



Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Avaliação do fenómeno do Curling em pavimentos
industriais de betão armado não aderentes***

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Civil

Nádia Martina Lopes Batalha

Leiria, *Agosto* de 2017



Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Avaliação do fenómeno do Curling em pavimentos
industriais de betão armado não aderentes***

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Civil

Nádia Martina Lopes Batalha

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor João Paulo Veludo Vieira Pereira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Eduardo Nuno Brito Santos Júlio, Professor do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.

Leiria, *Agosto* de 2017

Aos meus Pais e Irmã

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Queria começar por agradecer às pessoas mais importantes da minha vida e que sem eles nada disto teria sido possível, ao meu pai Salvador Batalha, à minha mãe Virgínia Lopes e à minha irmã Daniela Batalha. Aos meus pais agradeço pelo amor, pela educação, pelos valores e por todos os sacrifícios que fizeram para me proporcionarem toda a educação escolar. À minha irmã agradeço o amor, o companheirismo, a paciência, e por todo o apoio, especialmente durante o tempo que realizei este trabalho.

Em segundo lugar quero agradecer à Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria e ao Instituto Politécnico de Leiria, por me ter acolhido nestes anos de licenciatura e mestrado, por ter sempre reconhecido o meu esforço e ter reunido as condições para realizar este trabalho.

Em terceiro lugar quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Veludo, pelo incansável apoio, dedicação e pela disponibilidade para acompanhar e orientar toda a minha dissertação. Também agradecer ao meu co-orientador, Professor Doutor Eduardo Júlio, pelos conselhos, acompanhamento e apoio na dissertação.

Ao João Baptista e ao Nuno Almeida, colegas e amigos, que sempre se mostraram disponíveis para me ajudar em todos os trabalhos laboratoriais. A eles agradeço os períodos de descontração, o conhecimento que me transmitiram, a grande ajuda que me deram. Sem eles, esta dissertação teria sido muito mais penosa.

Ao senhor António Silva que liderou todos os trabalhos na realização das cofragens e na construção dos suportes dos comparadores.

À engenheira Vânia Marques que sempre se mostrou disponível para realizar os ensaios laboratoriais e ajudar em tudo o que precisava.

Quero ainda agradecer à Betão Liz por ter fornecido o betão necessário para a construção das lajes e o seu transporte.

Ainda relacionado com o dia da betonagem das lajes agradecer aos meus colegas Vasco Porém e João Rijo que me auxiliaram, juntamente com o Professor Doutor João Veludo, o João Baptista, o Nuno Almeida e, um especial agradecimento ao meu pai que ofereceu os trabalhos de pedreiro na realização das lajes.

Ainda agradecer aos funcionários da Manutenção da ESTG, que sempre se disponibilizaram a fornecer todo o material e equipamento que necessitei ao longo de todos os trabalhos laboratoriais realizados.

Ao António Reis que me facultou o filme plástico que necessitei para as lajes.

Ao Professor João Ramos por me ter fornecido as placas para medir a temperatura e a humidade ambiente, e ainda ter disponibilizado do seu tempo para me explicar o seu funcionamento e por ter fornecido os dados adquiridos pelas placas no final das medições.

Ainda agradecer ao professor da Universidade de Coimbra, Professor Doutor Hugo Costa, por ter realizado o ensaio de retração e fornecido os devidos valores.

Por fim, e não menos importante, agradecer aos Seguranças do D, especificamente ao Sr. Carlos Reis, pela paciência, simpatia e pelos momentos de descontração.

Resumo

A construção e reabilitação de pavimentos de betão assentes no solo, de edifícios industriais, representam atualmente uma importante área de intervenção na construção em Portugal. As exigências requeridas nas normas existentes para este tipo de pavimentos, nomeadamente o ACI 302.1R (2015) (Guide for Concrete Floor and Slab Construction), têm vindo a aumentar de modo a melhorar a qualidade da construção e das intervenções. Para contribuir para este objetivo, é essencial conhecer os principais requisitos destes pavimentos e as principais patologias a eles associados.

Uma das patologias mais recorrentes, e por isso mais relevantes, dos pavimentos industriais de betão assentes no solo é o *curling*, tendo sido por esta razão decidido focar a presente dissertação de mestrado no seu estudo.

O *Curling* manifesta-se como uma deformação dos pavimentos nas suas extremidades ou nas juntas. Pode ainda verificar-se o cenário oposto, de levantamento do pavimento na zona central. Em ambos os casos as causas são, fundamentalmente, gradientes de temperatura e/ou de humidade ao longo da espessura do pavimento e outras solicitações como por exemplo cargas de empilhadoras. Desta forma as diferentes condições de exposição dos pavimentos, dependentes da sua localização (interior ou exterior do edifício), e a interface laje/sub-base desempenham um papel fundamental neste fenómeno. A ação do peso próprio contraria esta deformação causando tensões de tração na parte superior ou inferior e a conseqüente fendilhação do pavimento. Esta patologia tem grandes implicações na normal utilização dos pavimentos e é responsável por perdas significativas de rendimento das empresas. Desta forma, é muito importante o estudo do fenómeno de *Curling*, de modo a evitar, e / ou mitigar esta patologia, e melhorar o desempenho dos pavimentos industriais.

No presente trabalho foram definidos os seguintes objetivos: (1) estudar a influência da interface laje / sub-base, e (2) estudar a influência da classe de exposição ambiental (temperatura e humidade) no fenómeno do *curling*.

Para atingir os objetivos propostos foi realizado um programa experimental com a construção de oito (8) lajes de pequena espessura. As lajes foram colocadas em dois ambientes diferentes, para avaliar o comportamento de pavimentos no interior e no exterior. Foram ainda considerados dois tipos de interface laje / sub-base: (i) colocação de membrana plástica com uma espessura de 250 microns; e (ii) colocação de uma camada de areia de 10 cm. Com esta situação pretendeu-se avaliar a influência das diferentes condições de

drenagem na variação dos gradientes de humidade e temperatura ao longo da espessura da laje e a sua influência no *curling*.

Concluiu-se que a utilização da membrana plástica na interface laje / sub-base conduz a menores deformações no pavimento quando comparado com a utilização de uma camada de areia na interface laje / sub-base. Conclui-se igualmente que a humidade relativa e a temperatura ambiente influenciam a deformação destes pavimentos.

Palavras-Chave: pavimentos industriais, *curling*, gradiente, temperatura, humidade

Abstract

The construction and rehabilitation of ground-supported concrete pavements, in industrial buildings, is currently a relevant niche in the construction sector in Portugal. The requirements in existing codes for this type of pavements, specially the ACI 302.1 R (2015) (Guide for Concrete Floor and Slab Construction), have become more demanding aiming at improving the quality of the final product. To contribute to this goal, it is mandatory knowing the main requirements of these pavements as well as the associated main pathologies.

One of the most recurrent, and thus most relevant, pathologies of industrial ground-supported concrete pavements is 'curling'. It was therefore decided to focus the present master dissertation on its study.

