



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Mestrado em Engenharia Civil
Especialização em Construção

Influência da forma de aplicação de um endurecedor de superfície em diferentes betões de base

Óscar Filipe Barradas Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientadora:
Maria Teresa Guerra Pinheiro Alves

Évora, Julho de 2013

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Mestrado em Engenharia Civil
Especialização em Construção

Influência da forma de aplicação de um endurecedor de superfície em diferentes betões de base

Óscar Filipe Barradas Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

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

Orientadora:
Maria Teresa Guerra Pinheiro Alves

Évora, Julho de 2013

Agradecimentos

À minha orientadora e professora Maria Teresa Pinheiro Alves, por toda a ajuda prestada e sabedoria transmitida.

Ao Professor António Bettencourt Ribeiro do LNEC e ao próprio LNEC pelo tempo dispensado para a realização dos ensaios desta dissertação.

Às empresas BritoBetão, SIKA, Basf e Duro-Europa pelos materiais oferecidos.

À minha família pela ajuda prestada, apoio e incentivo transmitidos em todas as etapas de formação e pessoais.

Às minhas colegas de trabalho Ana Vieira e Cíntia Freitas pela ajuda prestada na execução dos ensaios laboratoriais, ideias e paciência.

À Maria João Marques pelo apoio e ajuda prestada em todas as minhas dúvidas.

Um Obrigado a todos!

Resumo

Muitos têm sido os problemas observados em pavimentos de betão posteriormente à aplicação de endurecedores de superfície. Fissuração e delaminação da superfície são deficiências que têm sido observadas essencialmente em situações de Verão e/ou grande intensidade de vento. Devido ao facto de não existir em Portugal nenhuma legislação no que toca à aplicação e afagamento dos endurecedores em superfícies de betão, esta é deixada ao critério da empresa responsável pela sua aplicação. Seguindo os desenvolvimentos de um projecto de investigação já em curso nesta área, foram preparadas várias lajetas onde foram testadas várias formas de aplicação de endurecedores de superfície.

Das formas de aplicação de endurecedor ensaiadas e analisadas, quer sejam elas através de normas, fichas técnicas de fornecedores de endurecedores ou até mesmo de empresas que aplicam, verifica-se que todas as metodologias têm o seu fundamento de existência mas com este trabalho pretende-se saber quais são as mais adequadas.

Abstract

The influence of the form of application of a surface hardener in different base concrete.

Many have been the problems observed in concrete pavements after the application of surface hardeners. Cracking and delamination of the surface are deficiencies that have been observed mainly in situations of summer time and/or high wind intensity. Due to the fact that there is no legislation in Portugal in regard to the application of the surface hardeners in concrete surfaces, which is left to the criterion of the company responsible for its implementation. Following the development of a research project in this field which is already in motion, there were prepared several slabs that were tested in several ways of applying surface hardeners.

Of the various ways of applying hardener that were tested and analyzed, whether they are standard, technical datasheets of hardeners and even companies that apply it, it is verified that all methods have their foundation of existence but this work is intended to know which are the most suitable.

Índice

1.	Introdução	15
	1.1. Aspectos Gerais	15
	1.2. Objectivos.....	15
	1.3. Estrutura da dissertação.....	15
2.	Antecedentes	17
3.	Materiais e Metodologias.....	24
	3.1. Materiais.....	24
	3.1.1. Cimento.....	24
	3.1.2. Agregados.....	26
	3.1.3. Água	27
	3.1.4. Adjuvantes	27
	3.1.5. Endurecedor de superfície	28
	3.2. Metodologia.....	28
4.	Resultados obtidos e sua análise	48
5.	Conclusões	63
	BIBLIOGRAFIA.....	65
	ANEXOS.....	68

Índice de Figuras

Figura 1 – Profundidade de penetração da bota de um trabalhador.....	21
Figura 2 – Cimento Portland CEM II/A-L 42,5R.....	24
Figura 3 – Curvas granulométricas dos agregados.....	27
Figura 4 – Cone Abrams.....	29
Figura 5 – Ensaio cone Abrams.....	30
Figura 6 – Cofragem para lajeta de 600 x 300 x 100 mm ³	31
Figura 7 – Vibrador para betão.....	32
Figura 8 – Túneis de vento.....	32
Figura 9 – Cubos para realização ensaio penetrómetro.....	33
Figura 10 – Penetrómetro.....	34
Figura 11 – Esquema dos túneis.....	35
Figura 12 – Protótipo afagador utilizado.....	40
Figura 13 – Tanque de cura.....	41
Figura 14 – Prensa resistência compressão.....	42
Figura 15 – Caroteadora.....	43
Figura 16 – Provetes cilíndricos.....	43
Figura 17 – Cortes da caroteadora.....	44
Figura 18 – Cola.....	45
Figura 19 – Ensaio Pull-Off.....	45
Figura 20 – Esclerómetro.....	47

Índice de quadros

Quadro 1 – Composição química do CEM II/A-L 42,5R	25
Quadro 2 – Ensaio físicos do CEM II/A-L 42,5R.....	26
Quadro 3 – Composições das amassaduras	29
Quadro 4 – Classes de Consistência (NP EN 206 – 1)	31
Quadro 5 – Tipo de ruturas.....	46
Quadro 6 – Temperaturas médias das lajetas	48
Quadro 7 – Evaporação das tinas antes do afagamento (L/m ²)	49
Quadro 8 – Água adicionada para aplicação do endurecedor (L/m ²)	50
Quadro 9 – Quantidade de água disponível nas lajetas antes do afagamento (L/m ²) .	51
Quadro 10 – Imperfeições observadas nas lajetas	54
Quadro 11 – Fissuras nos provetes cilíndricos.....	56
Quadro 12 – Resultados do Pull-Off às composições P	60
Quadro 13 – Resultados do Pull-Off às composições SP	61

Índice de gráficos

Gráfico 1 – Resistência à compressão do CEM II/A-L 42,5R	25
Gráfico 2 – Resistência penetração do betão com plastificante	51
Gráfico 3 – Resistência penetração do betão com superplastificante	52
Gráfico 4 – Média das resistências à compressão cubos de 15 cm de aresta	53
Gráfico 5 – Valores médios da resistência à compressão aos 28 dias em provetes cilíndricos de 50 mm	57
Gráfico 6 – Resultados da resistência à compressão das composições P determinada pelo índice esclerométrico	58
Gráfico 7 – Resultados da resistência à compressão das composições SP determinada pelo índice esclerométrico	58

Índice de Anexos

Quadro 1 – Ábaco resistência penetração 1/3	69
Quadro 3 – Ábaco resistência penetração 3/3	71
Quadro 4 – Abaco esclerométrico	72
Quadro 5 – Dados gerais PA1	72
Quadro 6 – Dados gerais PA2	73
Quadro 7 – Dados gerais PA3	73
Quadro 8 – Dados gerais PA4	74
Quadro 9 – Dados gerais SPA1	74
Quadro 10 – Dados gerais SPA2	75
Quadro 11 – Dados gerais SPA3	75
Quadro 12 – Dados gerais SPA4	76
Quadro 13 – Ensaio Cone de Abrams	76
Quadro 14 – Tempo de presa das lajetas	77
Quadro 15 – Taxa de evaporação das tinas ao fim de 24 horas (L/m ²)	77
Quadro 16 – Registo temperaturas PA1	78
Quadro 17 – Registo temperaturas PA2	78
Quadro 18 – Registo temperaturas PA3	78
Quadro 19 – Registo temperaturas PA4	79
Quadro 20 – Registo temperaturas SPA1	79
Quadro 21 – Registo temperaturas SPA2	79
Quadro 22 – Registo temperaturas SPA3	80
Quadro 23 – Registo temperaturas SPA4	80
Quadro 24 – Ensaio penetrómetro PA1	80
Quadro 25 – Ensaio penetrómetro PA2	81
Quadro 26 – Ensaio penetrómetro PA3	81
Quadro 27 – Ensaio penetrómetro PA4	82
Quadro 28 – Ensaio penetrómetro SPA1	82
Quadro 29 – Ensaio penetrómetro SPA2	83
Quadro 30 – Ensaio penetrómetro SPA3	83
Quadro 31 – Ensaio penetrómetro SPA4	84
Quadro 32 – Resistência Penetração PA1	84
Quadro 33 – Resistência Penetração PA2	85
Quadro 34 – Resistência Penetração PA3	85

Quadro 35 – Resistência Penetração PA4	86
Quadro 36 – Resistência Penetração SPA1	86
Quadro 37 – Resistência Penetração SPA2	87
Quadro 38 – Resistência Penetração SPA3	87
Quadro 39 – Resistência Penetração SPA4	88
Quadro 40 – Resistências à compressão em provetes cúbicos do betão com plastificante.....	88
Quadro 41 – Resistências à compressão em provetes cúbicos do betão com superplastificante.....	89
Quadro 42 – Resistências à compressão em provetes cilíndricos do betão com plastificante.....	90
Quadro 43 – Resistências à compressão em provetes cilíndricos do betão com superplastificante.....	91
Quadro 44 – Cálculos para a Massa volúmica e Porosidade aberta	92

Abreviaturas

A/C	Água/Cimento
Al_2O_3	Óxido de alumínio
CaO	Óxido de cálcio
Cl	Cloretos
ES	Endurecedor de superfície
Fe_2O_3	Óxido de ferro
MgO	Óxido de magnésio
P	Plastificante
PF	Perda ao fogo
RI	Resíduo insolúvel
SiO_2	Óxido de silício
SO_3	Sulfatos
SP	Superplastificante

1. Introdução

1.1. Aspectos Gerais

O uso de endurecedores de superfície (ES) aplicados em superfícies de betão servem para melhorar as características do pavimento, mais propriamente aumentar a sua resistência à abrasão e ao impacto. Devido aos problemas que podem surgir, torna-se necessário avaliar quais os aspectos que condicionam a boa execução deste tipo de pavimentos. Uma vez que esta dissertação está inserida no mestrado de Engenharia Civil do ramo da Construção da Universidade da Évora e também no âmbito de um projecto (PTDC/ECM/105075/2008) que tem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), foram aproveitados os resultados já existentes do projecto e foi preparada mais uma série de ensaios.

1.2. Objectivos

O principal objectivo deste estudo é analisar a Influencia da forma de aplicação de um endurecedor de superfície em diferentes betões de base, verificando até que ponto a forma de aplicação de um endurecedor pode, ou não, ter influência no desempenho dos endurecedores de superfície quando aplicados em betões de base com temperaturas ambientais elevadas e vento. Apesar de não existirem normas portuguesas ou europeias sobre a aplicação deste tipo de materiais, existe uma norma americana ACI Committee 302 [1] que estabelece algumas recomendações, assim como, existem recomendações em fichas técnicas de endurecedores, nomeadamente, das empresas SIB [2] e SIKA [3]. Com base nestas recomendações e no que se verificou ser realizado em obra foi estabelecida uma metodologia de ensaio.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos, sendo eles os seguintes:

- Capítulo 1 – Introdução

Neste primeiro capítulo é efetuada uma primeira abordagem sobre as formas de aplicação do endurecedor de superfície, expostos os objectivos da dissertação e a estrutura da dissertação.

- Capítulo 2 – Antecedentes

No segundo capítulo aborda-se as formas de aplicação do endurecedor segundo a norma e o que é aplicado em obra.

- Capítulo 3 – Materiais e Metodologia

No terceiro capítulo fala-se de todos os materiais utilizados, suas características, locais provenientes e constituições, assim como toda a metodologia dos ensaios realizados, desde as fases de preparação, realização e resultados finais.

- Capítulo 4 – Análise de Resultados obtidos

No quarto capítulo exhibe-se os resultados obtidos nos ensaios e analisa-se os dados.

- Capítulo 5 – Conclusões

No quinto capítulo apresenta-se as conclusões obtidas dos ensaios realizados.

- Bibliografia

Neste capítulo faz-se referência à bibliografia consultada.

- Anexos

Neste capítulo apresentam-se normas e referências complementares.

2. Antecedentes

Nos últimos anos, têm-se verificado problemas nos pavimentos em que houve a aplicação de endurecedores de superfície, mais propriamente a delaminação e/ou fissuração.

Os problemas de delaminação do endurecedor estão associados a vários factores, nomeadamente: à presença várias camadas de endurecedor, isto é, o afagamento de endurecedor ser executado em superfícies muito endurecidas e já demasiado secas ou este ser aplicado em superfícies irregulares [1, 4 e 5]. Outros problemas como a presença de bolhas de ar ou água aprisionada entre o betão e o endurecedor, devido à ascensão de água que esbarra contra a camada de endurecedor fazem com que ocorra a ruptura do endurecedor e conseqüentemente a delaminação [1, 4 e 5].

No que toca à fissuração, verificou-se que diferentes autores associam este problema a: retracções do material por secagem devido ao calor, endurecimento da superfície do betão e até mesmo a aplicações de cargas excessivas [1 e 5]. A fendilhação também é um problema que ocorre fruto de uma evaporação de água excessiva que ocorre em zonas muito quentes, de baixa humidade e vento seco [1 e 5]. Por sua vez, também podem aparecer ondulações, as quais se devem a diferenças de humidade e temperatura entre a superfície de betão e a camada do endurecedor [1 e 5].

Uma vez que se estão a estudar diferentes formas de aplicação de endurecedores interessa conhecer em primeiro lugar as normas, regulamentos e recomendações que existem sobre este tipo de procedimentos. A seguir vão ser descritas as formas e processos de aplicação que são encontrados na bibliografia. Além de analisar estes procedimentos, também foram visitadas várias obras de maneira a verificar como eram aplicados os endurecedores, os quais também serão descritos. As diferenças observadas nestas metodologias de aplicação restringiram-se ao método de vibração do betão utilizado, ao método de espalhamento do endurecedor de superfície e a quantidade de endurecedor de superfície utilizado nos afagamentos, podendo ser observadas nos procedimentos em baixo.

A Norma ACI Committee 302 [1] é uma norma que existe sobre a aplicação de endurecedores e recomenda:

- Após se ter enchido as lajetas e nivelado o betão de base de modo a se obter a altura pretendida, é utilizada uma régua vibratória para compactar, consolidar e extrair bolhas de ar do betão;
- Para eliminar as imperfeições feitas pela régua vibratória, é necessário voltar a nivelar a superfície do betão de base;
- Logo após a conclusão destas actividades descritas anteriormente, distribui-se uniformemente 2/3 da quantidade total de endurecedor na superfície da lajeta;
- Devido à presença de água no betão de base, o endurecedor absorve essa água e escurece de imediato. Deve-se aproveitar esse momento para incorporar o endurecedor na superfície do betão de base;
- Nivelar a superfície da lajeta para eliminar imperfeições e deficiências para preparar o revestimento para o afagamento mecânico;
- Assim que o betão de base consiga suportar o equipamento de afagamento mecânico, considera-se que este apresenta condições para ser aplicado o endurecedor. Esta verificação é feita por um trabalhador que ao realizar uma pegada terá de deixar uma marca inferior a 6 mm de profundidade;
- O 1/3 restante de endurecedor é aplicado na direcção perpendicular à primeira aplicação;
- Nivelam-se o endurecedor da superfície da lajeta para espalhar e remover o excesso de endurecedor;
- Posteriormente afaga-se utilizando o equipamento de afagamento mecânico até que a superfície esteja lisa, densa, brilhante e resistente ao desgaste;
- Para garantir uma adequada hidratação e para diminuir os riscos de fissuração por secagem, deve-se aplicar o produto de cura logo que esteja terminado o afagamento da superfície.

Apesar da norma especificar de uma forma criteriosa a metodologia a utilizar desde a colocação do betão até ao afagamento, nada refere acerca da quantidade de endurecedor de superfície a aplicar. Ela também apresenta recomendações a problemas que possam vir a existir como: solo húmido, solos instáveis, gelo e até mesmo passagem de condutas e cabos.

Além da Norma ACI foi encontrada também uma ficha técnica do fornecedor SIB (Sociedade Industrial de Britagem de Pedra) [2]. Esta ficha técnica recomenda uma aplicação de endurecedor entre 3 a 6 kg/m² e sugere o seguinte procedimento:

- Após se ter enchido as lajetas e nivelado o betão de base de modo a se obter a altura pretendida, vibra-se para compactar, consolidar e extrair bolhas de ar do betão;
- A aplicação do endurecedor é feita por polvilhação (manual ou mecânica) de uma primeira camada do endurecedor, sendo esta aplicada logo após a água do betão ter desaparecido da superfície;
- O intervalo de tempo necessário da aplicação varia consoante a composição do betão, a razão A/C e a temperatura e humidade do local. Como todos estes factores influenciam o tempo necessário, esse intervalo é deixado ao critério do aplicador;
- Uma primeira camada com cerca de 2/3 da quantidade total de endurecedor é aplicada na superfície de betão de base;
- É efetuado o afagamento mecânico sobre toda a superfície de forma a assegurar a incorporação do endurecedor no revestimento de betão;
- Num intervalo de tempo entre 30 a 60 minutos após a conclusão do afagamento da primeira camada de endurecedor é aplicada a segunda camada com o restante 1/3 do endurecedor;
- É feito então um novo afagamento com o mesmo objectivo do anterior, até esta atingir o seu total endurecimento. O intervalo de tempo entre cada um dos afagamentos é variável, em função das características do betão, da temperatura e humidade do ambiente no local da obra;
- Após o acabamento recomenda-se a aplicação de um produto de cura, tendo esta como finalidade evitar uma prematura desidratação do betão e a possível ocorrência de micro-fissuras.

Apesar de ser uma recomendação de um fabricante de endurecedores, esta metodologia pode não ser tão eficaz quando aplicado com outro endurecedor de outro fabricante.

Outro processo de aplicação encontrado foi o da empresa SIKA [3]. Este fornecedor disponibiliza dois processos de aplicação e afagamento distintos.

Se a aplicação do endurecedor for de forma mecânica, temos o seguinte procedimento:

- Após se ter enchido as lajetas e nivelado o betão de base de modo a se obter a altura pretendida, vibra-se para compactar, consolidar e extrair bolhas de ar do betão;

- Com o auxílio de um espalhador automático e de uma régua laser espalha-se uniformemente 5 kg/m^2 sobre o pavimento de betão. Esta operação é realizada pouco tempo depois do betão de base ser colocado de modo a permitir uma hidratação do endurecedor com água existente no betão de base;
- O afagamento e compactação podem começar assim que a superfície tenha capacidade para suportar o peso do afagador mecânico.

