 | 650  |                                  | 0,3 | Endurecedor |  |
|              | F 5       | 6,12 | 6120 |                                  | 3,1 | Endurecedor |  |