Curling occurs as a deformation of the pavement at its edges or in joints. The opposite scenario, of lifting of the pavement's central region, can also be observed. In both cases, the causes are mainly temperature gradients and/or moisture gradients and other actions such as forklifts. Therefore, the pavements' exposure conditions, highly dependent on its location (inside or outside the building), as well as the slab/sub-base interface, play a fundamental role in this phenomenon. The action of the pavement's dead-weight has the opposite effect on the pavement's deformation, causing tension stresses in the upper surface or in the lower surface, leading to cracking. This anomaly has severe consequences since it can compromise the regular use of the pavements, being responsible for significant losses in the business income. For all these reasons, to study the curling phenomenon, with the aim of defining procedures to avoid or, at least, mitigate this pathology and thus enhance the performance of industrial ground-supported pavements, is undoubtedly of outmost importance.

In the present work, the following objectives have been defined: (1) to study the influence of the pavement / foundation ground interface, and (2) to study the influence of the environmental exposure class (temperature and relative humidity) in the curling phenomenon.

To reach the proposed goals, an experimental program has been conducted. Eight concrete slabs with reduced thickness were built. These were submitted to two different environments, aiming at assessing the behaviour of pavements localized both inside and outside industrial facilities. In addition, two different types of the slab / sub-grade interface were considered: (1) interface with a polymeric membrane with a thickness of 250 microns, and (2) interface with a 10 cm layer of sand. This situation was to evaluate the influence of

different drainage conditions on the variation of moisture and temperature gradients along the slab thickness and their influence in the *curling*.

It was concluded that the use of a membrane plastic sheet in slab/sub-base interface leads to smaller deformations in the pavement when compared with the use of a sand layer in the slab/sub-base interface. It appears also that the relative humidity and ambient temperature influence the deformation of these concrete pavements.

Keywords: industrial pavements, curling, gradient, temperature, humidity

Lista de figuras

Figura 1 – Pavimento com mosaicos cerâmicos (Oleiro, J., 1973)	5
Figura 2 – Constituição de um pavimento industrial corrente (Adaptado de Cristelli, R., 2010).....	7
Figura 3 – Esquema ilustrativo das funções de um filme impermeável (Adaptado de Cristelli, R., 2010)	9
Figura 4 – Junta de dessolidarização do tipo diamante.....	11
Figura 5 – Execução de Junta Serrada	12
Figura 6 – Esquema ilustrativo de um pavimento de betão simples (Adaptado de João, C., 2014).....	14
Figura 7 – Esquema ilustrativo de um pavimento de betão com malha eletrossoldada (Adaptado de Passos, M., 2011).....	14
Figura 8 – Piso duplamente armado	15
Figura 9 – Esquema ilustrativo de um pavimento de betão pré-esforçado (Adaptado de João, C., 2014)	15
Figura 10 – Esquema ilustrativo de um pavimento de betão com fibras (Adaptado de João, C., 2014)	16
Figura 11 - Ações a considerar no dimensionamento de um pavimento industrial.....	17
Figura 12 – Tipos de cargas estáticas	18
Figura 13 – Esquema adaptado da retração em pavimentos industriais (CCAA, 2006).....	21
Figura 14 – Curling em pavimentos	23
Figura 15 – Fissura causada pela combinação de curling e das cargas a que o pavimento é sujeito.....	23
Figura 16 – Alteração da geometria do pavimento com o aumento localizado da espessura	29
Figura 17 – Técnicas de reparação do <i>curling</i> : execução de novas juntas e reparação de juntas	30
Figura 18 – Técnicas de reparação do <i>curling</i> : colocação de cilindros estabilizadores de juntas.....	31

Figura 19 – Geometria dos modelos e instrumentação adotados por Ramseyer, C., <i>et al.</i> , 2012.....	32
Figura 20 – Resultados nas lajes de composições diferentes (Ramseyer, C., <i>et al.</i> , 2012).	33
Figura 21 – Modelos e instrumentação utilizados por Fortin, C., 2005	34
Figura 22 – Resultados obtidos no estudo realizado por Fortin, C., (2005).....	35
Figura 23 – Esquema de ensaio e instrumentação adotado por Banthia, N., <i>et al.</i> , 2014 ...	36
Figura 24 – Extensões observadas em função do volume de fibras utilizado (<i>Banthia, N. et al. (2014)</i>).....	37
Figura 25 – Geometria dos modelos utilizados.....	41
Figura 26 – Fabrico das lajes	43
Figura 27 – Ensaio de espalhamento	45
Figura 28 – Ensaio dos provetes à compressão.....	46
Figura 29 – Evolução da resistência à compressão com o tempo	46
Figura 30 – Proвете ensaiado à flexão.....	47
Figura 31 – Provetes do ensaio de retração.....	47
Figura 32 – Evolução da retração ao longo do tempo.....	48
Figura 33 – Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons	49
Figura 34 – Instrumentação para medição do módulo de elasticidade.....	50
Figura 35 – Instalação dos aparelhos de medida.....	52
Figura 36 – Localização dos comparadores e dos furos para medição da humidade relativa e temperatura internas do betão nas diferentes lajes.....	54
Figura 37 – Cortes referentes à Figura 36 a) e b).....	54
Figura 38 – Ensaio do equipamento de medição na laje teste	55
Figura 39 – Leitura dos valores de deformação dada pelos comparadores.....	55
Figura 40 – Recolha dos valores da humidade e temperatura na secção da laje	56
Figura 41 – Valores da humidade relativa e da temperatura ambiente	58
Figura 42 – Variação do gradiente de humidade ao longo do tempo.....	59
Figura 43 – Variação do gradiente de temperatura ao longo do tempo.....	60
Figura 44 – Variação da deformação das lajes ao longo do tempo.....	61
Figura 45 – Variação da humidade relativa e da temperatura ambiente	62

Figura 46 – Variação de humidade relativa para diferentes condições ambientais e da interface	64
Figura 47 – Gradiente de temperatura para diferentes condições ambientais e da interface laje / sub-base.....	66
Figura 48 – Deformação da laje para diferentes condições ambientais e da interface	67

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 – Patologias em pavimentos industriais (ArcelorMittal, 2014).....	19
Tabela 2 – Efeitos da quantidade de reforço no curling (Adaptada de Suprenant, B., 2002)	27
Tabela 3 – Trabalhos laboratoriais realizados	39
Tabela 4 – Quadro resumo das características das lajes construídas	40
Tabela 5 – Resultado do ensaio de espalhamento.....	45
Tabela 6 – Valores médios obtidos no ensaio de flexão	47
Tabela 7 – Valor medido da velocidade de propagação de ultra-sons	49
Tabela 8 – Valores utilizados na determinação do módulo de elasticidade	50
Tabela 9 - Valores para o cálculo do módulo de elasticidade	51

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Simbologia

Siglas

EC2 - Eurocódigo 2

Letras latinas maiúsculas

A_c – Área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, calculada com base na dimensão designada do provete ou a partir de medições no provete