A outra forma de aplicação de endurecedor de superfície recomendada é através da forma manual. Este procedimento recomenda o seguinte procedimento:

- Após se ter enchido as lajetas e nivelado o betão de base de modo a se obter a altura pretendida, vibra-se para compactar, consolidar e extrair bolhas de ar do betão;
- Antes de se proceder ao espalhamento, verificar se a superfície da lajeta não possui água, por isso poderá ser necessário remover a água exsudada para maior rapidez ou então esperar que evapore;
- Posteriormente procede-se ao espalhamento de 5 kg/m^2 de endurecedor de superfície sobre o betão em duas fases;
- Na primeira fase espalha-se 3 kg/m^2 e na segunda fase os restantes 2 kg/m^2 de endurecedor. Se o produto for lançado a uma distância superior a 2 metros ou se não houve cuidado no seu espalhamento, existe uma maior probabilidade de ocorrer um amontoamento de material, sendo então necessário usar uma régua para distribuí-lo uniformemente;
- O afagamento é realizado logo após a primeira aplicação de endurecedor para uma compactação do material e após a segunda aplicação do material é então efetuado o afagamento da superfície até esta esteja lisa, densa, brilhante e resistente ao desgaste.

A diferença entre a aplicação do endurecedor de forma mecânica ou manual deve-se ao facto de haver uma disposição mais uniforme do endurecedor sobre a superfície de betão e a dimensão da superfície que se deseja aplicar o endurecedor. A forma mais usual em Portugal de aplicação do endurecedor é pela via manual.

Outro aspecto que também foi importante verificar foi o de como as empresas aplicavam os endurecedores em obra. Após consulta a várias empresas portuguesas, constatou-se que não seguiam as recomendações da norma americana ou de nenhuma das fichas técnicas. O que faziam era utilizar uma metodologia própria. De entre as empresas consultadas são descritas algumas das metodologias adoptadas.

A “**Empresa A**” aplica o endurecedor todo de uma só vez assim que a superfície do betão atingia uma consistência que conseguisse aguentar o peso da talocha mecânica, a qual era medida através da profundidade de penetração da bota de um dos trabalhadores, sendo de aproximadamente 0,5 mm (Figura 1). O procedimento de aplicação adoptado foi o seguinte:

- Imediatamente após a colocação do betão de base, o mesmo é nivelado com uma régua vibratória para extrair as bolhas de ar no interior do betão;
- Para eliminar as imperfeições deixadas pelo vibrador, é novamente nivelada a superfície do betão de base com uma régua de madeira;
- Assim que a pegada de um trabalhador deixar uma marca de cerca 6 mm de profundidade, considera-se que este vai conseguir suportar o peso do afagador mecânico e que apresenta condições para ser aplicado o endurecedor de superfície;
- Posteriormente é espalhado todo o endurecedor em cima da laje com o auxílio de uma pá. A quantidade de endurecedor utilizado foi de 5 kg/m²;
- Nivelam-se o endurecedor da superfície da lajeta para espalhar e remover o excesso de endurecedor com uma pá de pequenas dimensões;
- Adiciona-se água suficiente para o material ter trabalhabilidade suficiente;
- Afaga-se a superfície da lajeta até que esteja lisa;
- Para garantir uma adequada hidratação aplicam o produto de cura logo que esteja terminado o afagamento da superfície.



Figura 1 – Profundidade de penetração da bota de um trabalhador

A “**Empresa B**” também aplicava o endurecedor todo de uma só vez assim que a superfície do betão atingia uma consistência que conseguisse aguentar o peso da talocha mecânica. O procedimento de aplicação foi o seguinte:

- Imediatamente após a colocação do betão de base, o mesmo é nivelado com uma agulha vibratória para extrair as bolhas de ar no interior do betão;
- Para eliminar as imperfeições deixadas pelo vibrador, é novamente nivelada a superfície do betão de base com uma régua de madeira;
- Assim que a pegada de um trabalhador deixar uma marca de cerca 6 mm de profundidade, considera-se que este vai conseguir suportar o peso do afagador mecânico e que apresenta condições para ser aplicado o endurecedor de superfície;
- Posteriormente é espalhado todo o endurecedor em cima da laje com o auxílio de uma pá. A quantidade de endurecedor utilizado foi de 5 kg/m²;
- Nivelam-se o endurecedor da superfície da lajeta para espalhar e remover o excesso de endurecedor com uma pá de pequenas dimensões;
- Adiciona-se água suficiente para o material ter trabalhabilidade suficiente;
- Afaga-se a superfície da lajeta até que esteja lisa;
- Para garantir uma adequada hidratação aplicam o produto de cura logo que esteja terminado o afagamento da superfície.

A “**Empresa C**” aplicava o endurecedor todo de uma só vez assim que a superfície do betão atingia uma consistência que conseguisse aguentar o peso do afagador mecânico. O procedimento de aplicação foi o seguinte:

- Imediatamente após a colocação do betão de base, o mesmo é nivelado com uma régua vibratória para extrair as bolhas de ar no interior do betão;
- Para eliminar as imperfeições deixadas pelo vibrador, é novamente nivelada a superfície do betão de base com uma régua de madeira;
- Assim que a pegada de um trabalhador deixar uma marca de cerca 6 mm de profundidade, considera-se que este vai conseguir suportar o peso do afagador mecânico e que apresenta condições para ser aplicado o endurecedor de superfície;
- Posteriormente é espalhado todo o endurecedor em cima da laje com o auxílio de um espalhador automático. A quantidade de endurecedor utilizado foi de 5 kg/m²;
- Acrescenta-se faltas junto a cantos e ao longo de zanas de encontros verticais;

- Nivelar-se o endurecedor da superfície da lajeta para espalhar e remover o excesso de endurecedor com uma pá de pequenas dimensões;
- Adiciona-se água suficiente para o material ter trabalhabilidade suficiente;
- Afaga-se a superfície da lajeta até que esteja lisa;
- Para garantir uma adequada hidratação aplicam o produto de cura logo que esteja terminado o afagamento da superfície;
- Dependendo da área de endurecedor aplicado, execução da serragem das juntas de dilatação;
- Limpeza do local de trabalho.

Entre todas as metodologias aconselhadas pelas fichas técnicas de fabricantes, normas ou até mesmo pelas executadas pelas empresas que aplicam endurecedor de superfície, todas têm os seus fundamentos de existência e graus de sucesso. Nesta dissertação serão testados alguns deles.

3. Materiais e Metodologias

Neste ponto irão ser descritas todas as características dos materiais utilizados na parte prática da dissertação, assim como todas as metodologias dos ensaios realizados, desde as fases de preparação até aos resultados finais.

3.1. Materiais

3.1.1. Cimento

O cimento utilizado para a realização dos ensaios foi o Cimento Portland CEM II/A-L 42,5R (Figura 2). A escolha recaiu sobre este, por ser o cimento mais utilizado da fabricação deste tipo de betões de base e para poder dar continuidade ao projecto de estudo em que esta dissertação está inserida.



Figura 2 – Cimento Portland CEM II/A-L 42,5R

A composição deste cimento é de 80% a 94% de clínquer Portland, 6% a 20% de Calcário e 0% a 5% de outros constituintes.

A curva de resistência à compressão está indicada no Gráfico 1 e foi fornecida pelo fabricante.

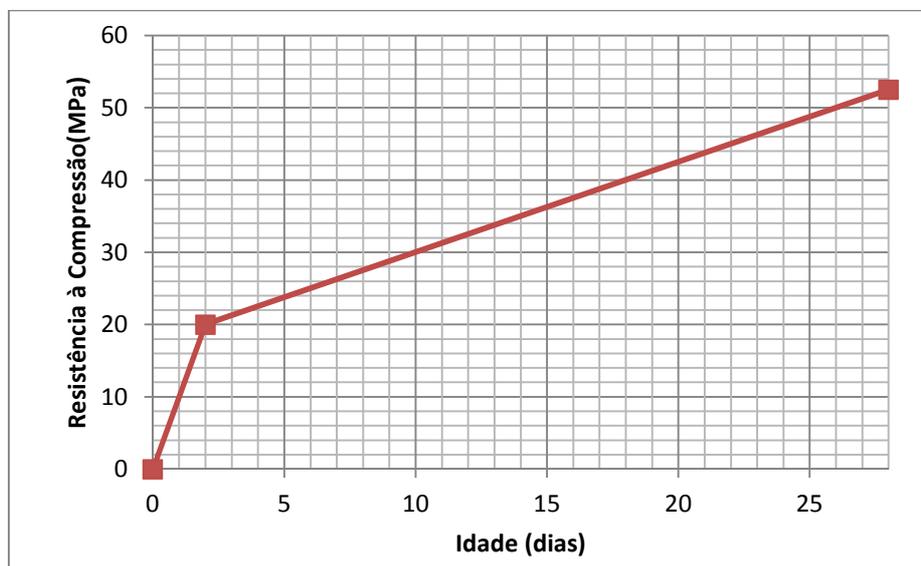


Gráfico 1 – Resistência à compressão do CEM II/A-L 42,5R

A composição química e ensaios físicos estão indicados nos Quadros 1 e 2 e foram fornecidos pelo fabricante.

	Mensal (%)	Anual (%)
SiO ₂	16,36	17,56
Al ₂ O ₃	4,40	4,00
Fe ₂ O ₃	2,81	3,03
CaO	60,84	60,95
MgO	0,95	1,35
SO ₃	2,69	2,92
Cl	0,09	0,06
Cal livre	1,89	1,24
P.F.	7,64	7,38
R.I.	1,18	1,34

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

		Mensal	Anual
Peso específico (g/cm³)		3,05	3,05
Resíduo de Peneiração (%)	32µm-90µm	5,5	4,7
Superfície Especifica de Blaine (cm²/g) [NP EN 196-6]		4634	4999
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		28,2	27,8
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	98	99
	Fim	134	131
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		0,6	0,6

Quadro 2 – Ensaio físicos do CEM II/A-L 42,5R

3.1.2. Agregados

Os agregados utilizados para execução desta dissertação foram 3, uma areia e duas britas. A areia utilizada é de quartzo da região de Alcácer, com diâmetro compreendido entre os 2,36 mm e os 0,075 mm. Esta areia apresenta uma massa volúmica de 2620 kg/m³ e um módulo de finura de 1,81. A percentagem de absorção de água da areia é de 0,0% e a de humidade de 0,11%. Quanto às britas, foram utilizados duas britas da região de Évora: brita 1 e brita 2. A brita 1 é de origem granítica, estando o diâmetro da brita compreendido entre os 2,36 mm e os 24 mm. A massa volúmica é de 2650 kg/m³ e o módulo de finura de 6,35. A Brita 2 é de origem granítica, estando o diâmetro da brita compreendido entre os 9,5 mm e os 30 mm. A massa volúmica é de 2680 kg/m³ e o módulo de finura de 7,22. A percentagem de absorção de água da brita 1 e da brita 2 é de 0,60% enquanto que a percentagem de humidade da brita 1 é de 0,28% e da brita 2 é de 0,23%. As curvas granulométricas dos três agregados estão indicadas na Figura 3.

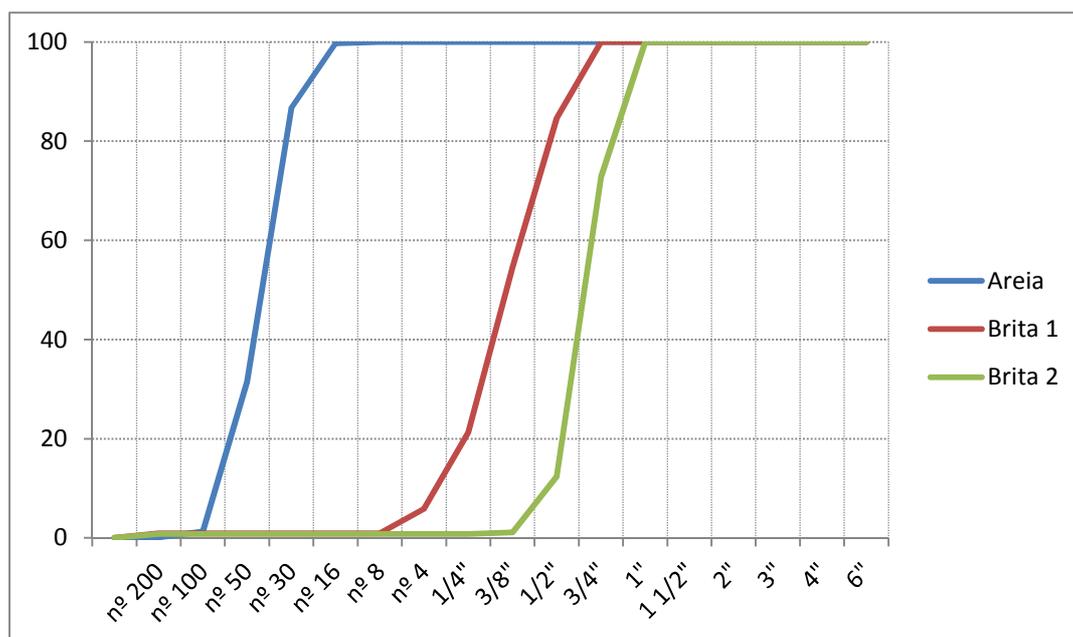


Figura 3 – Curvas granulométricas dos agregados

3.1.3. Água

Toda a água utilizada para a realização dos ensaios foi obtida a partir da rede pública que abastece o pólo da Mitra da Universidade de Évora e está de acordo com a Directiva 98/83/CE [6].

3.1.4. Adjuvantes

Os adjuvantes escolhidos para o fabrico dos betões de base foram um plastificante e um superplastificante.

O plastificante (P) é um adjuvante polifuncional que está de acordo com a norma NP EN 934-2 [7], tendo como função principal ser plastificante e redutor de água. A massa volúmica do adjuvante é 1180 kg/m^3 .

O superplastificante (SP) utilizado cumpre todos os requisitos da norma NP EN 934-2 [7] e está classificado como superplastificante / forte redutor de água para betão. O SP permite-nos obter uma plastificação e uma longa manutenção da

consistência, aliadas a um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas. A massa volúmica do adjuvante é de 1080 kg/m^3 .

Uma vez mais, a escolha dos adjuvantes foi feita com base em anteriores trabalhos no âmbito do projecto de investigação anteriormente referido.

3.1.5. Endurecedor de superfície

O endurecedor de superfície escolhido para a realização destes ensaios foi um endurecedor com agregados quartzíticos. Esta escolha deveu-se a poder dar continuidade aos trabalhos já realizados por Sequeira [8], Fernandes [9] e Marques [10], os quais estão enquadrados no âmbito do projecto de investigação atrás referido.

3.2. Metodologia

Estando esta dissertação inserida no âmbito de um projecto financiado pela FCT e tal como aconteceu com outras dissertações de mestrado da Universidade de Évora realizadas por Sequeira [8], Fernandes [9] e Marques [10]. As composições utilizadas nesta dissertação para os betões de base são as mesmas que foram utilizadas nesses estudos. A consistência para todas as composições foi mantida na classe S3, segundo a NP EN 206-1 [11]. No Quadro 3 estão indicadas as composições.

kg/m ³	Composições	
	P	SP
Brita 2	567	583
Brita 1	569	585
Areia Fina	745	766
Água	173	150
Cimento	347	357
Adjuvante P	3	-
Adjuvante SP	-	3
TOTAL	2404	2443

Quadro 3 – Composições das amassaduras

As amassaduras foram fabricadas numa betoneira, sendo posteriormente verificada a consistência pelo ensaio do cone de Abrams, de acordo com a norma NP EN 12350-2 [12].



Figura 4 – Cone Abrams

Para a concepção deste ensaio, o equipamento deve estar humedecido. A amassadura previamente feita deve ser colocada o mais rápido possível no cone em três fases (1/3 altura) e acompanhado pela realização de 25 pancadas para regularização do betão entre cada camada. Para que a regularização seja bem efetuada, cada camada deve ser compactada sem que o varão de compactação toque no cone. Na última camada deve ser colocado mais material para ser feita uma camada de regularização no topo do cone com o funil. Posteriormente retira-se o excesso de amassadura da placa metálica para que se possa realizar o ensaio de abaixamento com material apenas do cone de Abrams e assim medir-se o abaixamento (Figura 5).



Figura 5 – Ensaio cone Abrams

Para que os ensaios sejam considerados válidos, o abaixamento da amassadura terá de permanecer intacto e simétrico, e o seu valor deverá estar compreendido entre 100 mm e 150 mm, ou seja, uma classe de consistência S3 (Quadro 4). Se por algum motivo o primeiro ensaio de abaixamento falhar, segundo a

norma, poderá ser realizado mais outro ensaio com a mesma amassadura. Mas se não apresentar o valor de abaixamento pretendido, esse betão não poderá ser utilizado para os ensaios posteriores pois não apresentará valores de plasticidade e coesão ideais.

Classe	Abaixamento (mm)
S1	10 a 40
S2	50 a 90
S3	100 a 150
S4	160 a 210
S5	≥ 220

Quadro 4 – Classes de Consistência (NP EN 206 – 1)

Depois de verificada a consistência do betão foi colocada a amassadura em lajetas de 600 x 300 x 100 mm³, cujos moldes foram construídos em madeira e chapa de alumínio (Figura 6). Para impedir a passagem de material ou água foi necessário vedar toda a lajeta com silicone.



Figura 6 – Cofragem para lajeta de 600 x 300 x 100 mm³

Depois de colocado na cofragem, o betão foi vibrado com uma agulha vibratória (Figura 7). Posteriormente foi retirado o material em excesso e alisada a superfície.



Figura 7 – Vibrador para betão

Para simular situações de verão com vento, colocaram-se as lajetas em túneis com 2 termo-ventiladores (Figura 8).



Figura 8 – Túneis de vento

Além de estarem no interior dos túneis as lajetas, foram também colocadas duas tinas com água, uma à entrada e outra à saída, para se poder registar a taxa de

evaporação, assim como, foram colocados uns cubos para determinação das resistências à penetração.

Para a determinação da taxa de evaporação, foram colocadas umas tinas com 2,5 litros de água no interior dos túneis, uma à entrada e outra à saída, como dito anteriormente. De modo a facilitar o seu manuseamento e obtenção de dados no período da realização dos ensaios no estado fresco, evitando assim a perda de material, foi colocado inicialmente apenas 1 litro de água. Foram feitas pesagens das tinas com água, no início dos ensaios (quando foram colocadas as lajetas no interior dos túneis), antes da aplicação dos endurecedores de superfície e passadas as 24 horas das lajetas estarem no interior dos túneis. No instante após a aplicação do endurecedor, adicionou-se mais 1,5 litros de água nas tinas de maneira a perfazer a tina toda e garantir que ao fim de 24 horas ainda existisse água nas tinas. Todas as pesagens e quantidades de água foram registadas e estão indicadas no Quadro 16 do Anexo. A partir da diferença entre a evaporação no início e fim dos túneis é possível saber qual é a taxa de evaporação ao longo do túnel em determinado período.

O outro ensaio que foi necessário realizar, foi a determinação da resistência à penetração na parte argamassada do betão de base. Este ensaio foi feito segundo a norma NP 1387 [13]. Depois da realização da amassadura e de se ter verificado a classe de consistência do betão de base, uma parte do betão é crivado no peneiro de 5 mm, para evitar a passagem dos agregados de maiores dimensões. Com essa parte argamassada do betão enchem-se cubos de dimensão 100 x 100 x 100 mm³ (Figura 9) e colocaram-se no interior dos túneis.