$E_{c,0}$ – Módulo de elasticidade secante inicial

$E_{c,s}$ – Módulo de elasticidade secante estabilizado

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico do betão

F – Carga máxima

I – Espaçamento dos roletes inferiores

L – Comprimento de percurso na determinação da velocidade de propagação de ultra-sons no betão

R – Velocidade de aplicação da carga requerida

T – Tempo de trânsito na determinação da velocidade de propagação de ultra-sons no betão

V_p – Velocidade de propagação de ultra-sons no betão

Letras latinas minúsculas

d_1 e d_2 – Dimensões laterais do provete

f_c – Resistência à compressão do betão

f_{cf} – Resistência à flexão segundo a NP EN 12390-5

s – Velocidade de aplicação da tensão segundo a NP EN 12390-5

Letras minúsculas gregas

σ_a – Tensão superior nominal

σ_b – Tensão inferior nominal

σ_p – Tensão de pré-carga nominal
 $\Delta\sigma$ – Diferença entre as tensões medidas σ_a^m e σ_b^m (Método A)
 $\Delta\varepsilon_0$ – Diferença entre as extensões durante o primeiro ciclo de carga
 $\Delta\varepsilon_3$ – Diferença entre as extensões durante o terceiro ciclo de carga
 σ_a^m – Tensão medida correspondente à tensão superior nominal, σ_a ,
 σ_b^m – Tensão medida correspondente à tensão inferior nominal, σ_b ,
 $\varepsilon_{a,i}$ – Extensão média sob a tensão superior no ciclo de carga i
 $\varepsilon_{b,0}$ – Extensão média sob a tensão inferior no ciclo de carga 0
 ν_d – Coeficiente de Poisson dinâmico do betão
 ρ – Massa volúmica

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Plano Geral da Dissertação.....	3
2. PAVIMENTOS INDUSTRIAIS.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Constituição dos Pavimentos Correntes	7
2.3. Tipologia quanto ao reforço estrutural da camada de betão	13
2.4. Ações	17
2.5. Patologias Recorrentes	19
3. CURLING.....	21
3.1. Introdução	21
3.2. Efeitos do <i>curling</i>	24
3.3. Fatores de Influenciam o <i>curling</i>	25
3.4. Medidas de prevenção/reparação	28
3.5. Trabalhos de Referência	32
3.6. Notas finais.....	37
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL. MATERIAIS E METODOLOGIA DE ENSAIOS	38
4.1. Introdução	38
4.2. Planeamento dos Ensaios e Geometria dos Modelos.....	38
4.3. Fabrico das lajes	41
4.4. Ensaios de caracterização do Betão.....	44
4.4.1.Introdução.....	44
4.4.2. Ensaio de Espalhamento	45

4.4.3. Ensaio de Resistência à Compressão	45
4.4.4. Ensaio de Resistência à Flexão	46
4.4.5. Ensaio de Retração	47
4.4.6. Velocidade de Propagação de ultra-sons	48
4.4.7. Determinação do módulo de Elasticidade	49
4.5. Instrumentação	51
4.6. Medições.....	54
5. RESULTADOS. ANÁLISE E DISCUSSÃO	57
5.1. Introdução.....	57
5.2. Resultados	57
5.3. Análise e Discussão dos Resultados	62
5.4. Comparação com Trabalhos de Referência.....	69
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	70
6.1. Síntese das Principais Conclusões	70
6.2. Desenvolvimentos Futuros	71

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Esta dissertação incide num fenómeno, que merece um maior cuidado em pavimentos industriais, conhecido na terminologia inglesa como *Curling*.

É importante clarificar *a priori* a definição adotada nesta dissertação do fenómeno de *curling*, que muitas vezes é confundido com o fenómeno de *warping*, pois as suas definições sobrepõe-se. O Instituto Americano de Betão (*ACI – American Concrete Institute*) define o *curling* como uma distorção de um elemento originalmente linear ou plano num elemento de forma curva, tal como o *warping* de uma laje, devido à fluência ou a gradientes de temperatura/humidade em zonas adjacentes às suas faces opostas. Enquanto o *warping* é definido como um desvio de uma superfície da sua forma original, geralmente causada por gradientes de temperatura e/ou de humidade dentro do material. Desta forma, irá apenas utilizar-se a definição de *curling* como sendo a distorção de um elemento originalmente linear ou plano devido, essencialmente, a gradientes de temperatura e/ou de humidade em zonas adjacentes às suas faces opostas, não sendo mencionado o fenómeno de *warping* para simplificar a leitura.

Os pavimentos industriais de betão são estruturas laminares com uma elevada área de contacto com o meio ambiente e, como tal, estão sujeitos às várias intempéries. A influência da temperatura ambiente e as trocas de água betão/ar e betão/sub-base são elevadas (Antunes, A e Barros, J., 2003). Como o betão é um material poroso, dilata e contrai consoante a mudança das condições a que está exposto. O aumento de temperatura faz com que o betão expanda enquanto a diminuição da temperatura faz com que o betão contraia. Resultados similares podem ser observados quando o betão é sujeito a mudanças de humidade. Quando a quantidade de água no betão aumenta, o betão expande, enquanto a diminuição da quantidade de água no betão, leva à sua contração (Hiller, J., 2011). No entanto, as condições a que as diferentes faces do betão estão expostas são diferentes, o que leva ao desenvolvimento de gradientes de temperatura e/ou humidade e, por conseguinte, esse gradiente é materializado no pavimento de betão na forma de *curling*. Quanto maior são os gradientes que o pavimento está exposto, maior é a tendência ao *curling* (Siddique, Z. *et al.*, 2005).

O *curling* tem uma maior probabilidade de se manifestar nas primeiras idades, uma vez que o excesso de água, utilizado para obter uma maior trabalhabilidade do betão, evapora. Tal efeito resulta na retração do betão na face superior, enquanto a face inferior do betão permanece húmida. Uma sub-base que permita a ascensão da humidade do solo, agrava a humidade na base da laje e, conseqüentemente, a tendência ao *curling* (Fortin, C., 2005).

Este fenómeno influencia fortemente a performance dos pavimentos uma vez que está diretamente ligado a patologias recorrentes, como é o caso da fissuração, comprometendo todas as atividades que neles são desenvolvidas, levando à diminuição da produtividade das mesmas (João, C., 2014).

Os trabalhos desenvolvidos nesta área de estudo do *curling* são reduzidos, contrariamente à sua manifestação em pavimentos industriais que é relevante. No entanto a maior parte dos trabalhos realizados são efetuados em condições de temperatura e humidade controladas, onde a variável de estudo mais comum é a composição do betão. Foi a escassez de estudos deste fenómeno em ambientes reais onde as variáveis de estudo fossem para além da composição do betão, que motivaram a realização do presente trabalho. Este trabalho compreende a realização de dois tipos de lajes onde a camada de betão não varia. Um tipo de laje constituído com uma sub-base de areia e outro com um filme plástico, submetidos a dois ambientes diferentes e inconstantes.

1.2. Objetivos

Para esta dissertação definiram-se os seguintes objetivos:

- Avaliar o *curling* e os gradientes de humidade e temperatura em lajes de betão com fibras metálicas, expostas a dois ambientes distintos de temperatura e humidade reais, com interfaces laje / sub-base diferentes: i) laje assente num filme plástico; e ii) laje assente em camada de areia com 10 cm de espessura;
- Relacionar os campos internos de temperatura e humidade das lajes estudadas, com o *curling* das mesmas.

1.3. Plano Geral da Dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em sete partes distintas.

No Capítulo 1 faz-se uma introdução acerca do fenómeno do *curling*, mais precisamente, em que tipos de estrutura se manifesta, as principais causas e as principais consequências. Fala-se dos estudos realizados acerca do mesmo e, a partir daí, fundamenta-se o presente estudo, fazendo uma caracterização geral das variáveis a estudar. Ainda são enunciados os objetivos que se pretendem atingir com esta dissertação.

No Capítulo 2 abordam-se os pavimentos industriais correntes, começando por um enquadramento histórico, seguido de uma descrição da constituição dos pavimentos industriais correntes explicando a função de cada elemento constituinte. Referem-se ainda as tipologias de pavimentos segundo o seu reforço estrutural e as ações a que este está sujeito. Por fim, expõe-se as patologias recorrentes neste tipo de estruturas e as suas causas.

O Capítulo 3 é dedicado ao tema central desta dissertação, o *curling*. Este capítulo começa por introduzir o tema, apresentado este fenómeno e ao que se deve. Seguidamente expõe-se os fatores/elementos que influenciam o *curling* e de que maneira. Seguidamente, apresentam-se as medidas de prevenção/reparação mais utilizadas na prática. Por fim, são descritos os principais trabalhos que referenciaram esta dissertação, particularmente a geometria dos modelos.

No Capítulo 4 é exposto o programa experimental, começando com o planeamento dos ensaios e descrição da geometria dos modelos realizados, depois são enumerada as várias etapas do fabrico das lajes, seguido dos ensaios de caracterização do betão e respetivos

resultados. Por fim, são descritos os passos para a colocação da instrumentação nas lajes a fim de começar a etapa de medições que é descrita logo a seguir.

O Capítulo 5 é o capítulo referente aos resultados e respetiva análise e discussão. São apresentados os valores de *curling* nas diferentes lajes, a temperatura e humidade internas das lajes e temperatura e humidade ambiente, comparando as variáveis entre si possibilitando a discussão dos resultados e apresentando as devidas conclusões.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e são propostos alguns tópicos para futuros trabalhos relacionados com este.

2. Pavimentos Industriais

2.1. Introdução

Os pavimentos industriais surgiram com a indústria têxtil no período da Revolução Industrial, nos finais do século XVIII. Deste modo, a necessidade de espaço para os trabalhadores e de grandes áreas industriais para a implantação dos equipamentos ligados a esta indústria (fiação e tecelagem), levou à adoção de grandes superfícies de pavimentação. Os materiais adotados inicialmente eram os mais comuns para a época, como era o caso da madeira, os mosaicos cerâmicos (Figura 1 – Pavimento com mosaicos cerâmicos (Oleiro, J., 1973)

, a pedra e terra batida. Os pavimentos eram relativamente simples, até que surgiram as indústrias pesadas que requeriam maiores exigências no que concerne às características funcionais como a resistência mecânica e a resistência à abrasão (João, C., 2014).



Figura 1 – Pavimento com mosaicos cerâmicos (Oleiro, J., 1973)

Assim, no final do século XIX, as betonilhas pobres e os massames de cimento substituíram os materiais até então utilizados (João, C., 2014).

No século XX, os pavimentos industriais evoluíram para lajes de betonilha ou de betão simples, contudo apresentavam elevada deterioração, apesar das elevadas espessuras e do bom acabamento. A retração e a fendilhação estavam na origem da deterioração pois, à data, o conhecimento dos fenómenos físicos do betão era escasso, para além da falta de condições de obra e da baixa qualidade dos materiais utilizados (João, C., 2014).

Com a 2ª Guerra Mundial (1939 a 1945) denotou-se o rápido desenvolvimento das indústrias e, como tal, as suas exigências cresceram mas as instalações industriais não acompanharam esse crescimento. A solução encontrada na altura para colmatar as elevadas

exigências (cargas elevadas, tráfego pesado, produtos abrasivos) foi a adoção de paralelepípedos de pedra ou revestimento com chapas metálicas para as indústrias pesadas. Deste modo resolvia-se, temporariamente, a problemática do desgaste superficial (João, C., 2014).

Foi a partir dos anos 60 que a produção de betão em centrais se começou a desenvolver. Até então a produção de betão era exclusivamente feita em obra e, dependentemente da quantidade que era produzida, a betonagem dos pavimentos era restrita a pequenas áreas. A transferência de carga entre placas eram assegurada por ferrolhos de aço ou ligações do tipo ‘macho-fêmea’. Com o desenvolvimento da produção de betão, o controlo de fissuração devida à retração por secagem foi introduzido nos pavimentos industriais. A introdução das novas exigências levaram à introdução de armadura e juntas no pavimento a distâncias regulares, mantendo a adoção dos ferrolhos como elemento de transferência de cargas sendo que a utilização de elementos ‘macho-fêmea’ foi gradualmente descontinuada. Foi também nesta altura que foi introduzido o pré-esforço para produzir áreas maiores, e régua vibratórias para obtenção de um betão confinado e com uma superfície plana (João, C., 2014).

Com os anos 70 veio a crise do petróleo e, como tal, introduziram-se novas misturas na produção do betão, de modo a melhorar as suas características (resistência, durabilidade, trabalhabilidade, retardadores/aceleradores de presa), a obter soluções mais económicas e ambientalmente mais sustentáveis. As cinzas volantes, as escórias de alto-forno e o filer calcário eram, e continuam a ser, os mais utilizados. Foi também nos anos 70 que se denotou um grande desenvolvimento no campo dos pavimentos rodoviários e, conseqüentemente, também nos pavimentos industriais. A nível de normas/critérios de dimensionamento começou-se por adotar os conhecimentos dos engenheiros de estradas pois os pavimentos rodoviários rígidos assemelhavam-se à natureza dos pavimentos industriais. No entanto, o grande aumento da produção deste tipo de construção nos finais do século XX, associado às exigências do mercado da construção civil, levou à necessidade de requisitos de dimensionamento e de controlo de qualidade e, como tal, das exigências requeridas. De igual modo os equipamentos inerentes sofreram uma modernização, levando à criação de novas ferramentas de modo a acompanhar as necessidades criadas com o desenvolvimento desta área. São o exemplo, os *Laser Screed* (nivelamento e compactação) e os helicópteros (acabamento) (João, C., 2014).