Figura 9 – Cubos para realização ensaio penetrómetro

Com um penetrómetro foi determinada a resistência à penetração, ou seja, o tempo de presa. À medida que a cura do betão vai evoluindo assim se vão utilizando diferentes diâmetros de agulhas (Figura 10).



Figura 10 – Penetrómetro

Este ensaio considera que o início de presa tem início quando a resistência à penetração é de 3,5 MPa e o fim de presa quando atinge os 27,6 MPa. A partir desde ensaio foi possível aplicar o endurecedor no mesmo estado de endurecimento para todas as lajes.

Na seguinte figura (Figura 11) está indicado um esquema da posição de cada um dos elementos no interior dos túneis, assim como, dos 2 termo-ventiladores.

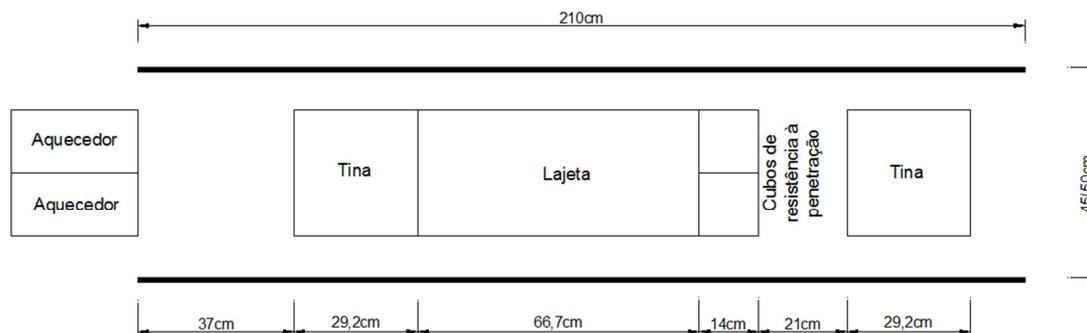


Figura 11 – Esquema dos túneis

Do esquema da Figura 11 verifica-se que a diferença entre os túneis é mínima, tendo no Túnel 8,5MPa+45min um perímetro de 0,707 m enquanto no Túnel 8,5MPa um perímetro de 0,785 m.

Também foram feitos registos das temperaturas à entrada e saída dos túneis, em que à entrada registava uma média de 57,3°C e à saída uma média de 45,6°C. Visto os dois túneis serem ligeiramente diferentes existe uma pequena diferença de dimensões e por essa razão registou-se à entrada uma diferença de 4,9°C e à saída de 1,3°C, entre os túneis 8,5MPa e 8,5MPa+45min.

De acordo com as visitas realizadas a obras, verificou-se que as empresas aplicadoras de endurecedor em Portugal aplicam o endurecedor de superfície no instante em que uma pegada de um trabalhador deixa uma marca de cerca 6 mm de profundidade na superfície do betão (Figura 1). Em anteriores trabalhos realizados por Sequeira [8], Fernandes [9] e Marques [10], verificou-se que o instante a partir do qual começavam a surgir problemas era quando a resistência à penetração atingia o valor de 8,5 MPa. Assim para a realização dos ensaios laboratoriais considerou-se que os ensaios deviam ser realizados quando as lajetas atingiam uma resistência à penetração de 8,5 MPa e outra com um tempo de espera de 45 minutos em relação aos 8,5 MPa de modo a simular um tempo de aplicação do endurecedor já muito tardio. A diferença entre este trabalho e os anteriores é que nesta dissertação é estudada a influência da forma de aplicação do endurecedor.

Assim, para a realização da parte experimental foram utilizadas 4 formas de aplicação do endurecedor, nomeadamente:

- Aplicação 1 (A1) – aplicação do endurecedor segundo a norma americana do ACI;

- Aplicação 2 (A2) – aplicação do endurecedor segundo as fichas técnicas SIB;
- Aplicação 3 (A3) – aplicação do endurecedor todo de uma só vez como em obra;
- Aplicação 4 (A4) – aplicação do endurecedor com manutenção da hidratação do betão de base.

Estas formas de aplicação foram escolhidas porque permitiram estudar metodologias distintas de aplicação do endurecedor e afagamento, de modo a verificar onde se obtêm os melhores resultados e onde surgem mais problemas devido à influência da temperatura e do vento. A seguir são descritas ao pormenor as 4 formas de aplicação do endurecedor de superfície realizadas no trabalho laboratorial desta dissertação.

A1

A primeira aplicação de endurecedor estudada foi um processo de aplicação e afagamento semelhante ao da Norma ACI Committee 302 [1]. O procedimento foi o seguinte:

- Foi colocado o betão de base nas cofragens das lajetas, nivelado e vibrado;
- Para eliminar as imperfeições deixadas pelo vibrador, foi necessário nivelar a superfície do betão com o auxílio de uma pá;
- A colocação do endurecedor de superfície foi realizada em duas fases distintas e visto a norma não fazer referencia a nenhuma recomendação, utilizou-se uma quantidade de 4 kg/m² de endurecedor para dar continuidade ao trabalho já realizado por Sequeira [8], Fernandes [9] e Marques [10];
- Assim, logo após a conclusão da colocação do betão de base nas lajetas, numa primeira fase distribuiu-se uniformemente 2/3 da quantidade total de endurecedor pela superfície da lajeta;
- Devido à presença de água no betão de base, o endurecedor absorve essa água e escurece de imediato. Aproveitou-se esse momento para incorporar o endurecedor na superfície do betão de base;
- Nivelou-se a superfície da lajeta para eliminar imperfeições e deficiências com uma pá;
- Assim que o betão de base apresente uma capacidade resistente de 8,5 MPa, considera-se que este apresenta condições para ser aplicado o endurecedor;

- A lajeta é humedecida com água e posteriormente é colocado o 1/3 restante de endurecedor em cima dela. A água adicionada foi a estritamente necessária para a hidratação do endurecedor;
- De seguida começa-se o afagamento mecânico. O afagamento foi efetuado tantas vezes quanto as necessárias até que a superfície estivesse lisa, densa e brilhante;
- Posteriormente as lajes foram cobertas com uma película antiaderente para garantir uma adequada hidratação e para diminuir os riscos de fissuração por secagem.

A2

A segunda forma de aplicação foi muito idêntica ao procedimento descrito nas fichas técnicas SIB [2]. O procedimento foi realizado como indicado a seguir:

- Foi colocado o betão de base nas cofragens das lajetas, nivelado e vibrado;
- Para eliminar as imperfeições deixadas pelo vibrador, foi necessário nivelar a superfície do betão com o auxílio de uma pá;
- A aplicação do endurecedor foi realizada por polvilhação manual, repartida em duas fazes de aplicação com uma razão de quantidade de 4 kg/m²;
- Após o betão da lajeta adquirir uma capacidade resistente de 8,5 MPa verificase que este apresenta condições para que o endurecedor possa ser aplicado;
- Na primeira fase aplica-se 2/3 da quantidade de endurecedor total e introduz-se no betão de base;
- Um afagamento mecânico é efetuado sobre toda a superfície de forma a assegurar a incorporação do endurecedor no revestimento de betão;
- Antes da aplicação da segunda fase do endurecedor, a lajeta foi humedecida com água. A água adicionada foi a estritamente necessária para a hidratação do endurecedor;
- De seguida começa-se o afagamento mecânico. O afagamento foi efetuado tantas vezes quanto as necessárias até que a superfície estivesse lisa, densa e brilhante;
- Posteriormente as lajes foram cobertas com uma película antiaderente para garantir uma adequada hidratação e para diminuir os riscos de fissuração por secagem.

A3

A terceira aplicação baseou-se na metodologia adoptada por várias empresas em Portugal que aplicam endurecedores. Para a aplicação do endurecedor seguiu-se o seguinte procedimento:

- Foi colocado o betão de base nas cofragens das lajetas, nivelado e vibrado;
- Para eliminar as imperfeições deixadas pelo vibrador, foi necessário nivelar a superfície do betão com o auxílio de uma pá;
- Ao longo da cura do betão foi determinada a resistência à penetração do betão em vários instantes até ao mesmo atingir os 8,5 MPa instante em que foi aplicado o endurecedor;
- Antes da aplicação do endurecedor, a lajeta foi humedecida com água. A água adicionada foi a estritamente necessária para a hidratação do endurecedor;
- O endurecedor da superfície foi aplicado e espalhado uniformemente pela laje, numa quantidade de 4 kg/m²;
- Adicionou-se a água necessária para que todo o endurecedor esteja humedecido e posteriormente afaga-se utilizando o afagador mecânico;
- De seguida começa-se o afagamento mecânico. O afagamento foi efetuado tantas vezes quanto as necessárias até que a superfície estivesse lisa, densa e brilhante;
- Posteriormente as lajes foram cobertas com uma película antiaderente para garantir uma adequada hidratação e para diminuir os riscos de fissuração por secagem.

A4

Como em situações de Verão e de grande intensidade de vento ocorrem mais problemas, achou-se adequado estudar outras formas de aplicação, nomeadamente em que se aplicasse água na superfície de betão de base durante algum tempo antes da aplicação do endurecedor. O procedimento do ensaio foi realizado da seguinte forma:

- Foi colocado o betão de base nas cofragens das lajetas, nivelado e vibrado;
- Para eliminar as imperfeições deixadas pelo vibrador, foi necessário nivelar a superfície do betão com o auxílio de uma pá;

- Duas horas antes do betão de base da lajeta atingir uma capacidade resistente de 8,5 MPa, começou-se a borrifar a superfície de betão de base em intervalos de 15 minutos com água;
- Após a lajeta atingir a capacidade resistente desejada, considera-se que este betão de base apresenta condições para ser aplicado o endurecedor de superfície;
- Antes da aplicação do endurecedor, a lajeta foi humedecida com água. A água adicionada foi a estritamente necessária para a hidratação do endurecedor;
- A quantidade de endurecedor de superfície adoptado foram os 4 kg/m² visto esta aplicação ser baseada na terceira aplicação e para poder dar continuidade ao trabalho já realizado por Sequeira [6], Fernandes [7] e Marques [8];
- O endurecedor de superfície foi aplicado e espalhado uniformemente pela laje;
- Adicionou-se a água necessária para que todo o endurecedor esteja humedecido e posteriormente afaga-se utilizando o afagador mecânico;
- De seguida começa-se o afagamento mecânico. O afagamento foi efetuado tantas vezes quanto as necessárias até que a superfície estivesse lisa, densa e brilhante;
- Posteriormente as lajes foram cobertas com uma película antiaderente para garantir uma adequada hidratação e para diminuir os riscos de fissuração por secagem.

A escolha destas 4 formas de aplicação deveu-se a poder estudar várias metodologias de aplicação do endurecedor. A análise de normas, fichas técnicas de endurecedores, procedimentos utilizados por empresas aplicadoras de endurecedores de superfície e até novas metodologias, foi efetuada de maneira a comparar os resultados obtidos em cada uma delas e assim analisar, onde se verificam mais dificuldades/problemas na aderência do endurecedor ao betão de base, os valores de resistência mais elevados, desempenho em termos de afagamento e melhor aspecto final, tendo em conta as suas diferenças. As diferenças entre estas metodologias restringiram-se nas quantidades de endurecedor utilizado nas suas aplicações de afagamento em que na primeira aplicação incorporou-se parte do endurecedor de superfície no betão ainda no estado fresco, a segunda o afagamento do endurecedor foi repartido em duas fases, a terceira aplicação do endurecedor todo de uma só vez e a última aplicação, uma experimental que se hidratou a superfície de betão. Nas metodologias A1 e A2 em que as aplicações são realizadas em duas fases, na primeira aplicou-se 2/3 do endurecedor total e na segunda fase o restante 1/3 do endurecedor total, esperava-se que o afagamento com uma menor quantidade de

material resultasse em melhores acabamentos finais e consequentemente em melhores resultados de resistência. O facto da aplicação do endurecedor nestas metodologias ter sido repartido por fases fez com que existisse pouco material para afagar de cada vez, o que fez com que na metodologia A1 além de se introduzir no betão fresco 2/3 do endurecedor total ter que se afagar a superfície com apenas 1/3 de endurecedor total, e na metodologia A2 executar mais afagamentos, o que acabaram por ser mais morosos. Juntamente com a metodologia experimental A4 que consistiu em hidratar a superfície do betão resultou também trabalho, comparando com a simplicidade da metodologia A3. Esta análise é muito útil na medida em que vai ajudar as empresas a escolherem de uma forma mais adequada a metodologia de aplicação do endurecedor de superfície em situações de elevada temperatura e vento.

Uma vez que os períodos em que foram efetuadas as aplicações já são um pouco tardios para todas as lajetas houve a necessidade de durante o processo de afagamento adicionar alguma quantidade de água estritamente necessária para que todo o endurecedor estivesse humedecido, algo que é feito em obra. Todas as quantidades de água que foram adicionadas foram registadas (Quadro 15 do Anexo).

O afagamento foi realizado com uma base afagadora e um berbequim. Este sistema também foi desenvolvido por Sequeira [8], Fernandes [9] e Marques [10], tendo tido vários processos de evolução do protótipo até chegar à base afagadora final (Figura 12).



Figura 12 – Protótipo afagador utilizado

Posteriormente à execução das lajetas foram realizados alguns ensaios de maneira a caracterizar o comportamento das mesmas. Foram feitos ensaios para a determinação da resistência à compressão, da resistência ao arrancamento por Pull-Off e índice esclerométrico.

Ensaio de resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão foram utilizados provetes cúbicos de 150 mm de aresta e cilíndricos de 50 mm. Em primeiro lugar houve a necessidade de verificar se os cubos estavam de acordo com a norma NP EN 12390-1 [14]. Após a verificação das dimensões dos cubos, os mesmos foram enchidos com o mesmo betão que tinha sido utilizado para o fabrico das lajetas e curados, de acordo com a norma NP EN 12390-2 [15]. Posteriormente vibrou-se o betão com um vibrador de agulha, removeu-se o material em excesso e nivelou-se a superfície dos cubos. Passadas 24 horas os cubos foram descofrados e colocados num tanque de cura (Figura 13).



Figura 13 – Tanque de cura

Os cubos permaneceram no interior do tanque de cura a uma temperatura de 20 +/- 2°C com circulação de água até à realização do ensaio para determinação da resistência à compressão. Os instantes escolhidos para a realização do ensaio foram os 3, 7 e 28 dias de idade, sendo que para cada idade foram fabricados 2 cubos. A determinação da resistência à compressão foi efetuada de acordo com a NP EN 12390-3 [16] numa prensa Form+test Prufsysteme, modelo Alpha 3 (Figura 14).



Figura 14 – Prensa resistência compressão

Além dos cubos, também foi determinada a resistência à compressão em cilindros de 50 mm. Em primeiro lugar foi necessário utilizar uma caroteadora, a qual é constituída pela própria caroteadora que é fixada por meio de uma estrutura de alumínio e uma base para se poder cortar o betão num ângulo de 90°. Essa base é fixada ao pavimento por vácuo através de um pequeno compressor de modo a permanecer imóvel e minimizar as vibrações feitas pelo funcionamento do equipamento e do próprio corte do betão. Para impedir o sobreaquecimento da broca é adicionada água durante o processo de caroteamento. Uma broca de corte com 5 cm de diâmetro é acoplada à própria caroteadora para realizar o corte do betão (Figura 15).



Figura 15 – Caroteadora

De cada lajeta foram retiradas 2 carotes para serem ensaiados. Os provetes cilíndricos (Figura 16) tiveram de ser cortados e retificados para ficarem com uma altura de 50 mm e na proporção de 1:1. Posteriormente foi determinada a resistência à compressão aos 28 dias de idade.



Figura 16 – Provetes cilíndricos

Ensaio Pull-Off

O ensaio de arrancamento por Pull-Off serve para determinar a força da ligação do endurecedor de superfície ao betão de base. Para a sua realização foi seguida a norma EN 1542 [17]. Em primeiro lugar foi necessário abrir uns pequenos cortes com a ajuda da caroteadora com uma profundidade entre 1,5 cm a 2 cm e afastados entre si (Figura 17).

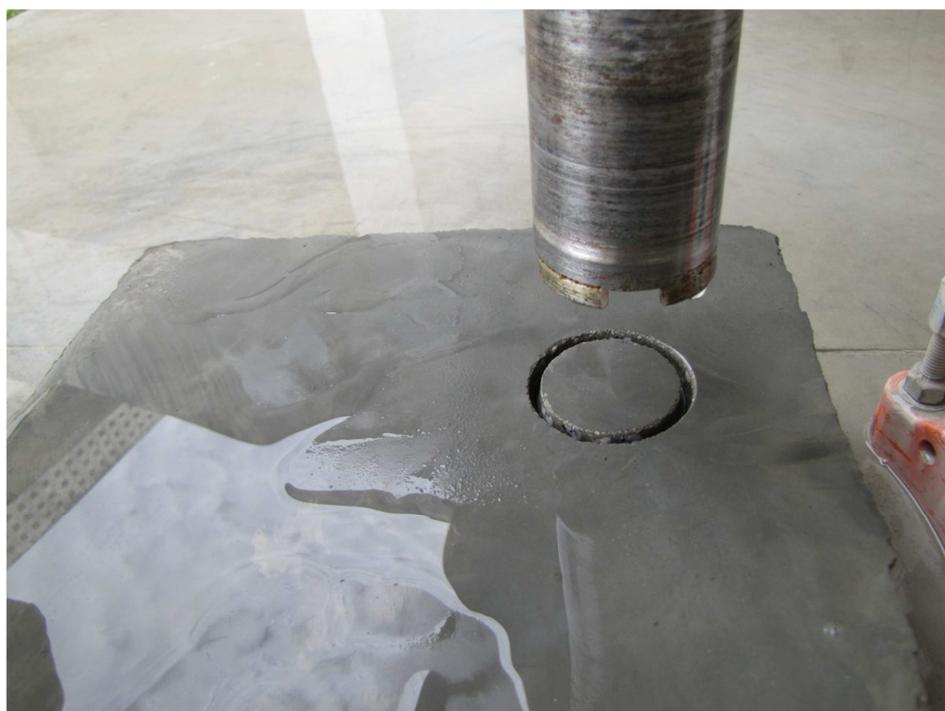


Figura 17 – Cortes da caroteadora

Depois de efetuado o caroteamento, deixou-se que a superfície da lajeta secasse durante 24 horas de maneira a que a cola pudesse aderir correctamente. No local onde foi realizado o corte na lajeta para a execução do ensaio, foi passado com uma pedra abrasiva para eliminar possíveis superfícies brandas ou rugosas, sendo depois limpa com acetona para eliminar poeiras existentes e facilitar a aderência da cola às superfícies. As pastilhas são coladas à superfície de betão com uma cola à base de resina epóxi e deixam-se secar durante 24 horas (Figura 18).