2.2. Constituição dos Pavimentos Correntes

Os pavimentos industriais têm uma configuração comum, de forma a que cada camada/elemento tenha uma função fundamental no desempenho do pavimento. Importa referir que é fundamental um correto projeto e execução de cada camada, pois qualquer erro nestas fases pode comprometer a eficiência, qualidade e durabilidade do pavimento em geral (Cristelli, R., 2010). A Figura 2 ilustra a constituição típica dos pavimentos industriais

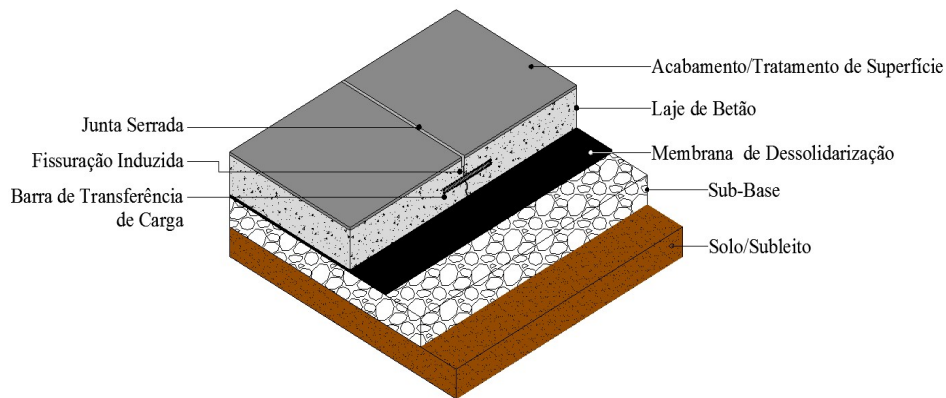


Figura 2 – Constituição de um pavimento industrial corrente (Adaptado de Cristelli, R., 2010)

Solo

O solo é a camada que suporta o pavimento, independentemente da sua configuração. Tem como função absorver as solicitações de cargas transmitidas pelo pavimento. Por essa razão é muito importante conhecer a capacidade resistente do solo com que se está a trabalhar. Para tal, devem ser realizados estudos geotécnicos para a determinação das características do solo (Passos, M., 2011). No caso de o solo não apresentar as características necessárias, deve-se optar por colocar um solo de empréstimo devidamente compactado (João, C., 2014).

Sub-base

A sub-base é a camada posicionada entre o solo e a camada de betão (Passos, M., 2011). Esta apresenta várias funções fundamentais: i) funciona como camada de bloqueio, isto é, impede a bombagem de finos (arrastamento de materiais constituintes da camada subadjacente para a camada acima, ficando aí depositados, por ação da água) e a humidade ascendente; ii) assegura uma base nivelada para a construção da laje e homogeneiza a camada de apoio da laje de betão, reduzindo assim as variações de comportamento do solo;

e iii) aumenta a capacidade estrutural do piso e transmite o carregamento desde a superfície do pavimento até ao solo (Cristelli, R., 2010). A escolha do material da sub-base depende das cargas a que o piso irá ser sujeito (empilhadoras e outros equipamentos de transporte pesados, maquinaria pesada, armazenamento) e da oferta de materiais disponíveis na zona. Podem ser agrupadas em dois grandes grupos quanto ao tipo de material utilizado: os granulares e os tratados. Os granulares podem ser de granulometria aberta (ausência de um ou mais diâmetros de agregados) ou fechada (vasta gradação de diâmetros de agregados), enquanto os tratados podem ser alterados com cimento ou outros aditivos (cal, pozolana, asfalto, ou aditivos químicos) (Passos, M., 2011).

Na adoção de sub-bases granulares deve ser bem definido o tipo de granulometria adotado, uma vez que este deve ser adequado a cada tipo de projeto. Uma granulometria fechada será adequada para projetos onde se pretenda essencialmente o aumento da capacidade resistente do pavimento. Uma granulometria aberta está relacionada, não só com um aumento da capacidade resistente mas, fundamentalmente com a drenagem das águas (Passos, M., 2011).

As sub-bases tratadas com cimento podem ter várias funções consoante a sua tipologia. Solo-cimento é a sub-base ideal para aumentar a resistência, diminuindo assim a carga transmitida ao solo. A brita graduada com cimento é aplicada substancialmente em pavimentos onde a laje de betão apresenta uma espessura reduzida, sendo obtida através de uma calda de cimento e brita (Passos, M., 2011).

Filmes Impermeáveis/Membrana de Dessolidarização/Barreira de Vapor

Este elemento é formado por um material impermeável, como é o caso de filmes de polietileno. Tem várias funções fundamentais para um bom funcionamento do pavimento. Permite a redução de atrito, através do impedimento da consolidação estrutural entre a camada superior (camada de betão) e a camada inferior (sub-base), para que a camada de betão se possa mover face aos esforços induzidos pela retração do betão, e assim diminuir a fissuração (Cristelli, R., 2010). Outra função é evitar a perda de finos e água presentes na camada de betão, impedindo que a água necessária para a hidratação do cimento seja transferida para a sub-base, otimizando o processo da cura do betão. Por fim, outra função essencial é evitar a subida de águas/humidades ascendentes do solo para a camada de betão (Passos, M., 2011). A Figura 3 esquematiza de uma forma mais intuitiva, as funções de um filme impermeável.

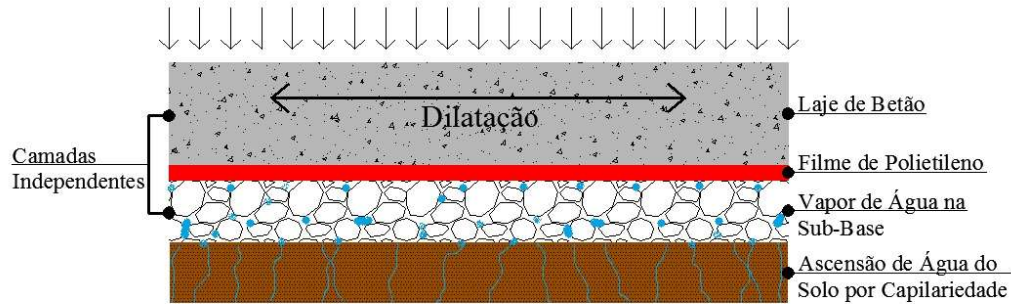


Figura 3 – Esquema ilustrativo das funções de um filme impermeável
(Adaptado de Cristelli, R., 2010)

Camada de Betão

A camada estrutural superior do sistema de pavimentos industriais assentes no solo é constituída por uma laje de betão. Esta camada é a mais importante e, por conseguinte, apresenta um maior número de requisitos (João, C., 2014). É a camada responsável por receber e absorver as ações a que o pavimento está sujeito e transmiti-los, de maneira uniforme à sub-base e, posteriormente, ao solo.

A camada de betão pode ser de betão simples ou reforçada estruturalmente com malha eletrossoldada, armadura de aço, fibras ou, no caso de estruturas mais solicitadas, cabos de pré-esforço, ou soluções híbridas com armaduras e fibras. No entanto, para além de uma adequada escolha do tipo de reforço, inicialmente deve-se escolher o tipo de betão a ser utilizado, e certificar as suas características em obra (resistência à compressão, composição, caracterização dos agregados, abaixamento do betão, resistência à flexão, resistência ao desgaste, exsudação, segregação). A adoção de um betão com baixa resistência conduz a um desgaste superficial severo e uma estrutura final com características de baixa qualidade, condicionando os trabalhos e, conseqüentemente, a produtividade. Um aspeto muito importante a ter em conta no momento da betonagem é a temperatura e humidade ambientais. Inadequadas condições ambientais levam ao desenvolvimento de fenómenos como a retração e os gradientes de humidade e temperatura, que provocam tensões na laje de betão que podem ser muito significativas no futuro desempenho de uma estrutura como os pavimentos industriais (João, C., 2014).

Acabamento de Superfície

O acabamento de superfície deve ser escolhido em função da utilização que se pretende dar à área do pavimento (João, C., 2014). As principais funções que um acabamento de superfície deve satisfazer são: dotar o pavimento de resistência ao desgaste superficial por abrasão, ao choque, a riscos, a agentes químicos, remover imperfeições, nivelar de acordo com as especificações de projeto e impermeabilizar.

O acabamento superficial é a camada de contacto direto com as ações externas de carregamentos e agentes agressores e, por essa razão, a escolha do tipo de acabamento deve ser escolhido em função das atividades que serão praticadas na área do pavimento (Cristelli, R., 2010).

Os processos mais utilizados para garantir a qualidade do acabamento superficial são: os agregados minerais e metálicos aplicados por aspersão ou, através de argamassas, a aplicação de líquidos endurecedores de superfície, argamassas cimentícias de alta resistência e, no caso de se pretender uma maior proteção e resistência, os revestimentos de alto desempenho que permitem uma maior redistribuição das tensões no betão (Passos, M., 2011).

Juntas

As juntas são mecanismos de descontinuidade estrutural que permitem essencialmente fazer face aos movimentos que a laje de betão pode sofrer (Cristelli, R., 2010). Esses movimentos podem ocorrer devido a fenómenos como a retração, as variações de temperatura e de humidade ou, até mesmo, devido a deformações impostas, gerando assim esforços de tração no betão. Como se sabe, o betão resiste muito pouco a esforços de tração e, como tal, a implantação de juntas é de extrema importância para permitir que a camada de betão se mova livremente, diminuindo assim as tensões instaladas para valores inferiores às tensões de tração do betão, evitando assim a ocorrência de fissuras (Passos, M., 2011).

Uma grande percentagem das patologias que ocorrem nos pavimentos industriais advêm, direta ou indiretamente de uma má conceção das juntas, tanto na fase de projeto como na fase de construção. Por esta razão é indispensável a implantação das diferentes tipologias de juntas, adequando-se às várias situações, especificando os materiais a utilizar e os pormenores construtivos a executar (Antunes, A. e Barros, J., 2003). Existem as juntas de construção, de dessolidarização/isolamento, de controlo de fendilhação/serradas e de dilatação (João, C., 2014).

As *juntas de construção* são aplicadas quando não se consegue realizar uma betonagem contínua ou quando existe qualquer tipo de condicionamentos na construção. A implantação deste tipo de juntas deve ser bem equacionada, devendo optar-se sempre pelo menor número, uma vez que são elementos suscetíveis de maiores fragilidades e patologias. Os problemas comumente associados são assentamentos diferenciados entre painéis, fruto de tráfego intenso, o que leva à degradação acelerada das suas arestas (Passos, M., 2011). Por esta razão, este tipo de junta deve ser evitada em áreas de trânsito intenso de maquinaria ou, quando não pode ser evitada devem ser providenciados elementos de transferência de carga entre os painéis e de proteção de juntas anexado com o sistema de cofragem utilizado (Cristelli, R., 2010).

As *juntas de dessolidarização/isolamento* são os elementos que criam uma descontinuidade estrutural, separando a laje de betão dos outros elementos estruturais adjacentes a esta, como é o caso dos pilares, paredes, fundações e caixas-de-escadas, ou mesmo de elementos como caixas de visita (João, C., 2014). Têm como principal objetivo isolar este tipo de estruturas, impedindo a transferência de esforços horizontais da laje, possibilitando assim o livre movimento da laje face a movimentos provocados pela retração e dilatação. A espessura usada é igual à espessura da laje de betão e a largura é entre os 3 e os 10 mm, e deve ser utilizado um material adequado para o preenchimento, de modo que absorva os esforços para não os transmitir às outras estruturas (Cristelli, R., 2010). É normal a utilização de uma folha de polietileno expandido entre o pavimento e o elemento a isolar, selada com um polímero elástico (João, C., 2014). A Figura 4, abaixo apresentada, mostra a configuração em planta do sistema adotado no encontro do pavimento com um pilar, que é tem uma configuração particular comparativamente aos outros elementos (Cristelli, R., 2010).

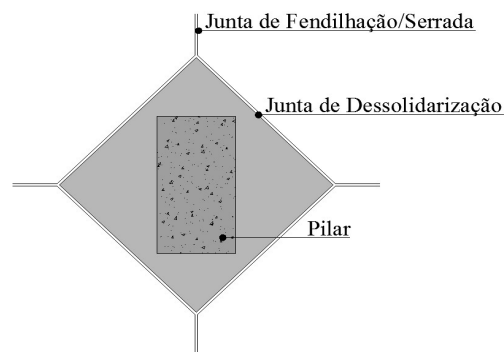


Figura 4 – Junta de dessolidarização do tipo diamante

As juntas de *controle de fendilhação/serradas* são implantadas para criar um plano de fragilidade na laje e assim induzir uma fissuração localizada para que possa ser controlada ao longo desse plano. Este tipo de juntas (Figura 5) deve ter uma profundidade mínima correspondente a 1/3 da espessura da laje e é construída através da serragem da laje com recurso a equipamentos próprios. Depois das juntas executadas devem ser seladas com um polímero elástico (Figura 5 b) de modo a acomodar possíveis movimentos, com a colocação prévia de um cordão de polietileno, de modo a assegurar a correta profundidade de selagem da junta (João, C., 2014).



a) Execução de Junta Serrada no Pavimento
(Retirado de:
<http://pisoconcreto.com/piso-concreto/piso-concreto-polido>)



b) Cordão de Polietileno (Retirado de:
<http://imperuniao.blogspot.pt/2011/01/corpo-de-apoio-para-massas-selantes-em.html>)

Figura 5 – Execução de Junta Serrada

É importante garantir a transferência de carga entre painéis, através de barras de transferência (ferrolhos) colocados a meia altura da espessura da laje ou então, se a fendilhação ao longo do plano tiver uma largura inferior a 0.9 mm, o imbricamento entre os agregados na parte não serrada poderá ser suficiente. Este tipo de juntas é a que resulta em maiores patologias, fruto de erros do dimensionamento ou má execução. Portanto, com vista a diminuir o seu número e consequentemente, a probabilidade de conduzir a patologias, deve optar-se pela inclusão de fibras no betão ou até mesmo a utilização de pré-esforço se o orçamento permitir (Passos, M., 2011).