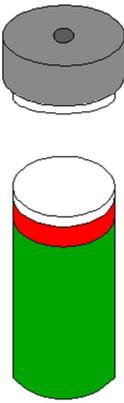
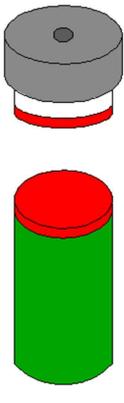
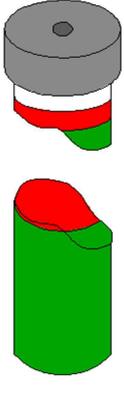
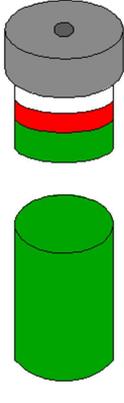
Figura 18 – Cola

Posteriormente procede-se ao ensaio de arrancamento por Pull-Off. Os ensaios foram realizados com um equipamento da marca DYNA e modelo Z16 Proceq (Figura 19).



Figura 19 – Ensaio Pull-Off

Deste ensaio, podem ser obtidos vários tipos de rutura (Quadro 5) sendo que apenas um deles é considerado como positivo, que é a rutura pelo betão. Para diferenciar os tipos de rutura nos ensaios utilizou-se um esquema de cores para simplificar a visualização dos valores da resistência ao arrancamento, em que a cor branca foi para ruturas pela cola, vermelho para ruturas pelo endurecedor, amarelo para ruturas pelo endurecedor/betão, e verde para ruturas pelo betão.

<p>Rutura pela cola</p>	
<p>Rutura pelo endurecedor</p>	
<p>Rutura pelo endurecedor/betão</p>	
<p>Rutura pelo betão</p>	

Quadro 5 – Tipo de ruturas

Índice esclerométrico

Para determinar a dureza de uma superfície realizou-se um ensaio através do esclerómetro ou martelo de Schmidt (Figura 20) e os ensaios foram executados segundo a norma NP EN 12504-2 [18].



Figura 20 – Esclerómetro

Por se tratar de um ensaio de resistência superficial, os valores obtidos são apenas representativos de uma camada até 5 cm de profundidade. No entanto, o ensaio é útil para avaliar a homogeneidade do betão, verificar se existe um determinado nível mínimo de resistência e decidir sobre a necessidade de fazer ensaios complementares. Para a realização deste ensaio, foi necessário preparar a superfície de modo a que não existissem detritos na sua superfície. Por sua vez a cabeça do veio é colocada perpendicularmente à superfície a ensaiar, empurrando o corpo do esclerómetro contra ela, numa forma contínua até a massa se soltar e se ouvir o impacto. Para se ter uma análise fiável dos resultados devem-se executar pelo menos 9 leituras na área de ensaio, devendo-se assegurar que o ensaio não é realizado a menos de 2,5 cm entre pontos e das bordas da lajeta nem dos cortes, e que 20% das leituras obtidas não têm uma divergência inferior ou superior a 30% da mediana dos valores.

O esclerómetro fornece o chamado índice esclerométrico que posteriormente é relacionado com um ábaco para se estimar a resistência à compressão da superfície do material ensaiado. Em cada uma das lajetas foram efetuados 9 ensaios.

4. Resultados obtidos e sua análise

Neste capítulo vão ser apresentados os resultados obtidos e sua análise. Para maior detalhe podem ser consultadas nos Quadros 5-12 do Anexo os dados gerais da execução dos ensaios.

Durante a realização dos ensaios foram registadas as temperaturas à entrada e saída de cada um dos túneis onde permaneciam as lajetas. No Quadro 6 estão indicadas as temperaturas médias registadas para cada uma das lajetas.

Ensaio	Túnel	Temperatura (°C)	
		Entrada	Saída
PA1	8,5MPa	55,1	45,3
	8,5MPa+45min	58,3	47,1
PA2	8,5MPa	55,5	43,3
	8,5MPa+45min	62,1	44,4
PA3	8,5MPa	50,4	42,1
	8,5MPa+45min	50,7	43,3
PA4	8,5MPa	53,7	42,1
	8,5MPa+45min	59,5	46,7
SPA1	8,5MPa	57,7	48,4
	8,5MPa+45min	59,7	48,6
SPA2	8,5MPa	51,7	46,2
	8,5MPa+45min	62,2	46,4
SPA3	8,5MPa	54,4	44,7
	8,5MPa+45min	59,6	45,3
SPA4	8,5MPa	59,9	47,3
	8,5MPa+45min	65,7	48,4

Quadro 6 – Temperaturas médias das lajetas

Através destes dados verifica-se que apesar dos túneis serem muito idênticos houve sempre valores de temperatura ligeiramente diferentes. Um dos factores que levou à variação da temperatura deveu-se ao facto de ser necessário abrir os túneis

para a realização dos ensaios no estado fresco. O levantar dos túneis para a realização dos ensaios faz com que a temperatura desça, mas depois de fechados verificou-se que a temperatura subia de imediato para os valores anteriormente registados. Apesar da diferença de dimensões dos túneis, a média da temperatura à entrada foi de 57,3 °C e à saída de 45,6 °C, conseguindo no meio da lajeta uma média de 51,4 °C. Entre os túneis verificou-se uma diferença máxima de 4,9 °C na entrada e 1,3 °C na saída entre eles. Nos Quadros 16-23 do Anexo podem ser consultados todos os resultados obtidos.

Os valores das taxas de evaporação no interior dos túneis no momento antes do afagamento do endurecedor estão apresentados no Quadro 7. Com os dados destas taxas de evaporação verificam-se diferenças, devido ao facto da dimensão dos túneis serem ligeiramente diferentes e haver por vezes sobreaquecimento dos termoventiladores, havendo a interrupção no seu aquecimento.

Ensaio	Túnel	Tina	
		Entrada	Saída
PA1	8,5MPa	8,9	3,1
	8,5MPa+45min	8,7	3,8
PA2	8,5MPa	6,7	2,0
	8,5MPa+45min	8,8	2,4
PA3	8,5MPa	6,9	2,4
	8,5MPa+45min	8,2	3,6
PA4	8,5MPa	6,7	2,8
	8,5MPa+45min	10,1	4,6
SPA1	8,5MPa	4,2	1,3
	8,5MPa+45min	4,8	1,8
SPA2	8,5MPa	4,6	1,2
	8,5MPa+45min	4,8	2,0
SPA3	8,5MPa	3,9	1,5
	8,5MPa+45min	5,4	2,1
SPA4	8,5MPa	4,3	1,2
	8,5MPa+45 min	4,8	1,6

Quadro 7 – Evaporação das tinas antes do afagamento (L/m²)

A média da taxa de evaporação das tinas antes do afagamento do endurecedor à entrada do túnel foi de 6,4 L/m² e à saída de 2,3 L/m², o que dá uma média a meio do túnel de 4,35 L/m².

A quantidade de água que foi introduzida na aplicação do endurecedor para cada lajeta está indicada no Quadro 8.

Ensaio	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
PA1	0,8	1,0
PA2	1,3	1,4
PA3	1,3	1,2
PA4	1,9	1,7
SPA1	0,9	0,9
SPA2	1,5	1,7
SPA3	1,2	1,4
SPA4	1,7	1,5

Quadro 8 – Água adicionada para aplicação do endurecedor (L/m²)

Em relação aos dados obtidos da água adicionada no processo de afagamento, verificou-se que existiram ensaios que foi necessário adicionar mais água visto a aplicação do endurecedor ter um número de afagamentos superior ou até mesmo ser um processo diferente de aplicação, como se pode observar nos ensaios A2 e A4. Apesar do facto de todas as lajetas terem estado sobre as mesmas condições, estas apresentavam uma superfície muito ressequida, mas constatou-se que os valores de água adicionada variaram desde 0,8 L/m² até 1,9 L/m², conseguindo-se uma média de 1,3 L/m² de água adicionada nas lajetas.

Ensaio	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
PA1	10,5	10,4
PA2	12,4	10,8
PA3	12,1	10,8
PA4	12,0	9,2
SPA1	11,9	11,3
SPA2	11,7	11,2
SPA3	12,0	10,8
SPA4	11,8	11,4

Quadro 9 – Quantidade de água disponível nas lajetas antes do afagamento (L/m²)

A partir dos valores das taxas de evaporação das tinas do Quadro 6, foi elaborado um novo quadro com a estimativa da quantidade de água ainda disponível nas lajetas antes do afagamento da superfície do endurecedor (Quadro 9). De acordo com os valores no quadro a cima indicado, verifica-se que todos os provetes da mesma família são muito idênticos.

Para a determinação do instante em que devia ser aplicado o endurecedor de superfície houve a necessidade de determinar os valores das resistências à penetração, os quais estão indicados nos Gráficos 2 e 3.

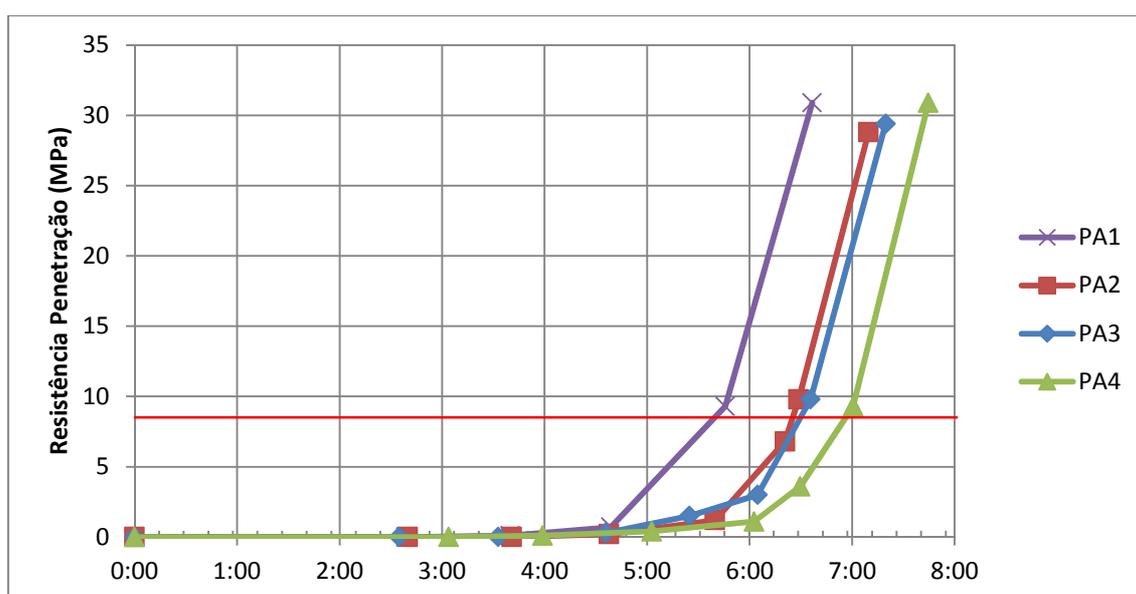


Gráfico 2 – Resistência penetração do betão com plastificante

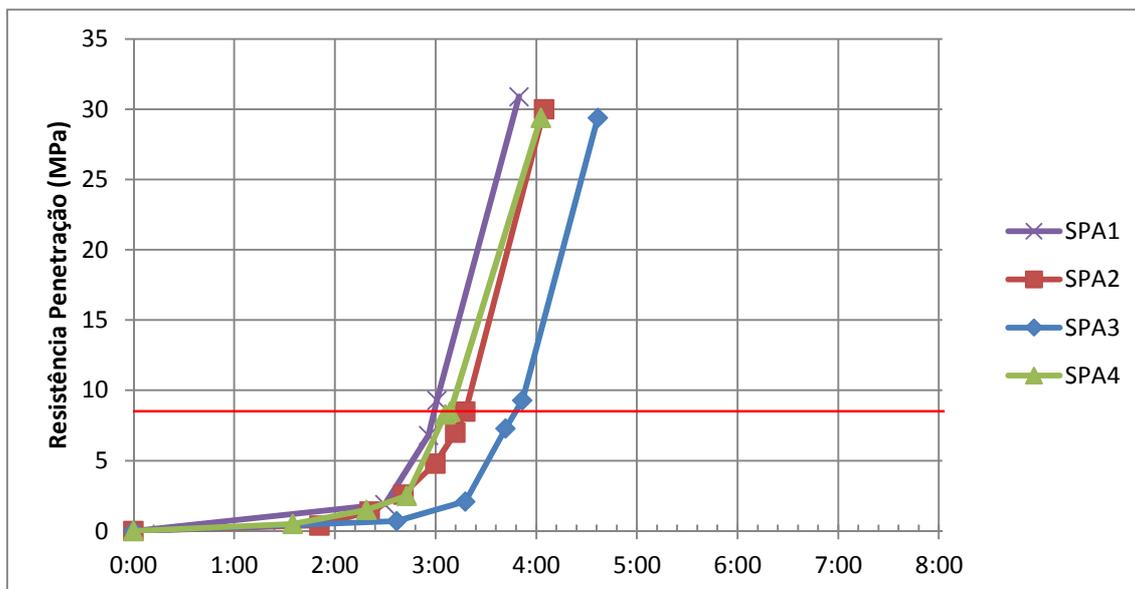


Gráfico 3 – Resistência penetração do betão com superplastificante

Analisando os gráficos da resistência à penetração realizados com um penetrómetro, verifica-se que as lajetas de betão SP são mais rápidas a atingir o instante 8,5 MPa, o que já era de esperar. Isto significa que as lajetas SP até esse instante vão estar menos tempo expostas às elevadas temperaturas e vento antes da aplicação do endurecedor e conseqüentemente não vão perder tanta água por evaporação. Nos Quadros 24-39 do Anexo encontram-se todos os resultados.

Verificou-se que nas lajetas de betão P para além de apresentar na sua composição uma quantidade de água superior, também demoraram mais tempo a atingir a resistência à penetração pretendida de 8,5 MPa, comparando com o betão SP. No entanto, a partir dos cálculos efectuados (Quadro 9), na altura da aplicação do endurecedor de superfície a estimativa da quantidade de água disponível nas composições de betão P e SP eram muito idênticas.

No Gráfico 4 temos a curva de evolução da resistência à compressão das duas composições de betão realizadas em provetes cúbicos de 15 cm de aresta.

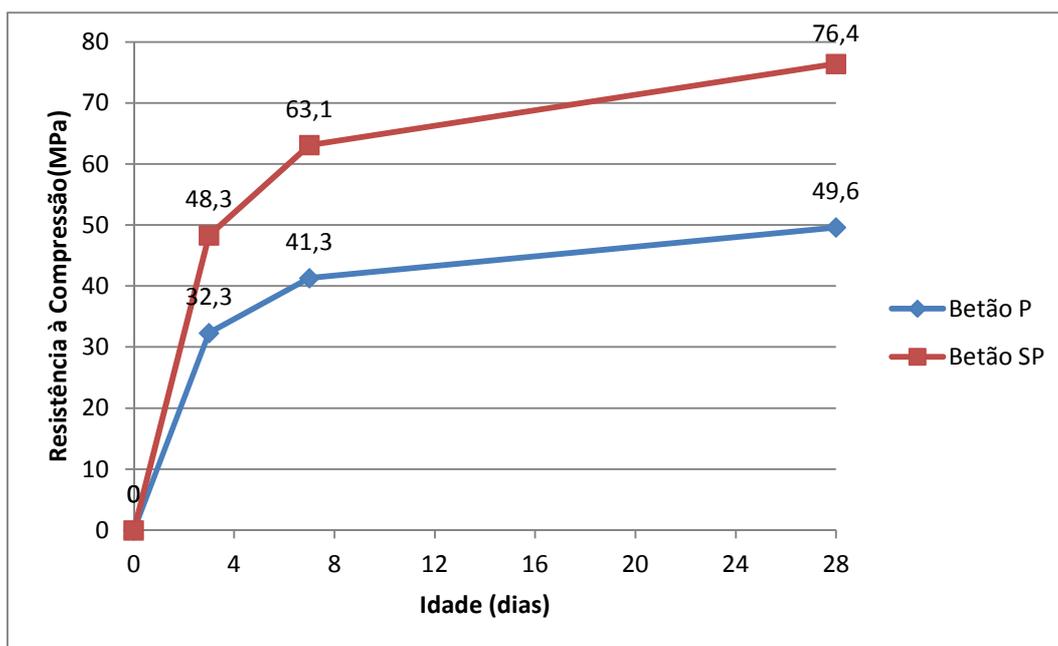


Gráfico 4 – Média das resistências à compressão cubos de 15 cm de aresta

Do gráfico 4 pode-se ver como a composição com SP tem uma resistência superior à composição com P. Logo a partir dos 3 dias de idade esta é superior, mantendo-se claramente superior até aos 28 dias. Aos 28 dias de idade no betão com plastificante obteve-se uma resistência à compressão de 49,6 MPa e no betão com superplastificante um valor de 76,4 MPa, ou seja, uma diferença de 35,1% entre as resistências que se podem considerar significativas. Este incremento de resistência do SP era espectável já que as composições têm uma razão a/c inferior e consequentemente as amostras são mais compactas, com menos vazios. Todos os valores podem ser consultados nos Quadros 40 e 41 do Anexo.

Analisando todas as lajetas visualmente, verifica-se que em todas elas se observaram imperfeições, como se pode ver no Quadro 10.

Imperfeições	Análise visual
<p>Mau afagamento nos cantos</p>	
<p>Afagamento excessivo</p>	
<p>Destacamento do endurecedor</p>	

Quadro 10 – Imperfeições observadas nas lajetas

Em todos os ensaios realizados, observou-se a presença de imperfeições devido à excessiva incidência de calor e vento.

A presença das cofragens dificultou o processo de afagamento nos cantos e nas laterais das lajetas. Essa dificuldade conjugada com a superfície muito ressequida, originou um mau afagamento principalmente dos cantos visto existir uma má ligação do endurecedor ao betão nesses pontos. Por esse motivo, não foram efetuados quaisquer ensaios nessas zonas.

A ocorrência de destacamento de partes do endurecedor deveu-se à inexistência de ligação entre o endurecedor de superfície e o betão.

Zonas queimadas também foram observadas em todas as lajetas. Na tentativa de obter uma superfície lisa originou a que fosse necessário um afagamento excessivo provocando assim uma zona queimada. Esteticamente não é desejável que isto aconteça.

Apesar de se ter verificado que na altura da aplicação do endurecedor as duas composições de betão apresentavam a mesma trabalhabilidade, regra geral a aplicação e afagamento do endurecedor foi mais fácil no betão P do que no betão SP. Além disso, no betão P conseguiu-se uma melhor ligação do endurecedor ao betão fazendo com que existisse menos imperfeições na superfície das lajetas.

Em todos os processos de aplicação e afagamento das superfícies das lajetas, conseguiu-se obter uma superfície lisa e uniforme em todos os locais necessários para executar os ensaios. Mas devido ao facto do afagamento das lajetas ter sido realizado em momentos tardios, verificaram-se dificuldades no seu afagamento assim como imperfeições. Essas imperfeições ocorrem fruto de uma superfície muito ressequida e uma má ligação betão/endurecedor que acabaram por resultar em todas as lajetas em mau afagamento nos cantos, zonas queimadas fruto de um afagamento excessivo e destacamento da superfície endurecedora.