Por fim, as *juntas de dilatação* são aquelas que permitem a expansão da placa de betão face às variações de temperatura e de humidade. A sua execução é semelhante às juntas de construção, mas neste caso são utilizadas fitas de polietileno entre placas de betão e posteriormente selado, como as juntas de dessolidarização. Como este tipo de pavimentos estão normalmente em ambientes interiores, os esforços de retração no betão são maiores do

que os de dilatação, contrariamente ao que se observa em ambiente exteriores. Desta forma o seu efeito não é significativo (Passos, M., 2011).

2.3. Tipologia quanto ao reforço estrutural da camada de betão

Dependendo das exigências a que o pavimento será sujeito, deve adequar-se a solução ao sistema construtivo base apresentado no ponto anterior, para que seja garantida a qualidade, economia e durabilidade do pavimento (Passos, M., 2011). Deste modo, neste ponto serão apresentados as diferentes soluções construtivas a nível do reforço da laje de betão.

O reforço estrutural dos pavimentos industriais tem como principais funções: o aumento da resistência da camada de betão para fazer face aos carregamentos impostos e às crescentes exigências a que este tipo de estruturas está sujeita, tornar a camada de betão mais delgada, controlar problemas de fissuração e reduzir o número de juntas pelo aumento da área da placa de betão (Cristelli, R., 2010). Deste modo, vão ser apresentados os diferentes tipos de reforço integrante na constituição dos pavimentos industriais mais comuns, começando por abordar os pavimentos de betão simples.

Pavimentos de Betão Simples

Os pavimentos de betão simples representam a solução mais simples e, como tal, também a mais condicionante. É uma solução aplicada quando os requisitos do pavimento não envolvem cargas industriais elevadas e onde o elevado número de juntas não interfere na durabilidade do pavimento (Passos, M., 2011). Uma vez que a laje é apenas constituída por betão, este sistema apresenta um bom comportamento a esforços de compressão mas um fraco comportamento à tração. Desde modo, para fazer face ao fraco comportamento à tração, aumenta-se significativamente a espessura da laje e, conseqüentemente executa-se um maior número de juntas, para controlo de fendilhação. Devido às grandes dimensões da laje de betão é indispensável o reforço da fundação ou do solo.

Ainda na localização das juntas é necessária a colocação de elementos transversais a estas para transferência de carga entre placas, para evitar a concentração de cargas nestas zonas, que são bastantes vulneráveis. A Figura 6 esquematiza um pavimento de betão simples com as barras de transferência nas juntas.

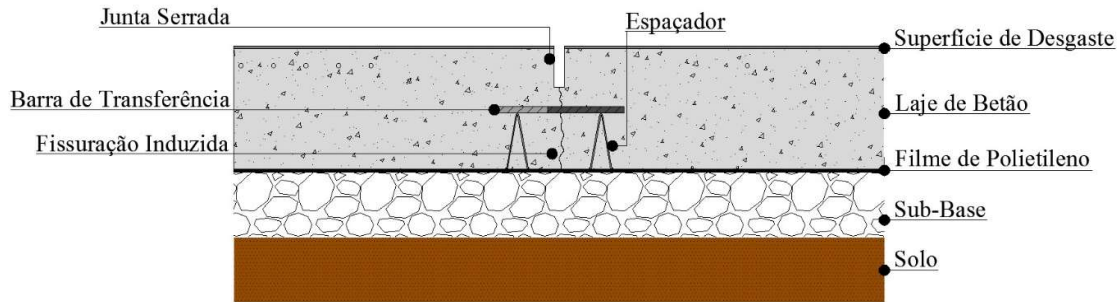


Figura 6 – Esquema ilustrativo de um pavimento de betão simples (Adaptado de João, C., 2014)

Pavimentos de Betão Reforçado com Armadura

Os pavimentos reforçados com armadura podem ser simplesmente armados ou duplamente armados, consoante o fim que se pretende dar. Os pavimentos simplesmente armados são armados superiormente por uma malha produzida *in situ*, devidamente amarrada nas intersecções ou, como é mais usual, aplicando uma malha eletrossoldada pré-fabricada. Esta malha consiste em armaduras lisas distribuídas de forma ortogonal e soldada nas intersecções (Passos, M., 2011). É colocada no terço superior da laje, respeitando sempre o recobrimento mínimo de 5 cm e, tem como principais objetivos o controlo da fissuração, resultante das variações de temperatura (apesar de ser necessário um diâmetro considerável), e ainda, um acréscimo na resistência estrutural do pavimento. Na zona das juntas, esta malha deve ser descontinuada e prevista a utilização de barras de transferência, como ilustra Figura 7 (Cristelli, R., 2010).

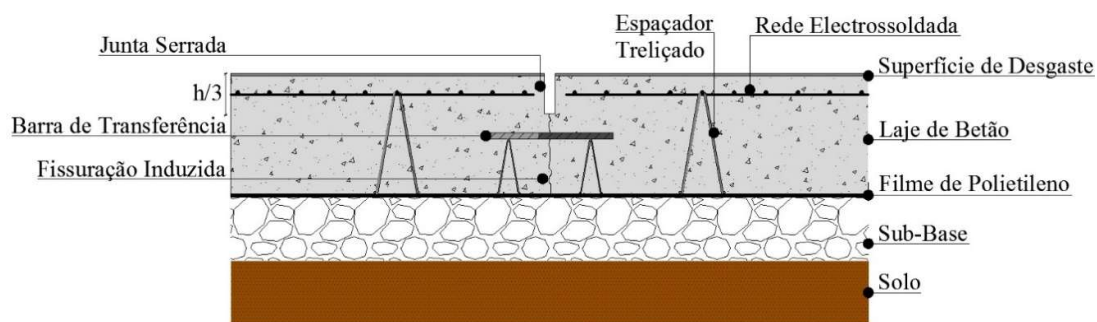


Figura 7 – Esquema ilustrativo de um pavimento de betão com malha eletrossoldada (Adaptado de Passos, M., 2011)

Nos pavimentos duplamente armados são colocados dois níveis de armadura: uma no terço superior da camada de betão, responsável pelo controlo da fissuração, e na parte inferior da camada de betão, a armadura positiva para responder aos esforços de tração. Devido à maior quantidade de armadura ativa, relativamente aos pavimentos simplesmente

armados ou mesmo comparativamente aos pavimentos de betão simples, estes permitem adotar menores espessuras e maiores áreas sem a necessidade da utilização de juntas (Cristelli, R., 2010). Tal como nos pavimentos simplesmente armados, é essencial a utilização de barras de transferência de carga onde se utilizam juntas serradas, tal como a Figura 7 apresenta, para que o piso tenha um comportamento estrutural mais uniforme (João, C., 2014).