Em relação às metodologias ensaiadas verificou-se que foi a A3, uma aplicação em que a introdução do endurecedor foi colocado todo de uma só vez na superfície de betão, que conferiu o menor número de imperfeições e o melhor aspecto final das lajetas.

O facto das aplicações A1 e A2 serem recomendações de metodologias de uma norma e ficha técnica de um endurecedor, respectivamente, não foi vantajoso em termos de resultados finais obtidos. Devido a estas metodologias possuírem uma

aplicação do endurecedor repartida em duas fases, o processo de afagamento foi mais moroso e ficou com mais imperfeições. A hidratação da superfície da lajeta antes da aplicação do endurecedor conforme realizada na metodologia experimental A4, para além do tempo despendido para a sua execução não foi sinónimo de uma melhor ligação do endurecedor de superfície ao betão de base assim como elevados valores finais de resistência.

Analisando visualmente todas as carotes retiradas das lajetas, todos os provetes cilíndricos foram retirados com sucesso sem quebra da amostra e com a camada de endurecedor intacta, mas analisando mais ao pormenor verificou-se a presença de imperfeições, isto é, fissuras. O que poderá estar relacionado com o excesso de vibração. A presença de fissuras nas carotes podem ser analisadas no Quadro 11.

Betão	Aplicação	Túnel	
		8,5MPa	8,5MPa+45min
P	A1	Não	Sim
		Sim	Não
	A2	Não	Não
		Não	Não
	A3	Não	Sim
		Não	Sim
	A4	Não	Sim
		Não	Sim
SP	A1	Não	Não
		Não	Não
	A2	Não	Não
		Não	Não
	A3	Não	Não
		Não	Não
	A4	Não	Não
		Não	Não

Quadro 11 – Fissuras nos provetes cilíndricos

Além da determinação da resistência à compressão em cubos, as resistências também foram determinadas em carotes cilindros retirados das lajetas e ensaiadas posteriormente aos 28 dias de idade (Gráfico 5).

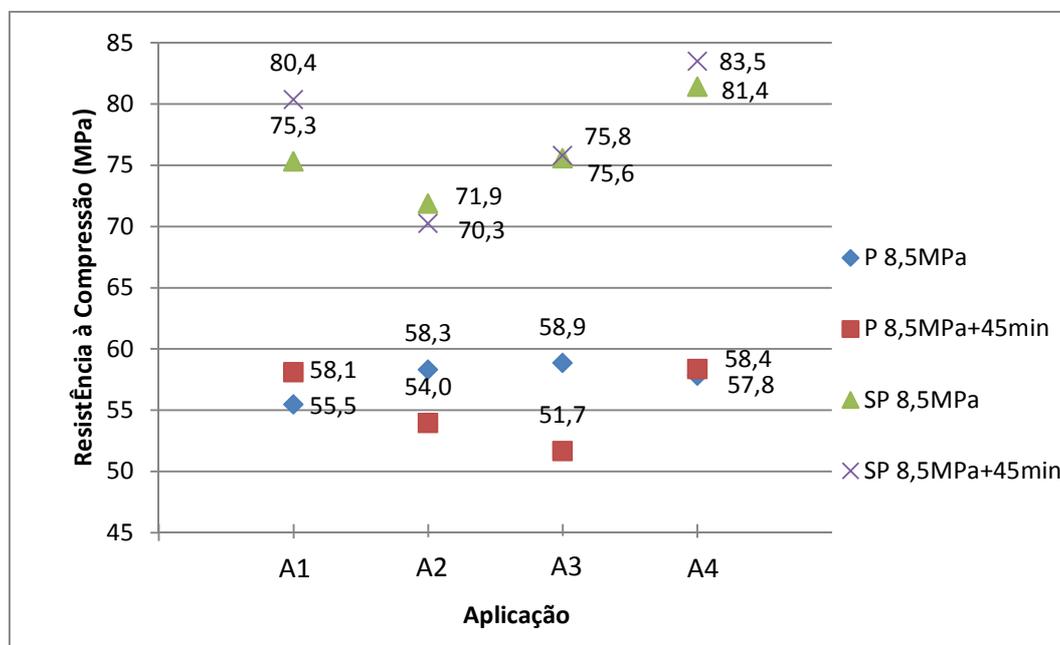


Gráfico 5 – Valores médios da resistência à compressão aos 28 dias em provetes cilíndricos de 50 mm

Uma vez mais, os resultados das amostras feitas com SP apresentam resultados de resistências superiores aos do P, tal como já se tinham verificado nos resultados dos provetes cúbicos. Observando os valores da resistência à compressão aos 28 dias de idade, verifica-se que no betão com PL se obteve uma média de valores de 76,8 MPa enquanto no betão com P se obteve uma média de 56,6 MPa, diferença observada de 26,3 MPa. Todos os valores deste ensaio podem ser consultados com maior detalhe nos Quadros 42 e 43 do Anexo.

Os resultados obtidos nas resistências obtidas pelo esclerómetro entre as 2 composições e as várias formas de aplicação do endurecedor podem ser observadas no Gráfico 6 e 7.

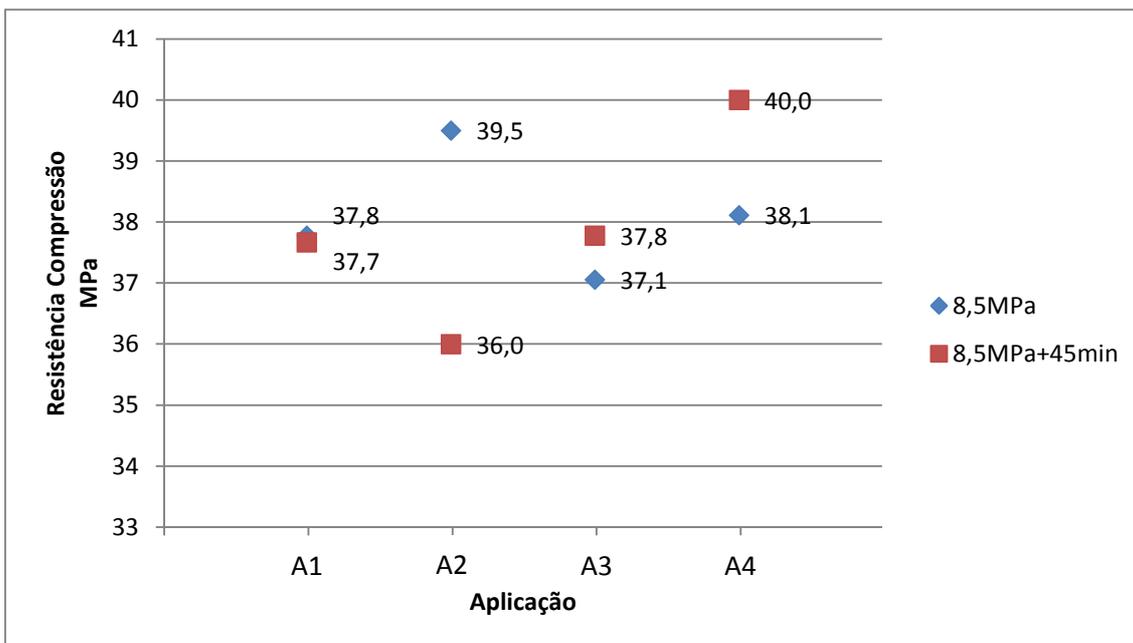


Gráfico 6 – Resultados da resistência à compressão das composições P determinada pelo índice esclerométrico

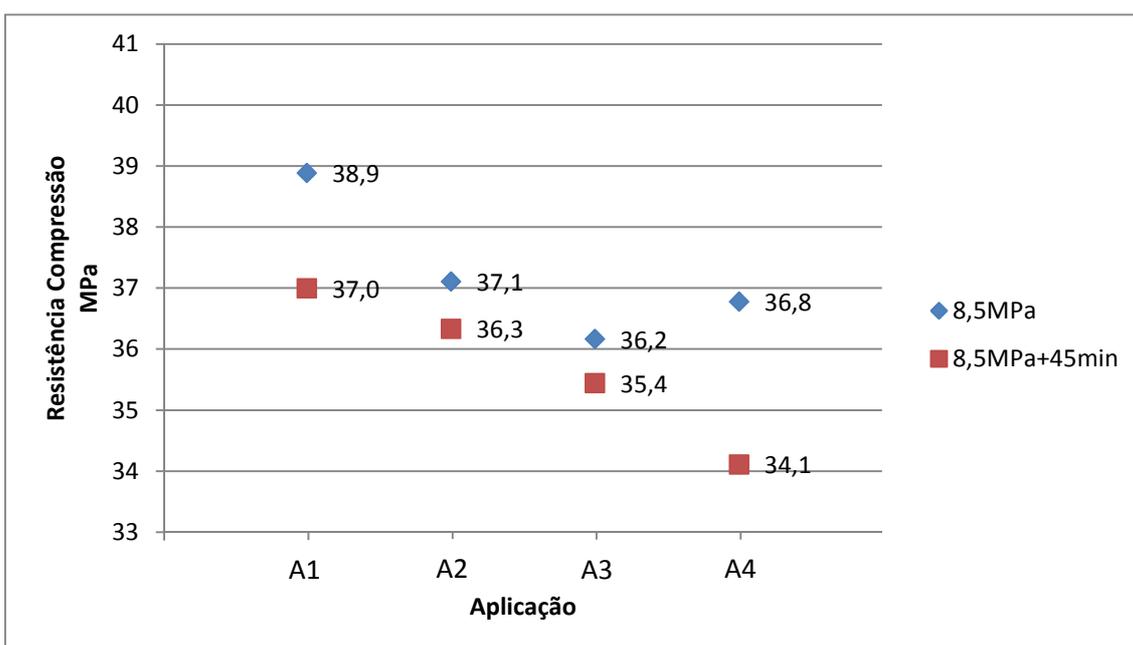
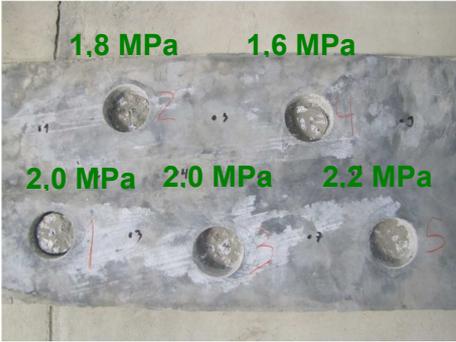
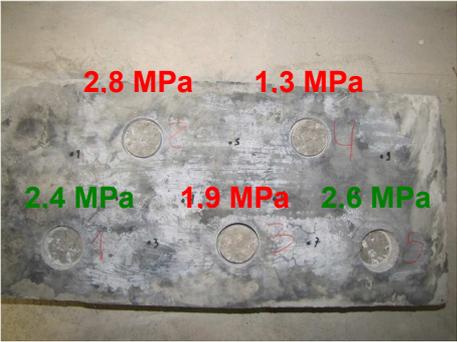
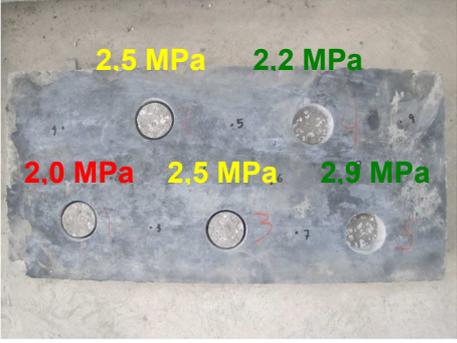
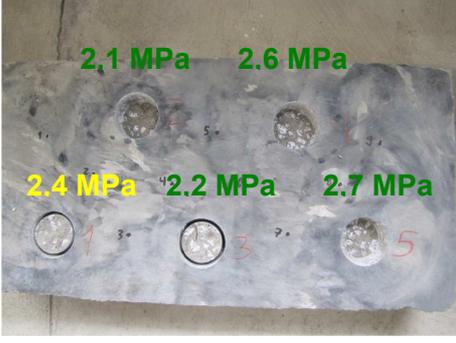
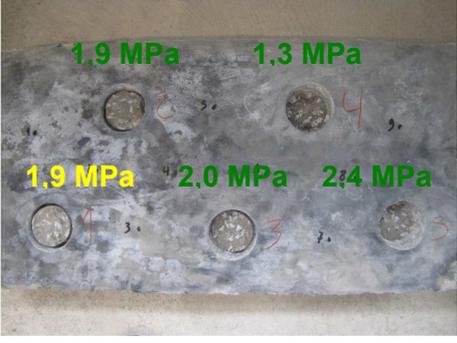
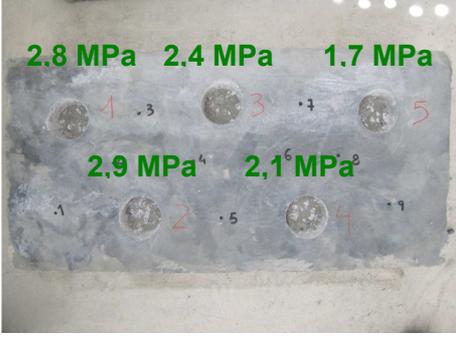
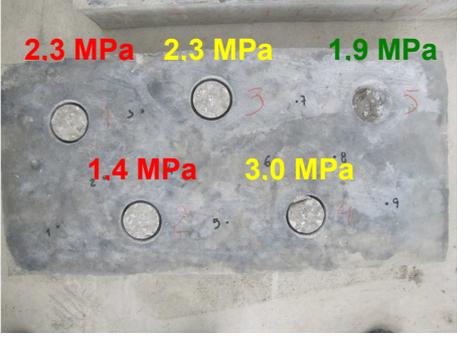


Gráfico 7 – Resultados da resistência à compressão das composições SP determinada pelo índice esclerométrico

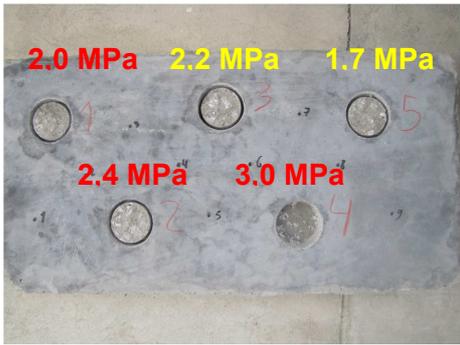
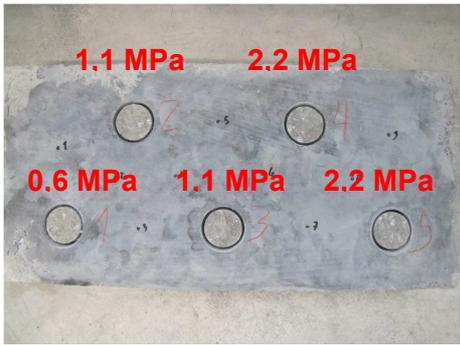
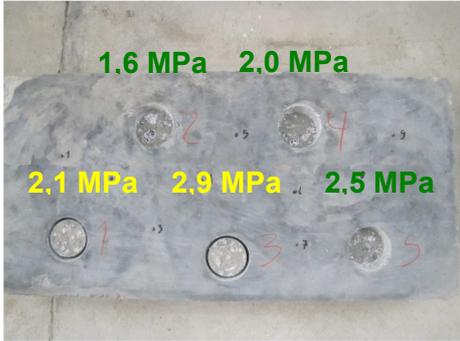
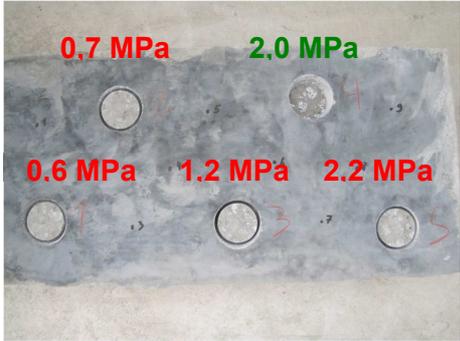
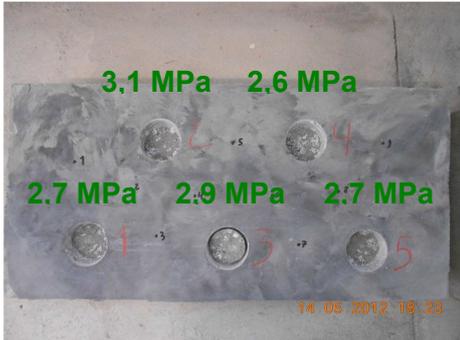
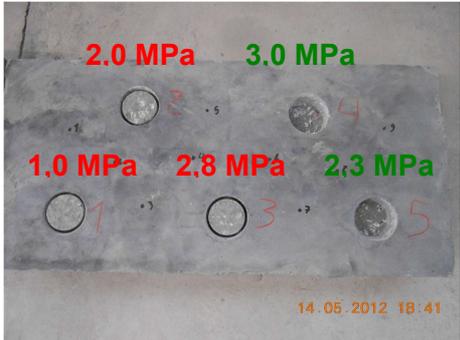
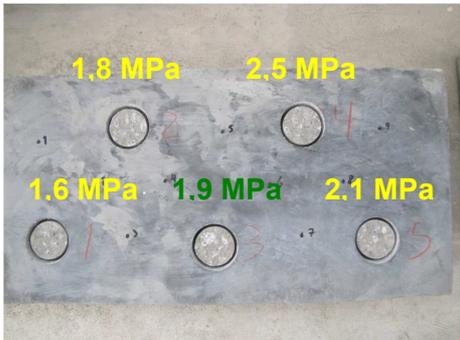
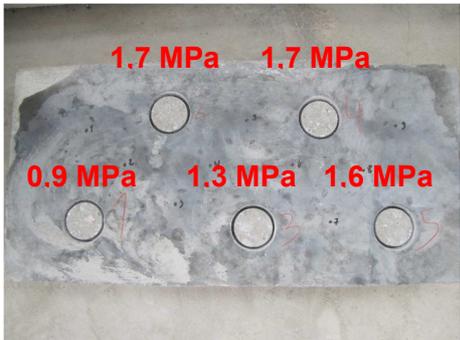
Verifica-se que alguns dos resultados não são coerentes, na medida que existe alguma dispersão nos resultados obtidos. Essa dispersão pode estar associada à metodologia adoptada para a aplicação do endurecedor, assim como, a ligeiras diferenças que existam na camada superficial do betão, já que o esclerómetro apenas

consegue avaliar os primeiros 5 cm de profundidade. Assim, analisando os gráficos acima indicados, verificou-se que no betão P obteve-se uma média de 38 MPa e 36,5 MPa no betão SP das resistências à compressão. Devido ao processo de cura do betão P ser mais lento, obteve-se regra geral resistências superficiais mais elevadas comparadas com os do betão SP. Analisando agora as aplicações, onde se obtiveram resultados mais favoráveis foram nas aplicações A1 e A3. Apesar das resistências serem mais elevadas em A1, A3 apresenta uma dispersão menor.

Nos Quadros 12 e 13 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de arrancamento por Pull-Off.

Aplicação	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
A1		
A2		
A3		
A4		

Quadro 12 – Resultados do Pull-Off às composições P

Aplicação	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
A1		
A2		
A3		
A4		

Quadro 13 – Resultados do Pull-Off às composições SP

Nos betões com o adjuvante P obtiveram-se melhores resultados tanto de resistência como de tipos de rutura, quando comparados com o betão SP, visto a aplicação do endurecedor ser realizada ainda num período que permitiu uma boa ligação betão/endurecedor. Por outro lado, nas lajetas com P e SP era de esperar que o valor das ruturas pelo betão fossem sempre mais elevados que as ruturas pelo endurecedor, no entanto, isto não se verificou. Isto evidencia que o valor da tensão de rutura não nos é indicativo da boa ou má ligação do endurecedor ao betão de base. De um modo geral todos os ensaios decorreram sem problemas, à excepção da lajeta PA2 8,5MPa, que devido a um defeito do material não se conseguiu enroscar o parafuso na pastilha, por esta estar moída. De todas as lajetas ensaiadas pode dizer-se que a aplicação A3 foi a que obteve os resultados mais satisfatórios, já que é aquela que apresenta o melhor tipo de ruturas (ruturas pelo betão) com menos dispersão de valores, com uma média de valores no túnel 8,5 MPa de 2,4 MPa com 27 ruturas pelo betão e no túnel 8,5MPa+45min de 1,9 MPa com apenas 12 ruturas pelo betão. Comparando esta aplicação com os resultados do índice esclerométrico, confirma-se que para além dos dados apresentarem valores positivos e sem grande dispersão também são consistentes. O facto das outras aplicações não terem dado resultados tão positivos como a aplicação A3 deve-se ao facto das aplicações do endurecedor serem realizadas em duas fases, como é o caso da aplicação A1 e A2. A introdução de água adicional para a hidratação da superfície da lajeta para a aplicação do endurecedor (aplicação A4) também não reflectiu os melhores resultados tanto nos ensaios Pull-Off como nos ensaios do índice esclerométrico já atrás analisados.

De todos os ensaios realizados e valores analisados, pode-se dizer que a aplicação segundo as empresas aplicadoras de endurecedor (aplicação A3) é uma das melhores em que se obteve os melhores resultados. O facto de ser uma aplicação de simples execução foi um dos motivos para não existir problemas com a sua aplicação e termos como resultado do aflagamento uma superfície lisa e sem imperfeições. Os dados obtidos dos ensaios comprovam os seus resultados. Comparando com as restantes aplicações e tendo em consideração que todas estas foram realizadas num momento tardio, verifica-se que para além da sua execução seja mais trabalhosa, demorada e com a necessidade de aplicação de mais água, os resultados são mais desfavoráveis.

5. Conclusões

Do trabalho desenvolvido nesta dissertação foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Apesar de se terem estudado várias metodologias de aplicação do endurecedor, conclui-se que para situações de máxima agressividade e períodos tardios de aplicação do endurecedor, a metodologia normalmente utilizadas em Portugal (A3) foi a que apresentou os melhores resultados nos vários ensaios realizados;
- Por ordem decrescente de desempenho em termos de aderência do endurecedor de superfície ao betão de base, verificou-se que foi a seguinte: A3 > A2 > A4 > A1;
- Por ordem decrescente de desempenho em termos de afagamento do endurecedor de superfície ao betão de base, verificou-se que foi a seguinte: A3 > A4 > A2 > A1;
- Verificou-se que o afagamento foi mais fácil de realizar nas composições com o betão P;
- Para todas as metodologias ensaiadas não foi possível obter resultados perfeitos em termos de ligação betão/endurecedor para os instantes 8,5MPa e 8,5MPa+45min;
- O facto de aplicar o endurecedor em duas fases, como ocorreu nas aplicações A1 e A2, não mostrou ser benéfico para a ligação betão/endurecedor, sendo que estas aplicações faseadas acabaram por dificultar as operações de afagamento;
- A hidratação do betão de base horas antes da aplicação do endurecedor também não mostrou quaisquer benefícios na aderência do endurecedor/betão de base, tal como se verificou na composição A4;
- Apesar das aplicações dos endurecedores terem sido efetuadas num período já tardio, verificou-se que mesmo assim foi possível obter uma superfície lisa em todas as lajetas, ainda que o aspecto visual não fosse o melhor, ainda que nem todos os resultados de aderência fossem favoráveis;
- A partir dos valores das tensões de ruturas dos ensaios de pull-off obtidos verifica-se que estes não são indicativos de uma boa ou má ligação entre o endurecedor e o betão de base;

- No que toca a valores de resistências à compressão, foram nas composições com o betão SP as que apresentaram os resultados mais elevados;
- Nas resistências à compressão dos provetes cilíndricos, constatou-se que as composições A3 e A4 do betão SP obtiveram os resultados mais elevados;
- A partir da determinação da taxa de evaporação, foi possível verificar por estimativa que a água existente nas lajetas P e SP antes da aplicação do endurecedor de superfície é semelhante apesar das duas composições de base atingirem o instante 8,5MPa em tempos diferentes;
- O índice esclerométrico apresentou uma grande dispersão de resultados evidenciando a falta de homogeneidade da camada superficial até 5 cm de profundidade.

BIBLIOGRAFIA

1. ACI Committee 302, “Guide for Concrete Floor and Slab Construction (ACI302.1R-04)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2004;
2. Brochura SIB – Endurecedor de superfície SIBQUARTZO (2011);
3. Catálogo adjuvante SiKa – SikaPlast 898 (2011);
4. Hullet, T., Plimmer, J., “Delamination of Concrete Floor Surfaces”, Concrete Advice nº18, 2004;
5. Portland Cement Association, “Concrete Slab Surface Defects: Causes, Prevention, Repair”, Concrete Information, 2001;
6. Directiva 98/83/CE (1998), Qualidade da água destinada ao consumo humano;
7. NP EN 934 – 2 (2009), Adjuvantes para betão: Definições, Requisitos, Conformidade, Marcação e Rotulagem;
8. Sequeira, A. R. S. (2011). *“Influencia dos adjuvantes no comportamento de um endurecedor de superfície de quartzo aplicado em diferentes betões de base”*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Évora, Évora;
9. Fernandes, A. A. (2011). *“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;
10. Marques, M. J. (aguarda discussão). *“Influência do betão de base em pavimentos com aplicação de endurecedores de superfície de quartzo”*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Évora, Évora;
11. NP EN 206 – 1 (2000), Análise granulométrica – Método da peneiração;
12. NP EN 12350 – 2 (2009), Ensaio do betão fresco: Ensaio de Abaixamento;
13. NP 1387 (2008), Betões – Determinação dos tempos de presa;
14. EN 12390 – 1 (2003), Ensaio do betão endurecido: Forma, Dimensões e outros requisitos para as amostras e moldes;

15. NP EN 12390 – 2 (2009), Ensaaios do betão endurecido: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica;
16. NP EN 12390 – 3 (2009), Ensaaios do betão endurecido: Resistência à compressão de provetes;
17. EN 1542 (1999), Products and systems of the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off;
18. NP EN 12504 – 2 (2012), Ensaaios do betão nas estruturas: Ensaio não destrutivo – Determinação do índice Esclerométrico;
19. NP 1379 (1976), Inertes para Argamassas e Betões – Análise Granulométrica;
20. ASTM E 11-70 (2005), Normalização abertura peneiros;
21. NP EN 12350 – 1 (2009), Ensaaios do betão fresco: Amostragem;
22. EN 12390 – 4 (2003), Ensaaios do betão endurecido: Resistência à compressão. Características das máquinas de ensaio;
23. NP EN 12390 – 5 (2009), Ensaaios do betão endurecido: Resistência à flexão de provetes;
24. NP EN 12390 – 7 (2009), Ensaaios do betão endurecido: Massa volúmica do betão endurecido;
25. NP EN 12390 – 8 (2009), Ensaaios do betão endurecido: Profundidade de penetração da água sob pressão;
26. DTU 13.3 NF P 11 – 213 – 1 (2005), Conception, calcule et execution. Partie 1: Cahier des clauses techniques des dallages à usage industriel ou assimilés;
27. DTU 13.3 NF P 11 – 213 – 2 (2005), Conception, calcule et execution. Partie 2: Cahier des clauses techniques des dallages à usage autre qu'industriel ou assimilés;
28. DTU 13.3 NF P 11 – 213 – 3 (2005), Conception, calcule et execution. Partie 3: Cahier des clauses techniques des dallages de maisons individuelles;
29. NP EN 196 – 1 (2006), Métodos de ensaio de cimento. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas;

30. NP EN 196 – 3 (2006), Métodos de ensaio de cimento. Parte 3: Determinação do tempo de presa e expansibilidade;
31. NP EN 196 – 6 (2010), Métodos de ensaio de cimento. Parte 6: Determinação da finura;
32. Brochura adjuvante Basf 390NP (2010);
33. Ficha técnica endurecedor de superfície Basf – Lapidolith (2012);
34. Ficha técnica endurecedor de superfície Duro-Europa – Durochape (2012);
35. Ficha técnica endurecedor de superfície Duro-Europa – Durocorindo (2012);
36. Ficha técnica endurecedor de superfície Duro-Europa – Durometal (2012);
37. Ficha técnica endurecedor de superfície Duro-Europa – Sikafloor-3 QuartzTop (2007);
38. Ficha técnica endurecedor de superfície Duro-Europa – Sikafloor CureHard 24 (2009);
39. Ficha técnica endurecedor de superfície Duro-Europa – SuperQuartz (2012);
40. Ficha técnica endurecedor de superfície Polipiso do Brasil – Enducret Plus (2012);
41. Ficha técnica endurecedor de superfície Polipiso do Brasil – P 05 MI CIME (2012);
42. Brochura Copsa – Prepoxy Adherente G2 (2011);
43. Reis, F. L. (2010). *Como Elaborar uma Dissertação de Mestrado segundo Bolonha*. PACTOR;
44. Estrela, E., Soares, M. A., & Leitão, M. J. (2006). *Saber escrever uma tese e outros textos*. Dom Quixote;
45. Vieceli, F. A. (2004). *“Influência da Utilização dos Endurecedores Superficiais Cimentícios na Resistência à Abrasão de Pisos Industriais de Concreto”*, Trabalho de conclusão para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre;
46. Vieira, J. P. (2010). *“Interacção Cimento-Superplastificante. Avaliação da estabilidade do comportamento”*, Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, IST, Lisboa.

ANEXOS

Leitura	Força (kgf)	Resistência à penetração (secção da agulha em mm ²) MPa					
		638	320	163	65	32	16
13	0,1						
14	0,5				0,1	0,2	0,3
15	0,9			0,1	0,1	0,3	0,6
16	1,4			0,1	0,2	0,4	0,8
17	1,8		0,1	0,1	0,3	0,5	1,1
18	2,2		0,1	0,1	0,3	0,7	1,4
19	2,7		0,1	0,2	0,4	0,8	1,6
20	3,1		0,1	0,2	0,5	0,9	1,9
21	3,5	0,1	0,1	0,2	0,5	1,1	2,2
22	4,0	0,1	0,1	0,2	0,6	1,2	2,4
23	4,4	0,1	0,1	0,3	0,7	1,3	2,7
24	4,8	0,1	0,1	0,3	0,7	1,5	2,9
25	5,2	0,1	0,2	0,3	0,8	1,6	3,2
26	5,7	0,1	0,2	0,3	0,9	1,7	3,5
27	6,1	0,1	0,2	0,4	0,9	1,9	3,7
28	6,5	0,1	0,2	0,4	1,0	2,0	4,0
29	7,0	0,1	0,2	0,4	1,1	2,1	4,3
30	7,4	0,1	0,2	0,4	1,1	2,3	4,5
31	7,8	0,1	0,2	0,5	1,2	2,4	4,8
32	8,3	0,1	0,3	0,5	1,2	2,5	5,1
33	8,7	0,1	0,3	0,5	1,3	2,7	5,3
34	9,1	0,1	0,3	0,5	1,4	2,8	5,6
35	9,6	0,1	0,3	0,6	1,4	2,9	5,9
36	10,0	0,2	0,3	0,6	1,5	3,1	6,1
37	10,4	0,2	0,3	0,6	1,6	3,2	6,4
38	10,8	0,2	0,3	0,7	1,6	3,3	6,6
39	11,3	0,2	0,3	0,7	1,7	3,5	6,9
40	11,7	0,2	0,4	0,7	1,8	3,6	7,2
41	12,1	0,2	0,4	0,7	1,8	3,7	7,4
42	12,6	0,2	0,4	0,8	1,9	3,9	7,7
43	13,0	0,2	0,4	0,8	2,0	4,0	8,0
44	13,4	0,2	0,4	0,8	2,0	4,1	8,2
45	13,9	0,2	0,4	0,8	2,1	4,2	8,5
46	14,3	0,2	0,4	0,9	2,2	4,4	8,8
47	14,7	0,2	0,5	0,9	2,2	4,5	9,0
48	15,2	0,2	0,5	0,9	2,3	4,6	9,3
49	15,6	0,2	0,5	0,9	2,4	4,8	9,5
50	16,0	0,2	0,5	1,0	2,4	4,9	9,8
51	16,5	0,3	0,5	1,0	2,5	5,0	10,1

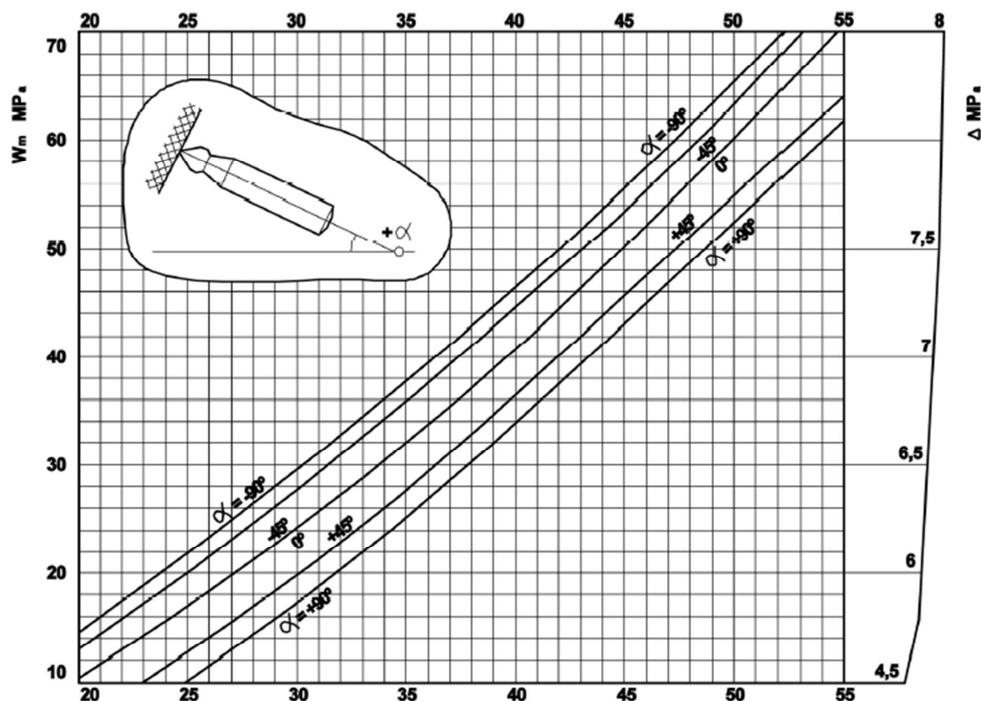
Quadro 1 – Âbaco resistência penetração 1/3

Leitura	Força (kgf)	Resistência à penetração (secção da agulha em mm ²) MPa					
		638	320	163	65	32	16
52	16,9	0,3	0,5	1,0	2,5	5,2	10,3
53	17,3	0,3	0,5	1,0	2,6	5,3	10,6
54	17,7	0,3	0,5	1,1	2,7	5,4	10,9
55	18,2	0,3	0,6	1,1	2,7	5,6	11,1
56	18,6	0,3	0,6	1,1	2,8	5,7	11,4
57	19,0	0,3	0,6	1,1	2,9	5,8	11,7
58	19,5	0,3	0,6	1,2	2,9	6,0	11,9
59	19,9	0,3	0,6	1,2	3,0	6,1	12,2
60	20,3	0,3	0,6	1,2	3,1	6,2	12,5
61	20,8	0,3	0,6	1,2	3,1	6,4	12,7
62	21,2	0,3	0,6	1,3	3,2	6,5	13,0
63	21,6	0,3	0,7	1,3	3,3	6,6	13,2
64	22,1	0,3	0,7	1,3	3,3	6,8	13,5
65	22,5	0,3	0,7	1,4	3,4	6,9	13,8
66	22,9	0,4	0,7	1,4	3,5	7,0	14,0
67	23,4	0,4	0,7	1,4	3,5	7,2	14,3
68	23,8	0,4	0,7	1,4	3,6	7,3	14,6
69	24,2	0,4	0,7	1,5	3,7	7,4	14,8
70	24,6	0,4	0,8	1,5	3,7	7,5	15,1
71	25,1	0,4	0,8	1,5	3,8	7,7	15,4
72	25,5	0,4	0,8	1,5	3,8	7,8	15,6
73	25,9	0,4	0,8	1,6	3,9	7,9	15,9
74	26,4	0,4	0,8	1,6	4,0	8,1	16,2
75	26,8	0,4	0,8	1,6	4,0	8,2	16,4
76	27,2	0,4	0,8	1,6	4,1	8,3	16,7
77	27,7	0,4	0,8	1,7	4,2	8,5	16,9
78	28,1	0,4	0,9	1,7	4,2	8,6	17,2
79	28,5	0,4	0,9	1,7	4,3	8,7	17,5
80	29,0	0,4	0,9	1,7	4,4	8,9	17,7
81	29,4	0,5	0,9	1,8	4,4	9,0	18,0
82	29,8	0,5	0,9	1,8	4,5	9,1	18,3
83	30,2	0,5	0,9	1,8	4,6	9,3	18,5
84	30,7	0,5	0,9	1,8	4,6	9,4	18,8
85	31,1	0,5	1,0	1,9	4,7	9,5	19,1
86	31,5	0,5	1,0	1,9	4,8	9,7	19,3
87	32,0	0,5	1,0	1,9	4,8	9,8	19,6
88	32,4	0,5	1,0	1,9	4,9	9,9	19,8
89	32,8	0,5	1,0	2,0	5,0	10,1	20,1
90	33,3	0,5	1,0	2,0	5,0	10,2	20,4

Quadro 2 – Âbaco resistência penetração 2/3

Leitura	Força (kgf)	Resistência à penetração (secção da agulha em mm ²) MPa					
		638	320	163	65	32	16
91	33,7	0,5	1,0	2,0	5,1	10,3	20,6
92	34,1	0,5	1,0	2,1	5,1	10,5	20,9
93	34,6	0,5	1,1	2,1	5,2	10,6	21,2
94	35,0	0,5	1,1	2,1	5,3	10,7	21,4
95	35,4	0,5	1,1	2,1	5,3	10,8	21,7
96	35,9	0,6	1,1	2,2	5,4	11,0	22,0
97	36,3	0,6	1,1	2,2	5,5	11,1	22,2
98	36,7	0,6	1,1	2,2	5,5	11,2	22,5
99	37,1	0,6	1,1	2,2	5,6	11,4	22,8
100	37,6	0,6	1,2	2,3	5,7	11,5	23,0
101	38,0	0,6	1,2	2,3	5,7	11,6	23,3
102	38,4	0,6	1,2	2,3	5,8	11,8	23,5
103	38,9	0,6	1,2	2,3	5,9	11,9	23,8
104	39,3	0,6	1,2	2,4	5,9	12,0	24,1
105	39,7	0,6	1,2	2,4	6,0	12,2	24,3
106	40,2	0,6	1,2	2,4	6,1	12,3	24,6
107	40,6	0,6	1,2	2,4	6,1	12,4	24,9
108	41,0	0,6	1,3	2,5	6,2	12,6	25,1
109	41,5	0,6	1,3	2,5	6,3	12,7	25,4
110	41,9	0,6	1,3	2,5	6,3	12,8	25,7
111	42,3	0,7	1,3	2,5	6,4	13,0	25,9
112	42,8	0,7	1,3	2,6	6,4	13,1	26,2
113	43,2	0,7	1,3	2,6	6,5	13,2	26,5
114	43,6	0,7	1,3	2,6	6,6	13,4	26,7
115	44,0	0,7	1,3	2,6	6,6	13,5	27,0
116	44,5	0,7	1,4	2,7	6,7	13,6	27,2
117	44,9	0,7	1,4	2,7	6,8	13,8	27,5
118	45,3	0,7	1,4	2,7	6,8	13,9	27,8
119	45,8	0,7	1,4	2,8	6,9	14,0	28,0
120	46,2	0,7	1,4	2,8	7,0	14,1	28,3
121	46,6	0,7	1,4	2,8	7,0	14,3	28,6
122	47,1	0,7	1,4	2,8	7,1	14,4	28,8
123	47,5	0,7	1,5	2,9	7,2	14,5	29,1
124	47,9	0,7	1,5	2,9	7,2	14,7	29,4
125	48,4	0,7	1,5	2,9	7,3	14,8	29,6
126	48,8	0,7	1,5	2,9	7,4	14,9	29,9
127	49,2	0,8	1,5	3,0	7,4	15,1	30,1
128	49,7	0,8	1,5	3,0	7,5	15,2	30,4
129	50,1	0,8	1,5	3,0	7,6	15,3	30,7
130	50,5	0,8	1,5	3,0	7,6	15,5	30,9

Quadro 2 – Ábaco resistência penetração 3/3



Quadro 3 – Abaco esclerométrico

Identificação do molde	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
Dia da amassadura	04-05-2012	
Temperatura ambiente (°C)	20	
Humidade (%)	55	
Hora de fabrico	10:04	
Temperatura do betão (°C)	20,1	
Hora ensaio abaixamento	10:10	
Hora colocação betão base	10:41	
Hora obtenção 8,5 MPa	16:53	16:27
Hora colocação endurecedor	16:55	17:15
Quant. Endurecedor colocado (kg)	0,72	0,72
Hora 1º afagamento	16:57	17:16
Hora 2º afagamento	17:09	17:31
Hora Fim Trabalhos	17:13	17:38

Quadro 4 – Dados gerais PA1

Identificação do molde	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
Dia da amassadura	02-05-2012	
Temperatura ambiente (°C)	16,6	
Humidade (%)	60	
Hora de fabrico	09:55	
Temperatura do betão (°C)	18,3	
Hora ensaio abaixamento	10:00	
Hora colocação betão base	10:35	
Hora obtenção 8,5 MPa	17:17	17:04
Hora colocação endurecedor	17:19	17:49
Quant. Endurecedor colocado (kg)	0,48 e 0,24	0,48 e 0,24
Hora 1º afagamento	17:22	17:51
Hora 2º afagamento	17:39	18:08
Hora 3º afagamento	17:59	18:23
Hora Fim Trabalhos	18:06	18:29

Quadro 5 – Dados gerais PA2

Identificação do molde	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
Dia da amassadura	30-04-2012	
Temperatura ambiente (°C)	16	
Humidade (%)	60	
Hora de fabrico	09:55	
Temperatura do betão (°C)	16,5	
Hora ensaio abaixamento	10:00	
Hora colocação betão base	10:35	
Hora obtenção 8,5 MPa	17:38	17:11
Hora colocação endurecedor	17:40	17:53
Quant. Endurecedor colocado (kg)	0,72	0,72
Hora 1º afagamento	17:43	17:55
Hora 2º afagamento	18:04	18:14
Hora Fim Trabalhos	18:12	18:22

Quadro 6 – Dados gerais PA3

Identificação do molde	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
Dia da amassadura	03-05-2012	
Temperatura ambiente (°C)	20,5	
Humidade (%)	60	
Hora de fabrico	09:50	
Temperatura do betão (°C)	18,3	
Hora ensaio abaixamento	09:59	
Hora colocação betão base	10:27	
Hora obtenção 8,5 MPa	17:38	17:28
Hora colocação endurecedor	17:39	18:13
Quant. Endurecedor colocado (kg)	0,72	0,72
Água adicionada	0,335	0,305
Hora 1º afagamento	17:40	18:14
Hora 2º afagamento	17:57	18:28
Hora Fim Trabalhos	18:04	18:34

Quadro 7 – Dados gerais PA4

Identificação do molde	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
Dia da amassadura	10-05-2012	
Temperatura ambiente (°C)	23	
Humidade (%)	55	
Hora de fabrico	10:29	
Temperatura do betão (°C)	23,3	
Hora ensaio abaixamento	10:35	
Hora colocação betão base	11:14	
Hora obtenção 8,5 MPa	14:22	14:15
Hora colocação endurecedor	14:26	15:05
Quant. Endurecedor colocado (kg)	0,48 e 0,24	0,48 e 0,24
Hora 1º afagamento	14:31	15:06
Hora 2º afagamento	14:42	15:19
Hora Fim Trabalhos	14:48	15:24

Quadro 8 – Dados gerais SPA1

Identificação do molde	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
Dia da amassadura	08-05-2012	
Temperatura ambiente (°C)	21	
Humidade (%)	65	
Hora de fabrico	10:35	
Temperatura do betão (°C)	21	
Hora ensaio abaixamento	10:40	
Hora colocação betão base	11:15	
Hora obtenção 8,5 MPa	14:42	14:33
Hora colocação endurecedor	14:50	15:20
Quant. Endurecedor colocado (kg)	0,48 e 0,24	0,48 e 0,24
Hora 1º afagamento	14:52	15:22
Hora 2º afagamento	15:07	15:42
Hora 3º afagamento	15:31	15:55
Hora Fim Trabalhos	15:38	16:00

Quadro 9 – Dados gerais SPA2

Identificação do molde	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
Dia da amassadura	07-05-2012	
Temperatura ambiente (°C)	18	
Humidade (%)	65	
Hora de fabrico	10:07	
Temperatura do betão (°C)	18,8	
Hora ensaio abaixamento	10:11	
Hora colocação betão base	10:48	
Hora obtenção 8,5 MPa	15:00	14:40
Hora colocação endurecedor	15:06	15:39
Quant. Endurecedor colocado (kg)	0,72	0,72
Hora 1º afagamento	15:09	15:42
Hora 2º afagamento	15:27	16:00
Hora Fim Trabalhos	15:37	16:07

Quadro 10 – Dados gerais SPA3

Identificação do molde	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
Dia da amassadura	09-05-2012	
Temperatura ambiente (°C)	23	
Humidade (%)	55	
Hora de fabrico	11:25	
Temperatura do betão (°C)	22,5	
Hora ensaio abaixamento	11:31	
Hora colocação betão base	12:07	
Hora obtenção 8,5 MPa	15:32	15:16
Hora colocação endurecedor	15:36	16:10
Quant. Endurecedor colocado (kg)	0,72	0,72
Hora 1º afagamento	15:39	16:12
Hora 2º afagamento	15:55	16:25
Hora Fim Trabalhos	16:05	16:35

Quadro 11 – Dados gerais SPA4

Ensaio	Valor Abaixamento (cm)
PA1	15,0
PA2	15,0
PA3	14,0
PA4	14,5
SPA1	15,0
SPA2	14,5
SPA3	15,0
SPA4	14,0

Quadro 12 – Ensaio Cone de Abrams

Aplicação	P		SP	
	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min	Túnel 8,5MPa	Túnel 8,5MPa+45min
A1	05:12	04:42	03:08	03:01
A2	05:42	05:29	03:27	03:17
A3	06:03	05:36	04:12	03:52
A4	06:11	06:01	03:25	03:09
Média	05:47	05:27	03:33	03:19

Quadro 13 – Tempo de presa das lajetas

Ensaio	Túnel	Tina Entrada	Tina Saída
PA1	8,5MPa	17,4	10,5
	8,5MPa+45min	23,8	13,2
PA2	8,5MPa	16,6	5,2
	8,5MPa+45min	19,7	7,7
PA3	8,5MPa	21,5	6,0
	8,5MPa+45min	16,9	5,5
PA4	8,5MPa	17,8	6,7
	8,5MPa+45min	19,0	8,0
SPA1	8,5MPa	19,0	8,3
	8,5MPa+45min	27,3	12,6
SPA2	8,5MPa	20,7	10,2
	8,5MPa+45min	25,5	12,8
SPA3	8,5MPa	20,2	8,0
	8,5MPa+45min	24,0	10,6
SPA4	8,5MPa	15,6	11,1
	8,5MPa+45min	19,6	12,6

Quadro 14 – Taxa de evaporação das tinas ao fim de 24 horas (L/m²)

Hora	Túnel 8,5MPa		Túnel 8,5MPa+45min	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
13:20	-	45,5	-	45,0
14:21	-	44,8	-	47,9
15:20	-	45,5	-	48,5
16:27	55,8	-	59,2	-
16:47	55,1	-	60,6	-
16:53	54,5	-	55,1	-

Quadro 15 – Registo temperaturas PA1

Hora	Túnel 8,5MPa		Túnel 8,5MPa+45min	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
13:13	-	44,4	-	45,3
14:15	-	42,5	-	44,0
15:12	-	43,0	-	44,0
16:13	55,1	-	62,5	-
16:56	55,8	-	61,6	-

Quadro 16 – Registo temperaturas PA2

Hora	Túnel 8,5MPa		Túnel 8,5MPa+45min	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
12:04	-	41,0	-	43,1
13:09	-	43,3	-	44,4
14:27	-	41,4	-	44,0
15:10	-	42,6	-	41,6
16:40	47,7	-	50,0	-
17:11	53,0	-	51,4	-

Quadro 17 – Registo temperaturas PA3

Hora	Túnel 8,5MPa		Túnel 8,5MPa+45min	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
13:31	-	41,6	-	45,8
15:00	-	42,0	-	46,0
16:17	-	42,8	-	48,4
17:33	53,7	-	59,5	-

Quadro 18 – Registo temperaturas PA4

Hora	Túnel 8,5MPa		Túnel 8,5MPa+45min	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
13:41	-	48,9	-	47,0
14:15	-	47,9	-	50,2
14:21	58,3	-	63,1	-
15:00	57,0	-	56,3	-

Quadro 19 – Registo temperaturas SPA1

Hora	Túnel 8,5MPa		Túnel 8,5MPa+45min	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
13:05	-	45,4	-	42,0
13:36	-	46,2	-	47,7
13:56	-	47,1	-	49,6
14:27	53,0	-	65,5	-
14:42	55,7	-	61,0	-
15:07	46,5	-	60,0	-

Quadro 20 – Registo temperaturas SPA2

Hora	Túnel 8,5MPa		Túnel 8,5MPa+45min	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
13:23	-	45,2	-	46,2
14:06	-	44,2	-	45,3
14:28	-	44,7	-	44,5
14:45	55,4	-	59,6	-
15:00	53,4	-	59,5	-

Quadro 21 – Registo temperaturas SPA3

Hora	Túnel 8,5MPa		Túnel 8,5MPa+45min	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída
13:43	-	46,0	-	48,9
14:05	-	48,8	-	48,0
14:26	-	47,2	-	48,3
14:49	58,7	-	65,5	-
15:12	61,0	-	65,9	-

Quadro 22 – Registo temperaturas SPA4

Hora	Túnel 8,5MPa				Túnel 8,5MPa+45min			
	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa
10:41				0,0				0,0
13:20	638	0	0	0,0	638	0	0	0,0
14:21	638	3	29	0,0	638	5	49	0,1
15:20	320	12	118	0,4	320	22,5	221	0,7
16:27	65	21	206	3,2	16	15	147	9,3
16:47	16	11	108	6,9	-	-	-	-
16:53	16	16	157	9,8	-	-	-	-
17:18	-	-	-	-	16	50,5	495	30,9

Quadro 23 – Ensaio penetrómetro PA1

Hora	Túnel 8,5MPa				Túnel 8,5MPa+45min			
	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa
10:35				0,0				0,0
13:15	638	0	0	0,0	638	0	0	0,0
14:16	638	0	0	0,0	638	1	10	0,0
15:13	638	4	39	0,1	638	12	118	0,2
16:15	320	27	265	0,8	320	39	382	1,2
16:56	32	16	157	4,9	32	22	216	6,8
17:04	-	-	-	-	16	16	157	9,8
17:17	16	16	157	9,8	-	-	-	-
17:30	16	47	461	28,8	-	-	-	-
17:45	-	-	-	-	16	47	461	28,8

Quadro 24 – Ensaio penetrómetro PA2

Hora	Túnel 8,5MPa				Túnel 8,5MPa+45min			
	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa
10:35				0,0				0,0
13:10	38	0	0	0,0	638	0	0	0,0
14:08	38	0	0	0,0	638	1	10	0,0
15:11	38	3	29	0,0	638	18	176	0,3
16:00	38	22	216	0,3	320	48	470	1,5
16:40	320	41	402	1,3	65	20	196	3,0
17:11	32	15	147	4,5	16	16	157	9,8
17:29	16	11	108	6,9	-	-	-	-
17:32	16	12	118	7,4	-	-	-	-
17:38	16	14	137	8,5	-	-	-	-
17:55	-	-	-	-	16	40	470	24,6

Quadro 25 – Ensaio penetrómetro PA3

Hora	Túnel 8,5MPa				Túnel 8,5MPa+45min			
	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa
10:27				0,0				0,0
13:31	638	0	0	0,0	638	0	0	0,0
14:26	638	2	20	0,0	638	9,5	93	0,1
15:30	638	7	69	0,1	320	14	137	0,4
16:30	320	24	235	0,7	163	19	186	1,1
16:57	163	45	441	2,7	65	23,5	230	3,6
17:28	-	-	-	-	16	15	147	9,3
17:35	32	34	333	10,8	-	-	-	-
-	16	15	147	9,3	-	-	-	-
18:12	-	-	-	-	16	50,5	495	30,9

Quadro 26 – Ensaio penetrómetro PA4

Hora	Túnel 8,5MPa				Túnel 8,5MPa+45min			
	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa
11:14				0,0				0,0
13:44	163	27	265	1,6	163	32	314	1,9
14:10	32	20	196	6,1	32	22	216	6,8
14:15	-	-	-	-	16	15	147	9,3
14:22	16	14,5	142	9,0	-	-	-	-
15:04	-	-	-	-	16	50,5	495	30,9

Quadro 27 – Ensaio penetrómetro SPA1

Hora	Túnel 8,5MPa				Túnel 8,5MPa+45min			
	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa
11:15				0,0				0,0
13:06	638	15,5	152	0,2	638	26	255	0,4
13:36	320	27	265	0,8	320	46	451	1,4
13:56	163	23	225	1,4	163	43	421	2,6
14:15	65	23	225	3,5	65	32	314	4,8
14:27	32	18	176	5,5	32	23	225	7,0
14:33	-	-	-	-	16	14	137	8,5
14:36	16	10	98	6,1	-	-	-	-
14:42	16	14	137	8,5	-	-	-	-
14:58	16	35	343	21,4	-	-	-	-
15:07	16	40	392	24,6	-	-	-	-
15:17	16	48	470	29,4	-	-	-	-
15:20	-	-	-	-	16	49	480	30,0

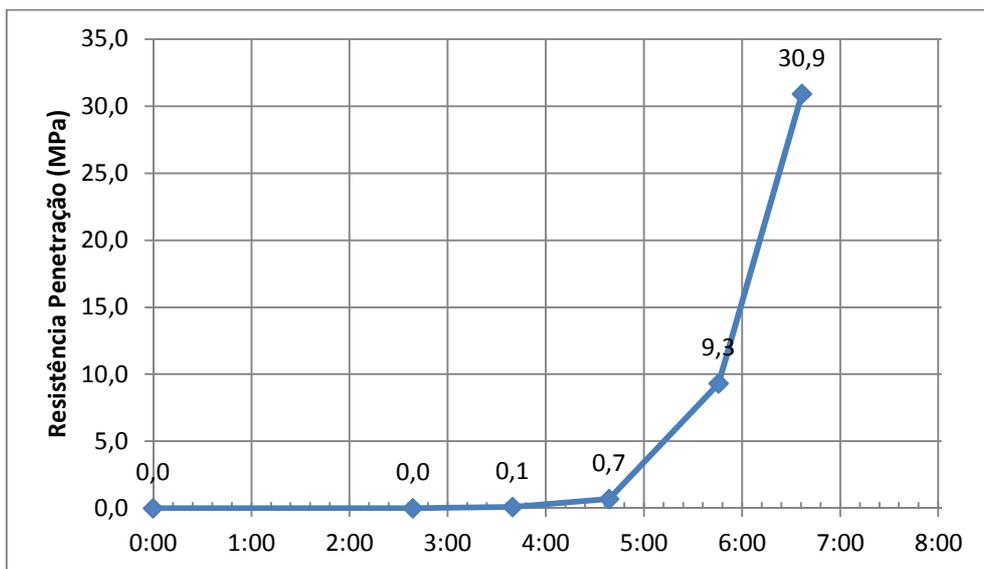
Quadro 28 – Ensaio penetrómetro SPA2

Hora	Túnel 8,5MPa				Túnel 8,5MPa+45min			
	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa
10:48				0,0				0,0
13:25	638	32	314	0,5	320	22	216	0,7
14:06	163	20	196	1,2	65	14	137	2,1
14:30	32	16	157	4,9	32	24	235	7,3
14:40	16	11	108	6,6	16	15	147	9,3
15:00	16	17	167	10,3	-	-	-	-
16:53	-	-	-	-	16	48	470	29,4

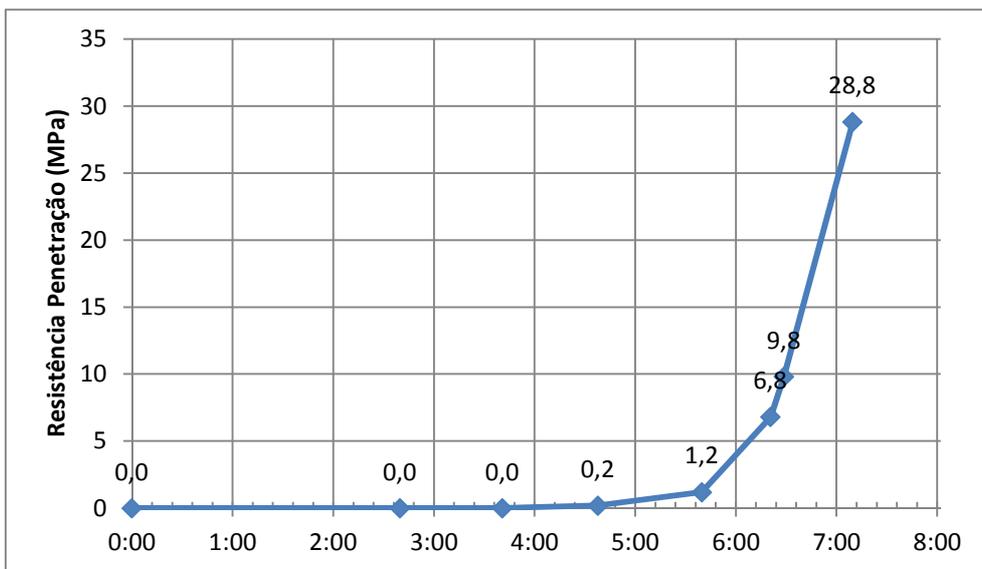
Quadro 29 – Ensaio penetrómetro SPA3

Hora	Túnel 8,5MPa				Túnel 8,5MPa+45min			
	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa	Secção agulha (mm ²)	kgf	N	MPa
12:07				0,0				0,0
13:42	638	8	78	0,1	638	30	294	0,5
14:26	320	33	323	1,0	320	49	480	1,5
14:50	163	20	196	1,2	65	17	167	2,5
15:13	32	18	176	5,6	32	27	265	8,3
15:16	-	-	-	-	16	14	137	8,5
15:25	16	11	108	6,9	-	-	-	-
15:32	16	17	167	10,3	-	-	-	-
16:10	-	-	-	-	16	48	470	29,4

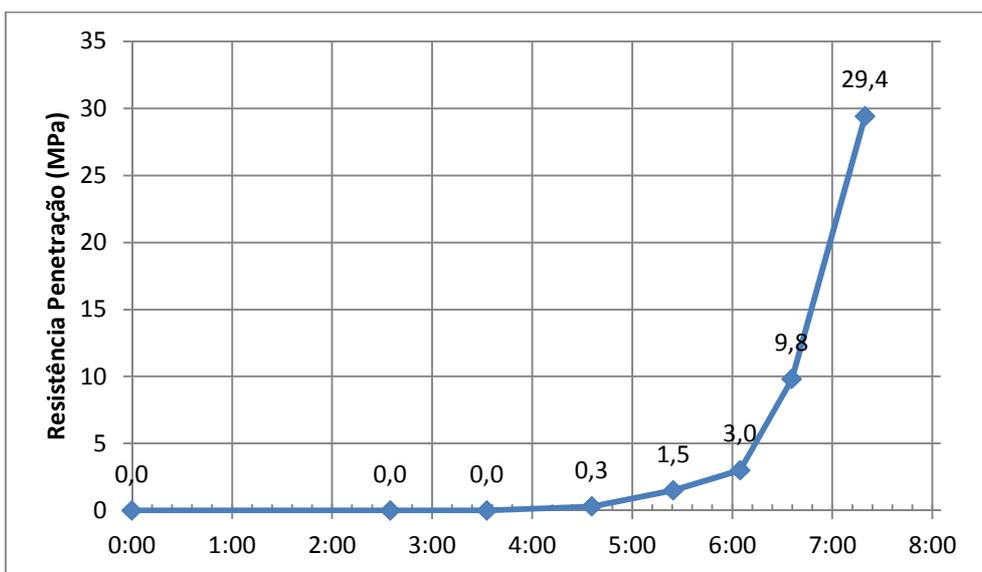
Quadro 30 – Ensaio penetrómetro SPA4



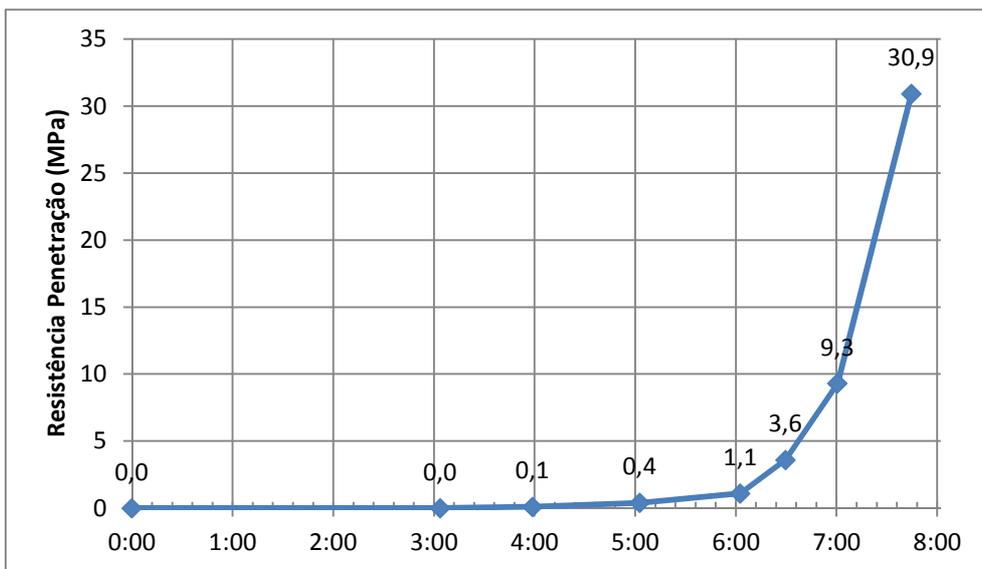
Quadro 31 – Resistência Penetração PA1



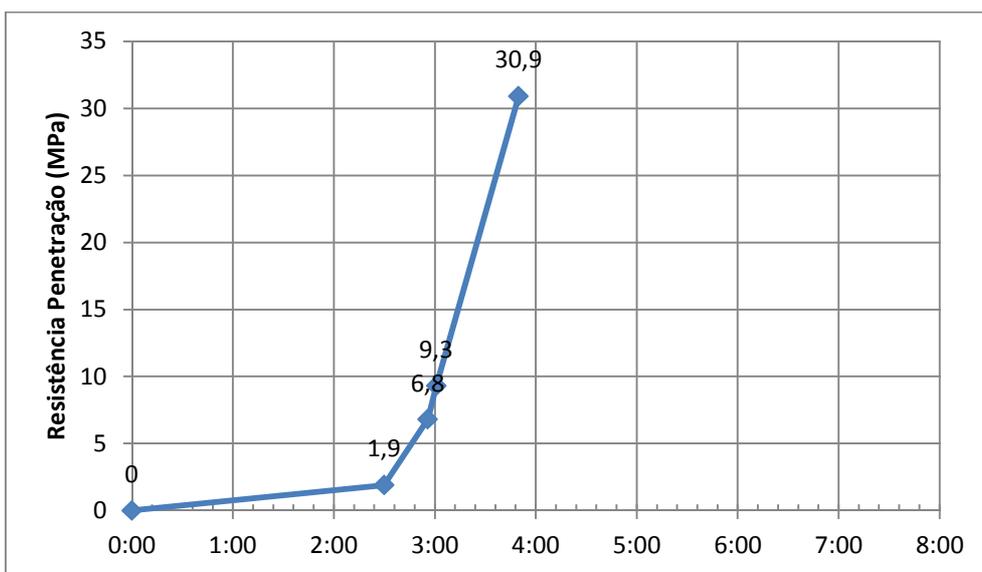
Quadro 32 – Resistência Penetração PA2



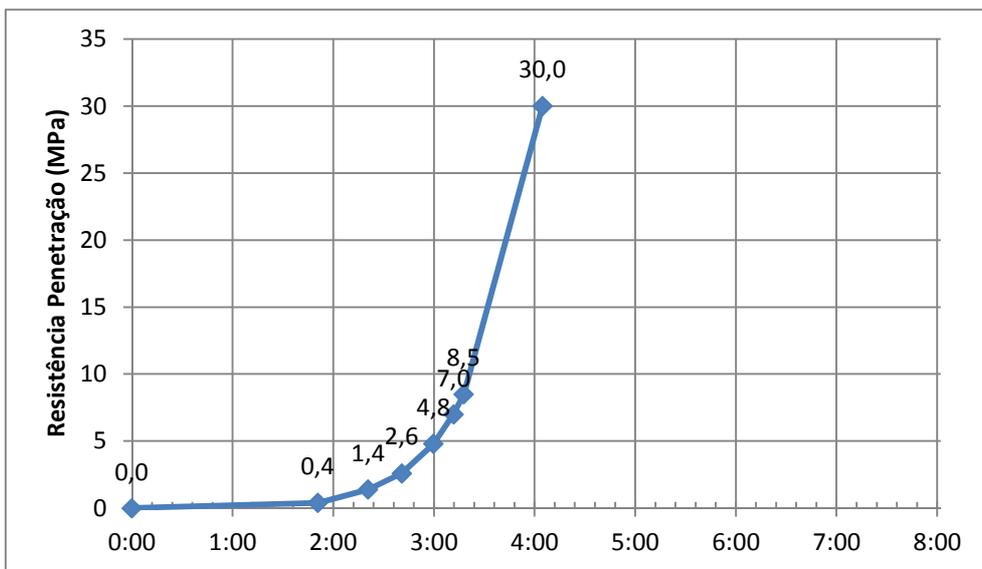
Quadro 33 – Resistência Penetração PA3



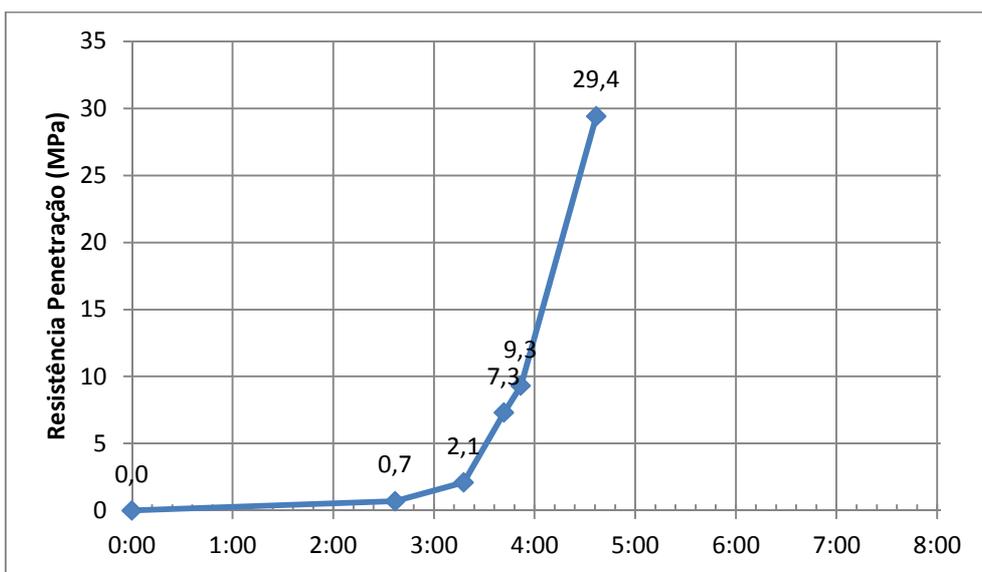
Quadro 34 – Resistência Penetração PA4



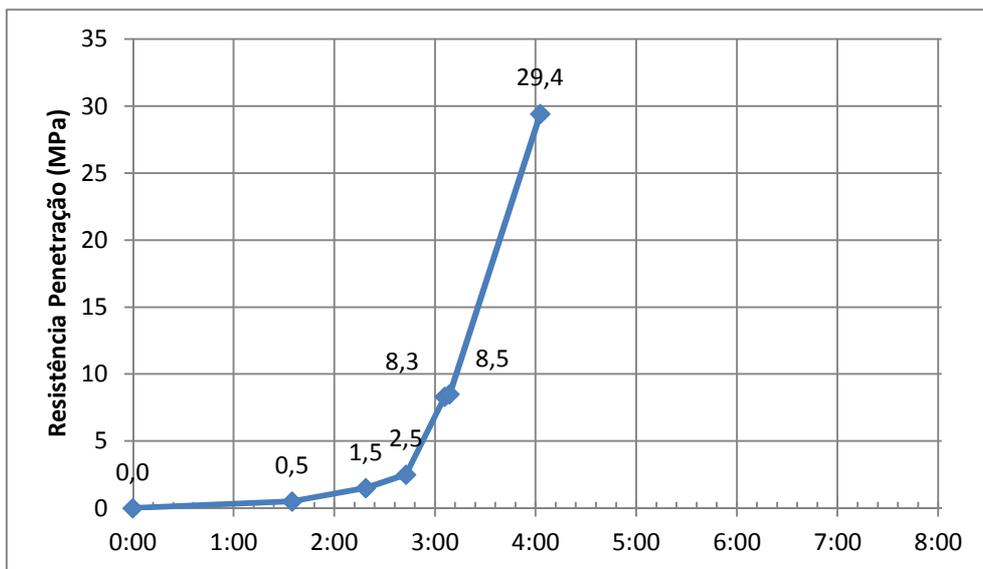
Quadro 35 – Resistência Penetração SPA1



Quadro 36 – Resistência Penetração SPA2



Quadro 37 – Resistência Penetração SPA3



Quadro 38 – Resistência Penetração SPA4

		Massa (kg)	Força (kN)	Resistência (MPa = N/mm ²)
3 dias	1	8,122	747,0	33,2
	2	8,086	706,5	31,4
	3	8,099	724,5	32,2
7 dias	4	8,098	924,8	41,1
	5	7,916	924,8	41,1
	6	7,962	936,0	41,6
28 dias	7	7,897	1111,5	49,4
	8	8,120	1129,5	50,2
	9	7,823	1104,8	49,1

Quadro 39 – Resistências à compressão em provetes cúbicos do betão com plastificante

		Massa (kg)	Força (kN)	Resistência (MPa = N/mm²)
3 dias	1	8,300	1086,8	48,3
	2	8,300	1077,8	47,9
	3	8,320	1095,8	48,7
7 dias	4	8,356	1406,3	62,5
	5	8,359	1406,3	62,5
	6	8,416	1444,5	64,2
28 dias	7	8,399	1730,3	76,9
	8	8,345	1694,3	75,3
	9	8,419	1734,8	77,1

Quadro 40 – Resistências à compressão em provetes cúbicos do betão com superplastificante

Identificação	Idade (dias)	Data Realização	Ø (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Secção (mm ²)	Massa volúmica (kg*m ³)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Índice de vazios (%)	Fissuras
P1 8,5MPa	28	01-06-2012	49	49	0,224	1886	2420	117	62,0	0,5	Não
			49	49	0,224	1886	2420	101	53,6	0,5	Sim
P1 8,5MPa+45min	28	01-06-2012	49	49	0,220	1886	2380	101	53,6	0,5	Sim
			49	49	0,225	1886	2430	119	63,1	0,5	Não
P2 8,5MPa	28	30-05-2012	49	49	0,226	1886	2450	107	56,7	0,5	Não
			49	49	0,223	1886	2410	113	59,9	0,5	Não
P2 8,5MPa+45min	28	30-05-2012	49	49	0,224	1886	2420	108	57,3	0,5	Não
			49	49	0,222	1886	2400	95,4	50,6	0,5	Não
P3 8,5MPa	28	28-05-2012	49	49	0,224	1886	2420	101	53,6	0,5	Não
			49	49	0,225	1886	2430	108	57,3	0,5	Não
P3 8,5MPa+45min	28	28-05-2012	49	49	0,226	1886	2450	101	53,6	0,5	Sim
			49	49	0,227	1886	2460	118	62,6	0,5	Sim
P4 8,5MPa	28	31-05-2012	49	49	0,225	1886	2430	105	55,7	0,5	Não
			49	49	0,221	1886	2390	117	62,0	0,5	Não
P4 8,5MPa+45min	28	31-05-2012	49	49	0,225	1886	2430	95,6	50,7	0,5	Sim
			49	49	0,226	1886	2450	99,2	52,6	0,5	Sim

Quadro 41 – Resistências à compressão em provetes cilíndricos do betão com plastificante

Identificação	Idade (dias)	Data Realização	Ø (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)	Secção (mm ²)	Massa volúmica (kg*m ³)	Carga de rotura (kN)	Tensão de rotura (MPa)	Índice de vazios (%)	Fissuras
SP1 8,5MPa	29	08-06-2012	49	49	0,225	1886	2440	156	82,7	0,5	Não
			49	49	0,225	1886	2440	151	80,1	0,5	Não
SP1 8,5MPa+45min	29	08-06-2012	49	49	0,226	1886	2450	167	88,5	0,5	Não
			49	49	0,225	1886	2440	148	78,5	0,5	Não
SP2 8,5MPa	28	05-06-2012	49	49	0,228	1886	2470	129	68,4	0,5	Não
			49	49	0,226	1886	2450	142	75,3	0,5	Não
SP2 8,5MPa+45min	28	05-06-2012	49	49	0,228	1886	2470	132	70,0	0,5	Não
			49	49	0,229	1886	2480	133	70,5	0,5	Não
SP3 8,5MPa	28	04-06-2012	49	49	0,227	1886	2460	138	73,2	0,5	Não
			49	49	0,226	1886	2450	146	77,4	0,5	Não
SP3 8,5MPa+45min	28	04-06-2012	49	49	0,226	1886	2450	155	82,2	0,5	Não
			49	49	0,228	1886	2470	148	78,5	0,5	Não
SP4 8,5MPa	28	06-06-2012	49	49	0,228	1886	2470	137	72,6	0,5	Não
			49	49	0,227	1886	2460	148	78,5	0,5	Não
SP4 8,5MPa+45min	28	06-06-2012	49	49	0,228	1886	2470	139	73,7	0,5	Não
			49	49	0,228	1886	2470	147	77,9	0,5	Não

Quadro 42 – Resistências à compressão em provetes cilíndricos do betão com superplastificante

		Composição	
		P	SP
mr	1	2,404	2,424
	2	2,410	2,423
ms	1	2,420	2,429
	2	2,427	2,438
mo	1	2,322	2,366
	2	2,329	2,267
V (m³)	1	0,000998	0,001000
	2	0,000999	0,000998
D mr (kg/m³)	1	2408,102	2428,336
	2	2414,112	2427,535
D ms (kg/m³)	1	2424,129	2432,944
	2	2431,141	2442,461
D mo (kg/m³)	1	2325,962	2369,837
	2	2332,974	2371,239
Porosidade aberta (%)	1	9,2	6,0
	2	9,1	6,8

Quadro 43 – Cálculos para a Massa volúmica e Porosidade aberta