Figura 8 – Piso duplamente armado (Retirado de: http://www.rhinopisos.com.br/site/produtos/36/piso_industrial_pavimento_concreto)

A utilização deste tipo de pavimentos é adequada quando o solo apresenta uma baixa resistência e há cargas elevadas a suportar pelo pavimento (Exemplo: cargas cíclicas) (Passos, M., 2011).

Pavimentos de Betão Pré-Esforçado

O pré-esforço nos pavimentos permite aumentar a resistência à tração do betão, reduzir o número de juntas de dilatação e a sua espessura, e ainda, torna-lo menos permeável (Cristelli, R., 2010). A Figura 9 esquematiza os componentes de um pavimento de betão pré-esforçado.

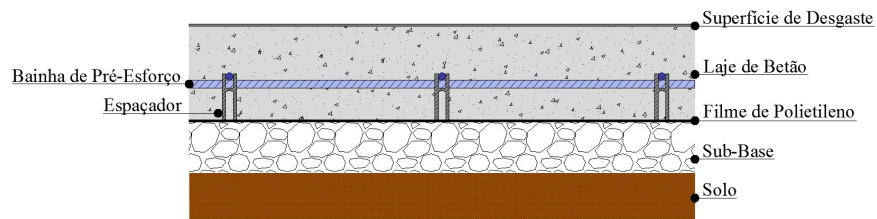


Figura 9 – Esquema ilustrativo de um pavimento de betão pré-esforçado (Adaptado de João, C., 2014)

Apesar das grandes vantagens, este processo de construção apresenta alguns pontos menos favoráveis em relação ao processo construtivo dos pavimentos anteriormente

enunciados. A necessidade de um maior controle na execução dos trabalhos, uma maior capacidade técnica na sua execução, por se tratar de um processo mais complexo, e por ser um sistema de construção muito dispendioso, são pontos menos positivos que levam os donos de obra recusar muitas vezes esta solução construtiva (João, C., 2014).

Pavimentos de Betão Reforçados com Fibra

Tal como o nome indica estes pavimentos são constituídos por uma mistura de betão com fibras dispersas aleatoriamente. As vantagens de utilizar fibras no betão, nomeadamente nos pavimentos industriais são variadas. A que se destaca é o seu desempenho positivo no controlo de fendilhação, pois as fibras interseam as fissuras e permitem a transmissão de esforços entre as suas extremidades, o que impede a concentração de tensões e, assim, a redução do índice de fissuração dos pavimentos (Passos, M., 2011). Outras vantagens que se destacam são a maior resistência à tração e à flexão e um aumento da resistência à fadiga e a ações de impacto, resultando num material com elevada ductilidade. Estas características permitem diminuir a espessura dos pavimentos, aumentar o ciclo de vida dos mesmos, diminuir o número de juntas necessárias, reduzir a mão-de-obra, pois suprime-se a colocação de armaduras e, conseqüentemente facilita o processo de betonagem, aumentando o espaço de estaleiro. Apesar deste tipo de pavimentos apresentar muitas vantagens é importante um adequado controlo na execução pois, é fundamental uma distribuição homogênea das fibras no betão para que as lajes também fiquem com uma constituição regular, como a **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** sugere (João, C., 2014).

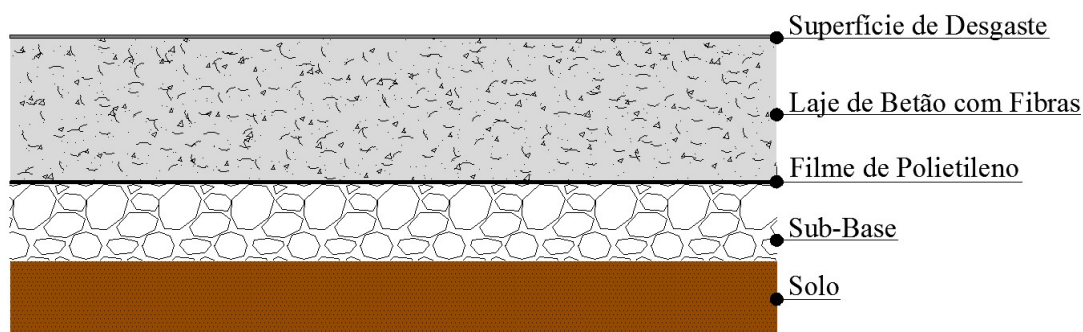


Figura 10 – Esquema ilustrativo de um pavimento de betão com fibras
(Adaptado de João, C., 2014)

2.4. Ações

Um aspecto fundamental quando se está a dimensionar pavimentos industriais são as ações a considerar, que variam de estrutura para estrutura conforme as solicitações a que estão sujeitas. Os pavimentos industriais são fundamentalmente dimensionados tendo em conta o peso próprio da estrutura, as sobrecargas (ações diretas) e as variações de temperatura e humidade (ações indiretas). É imprescindível uma correta consideração destas ações em fase de projeto (João, C., 2014). Na Figura 11 são indicadas as ações a considerar.

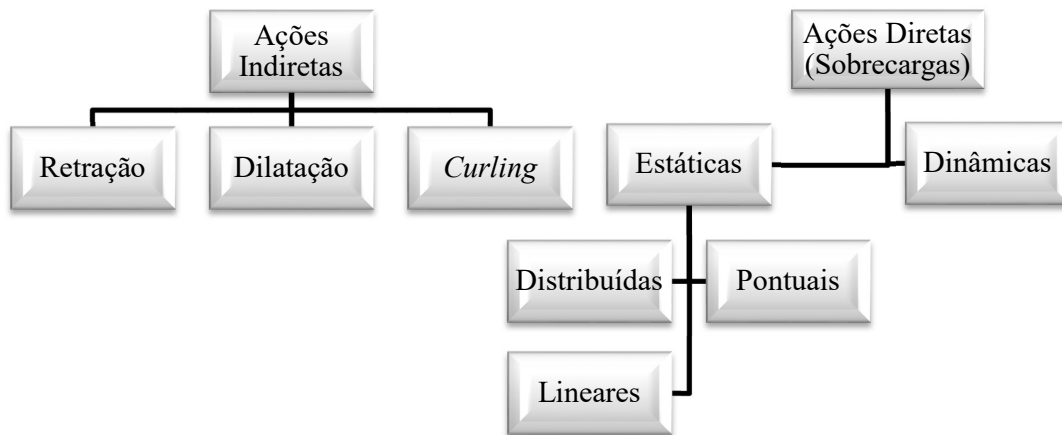


Figura 11 - Ações a considerar no dimensionamento de um pavimento industrial

As ações indiretas estão associadas ao comportamento dos materiais utilizados e, embora tenham uma grande importância, não são consideradas no cálculo estrutural. Por esta razão devem ser criteriosamente escolhidos e especificados os materiais a utilizar, o sistema de pavimentação, deve ser prevista uma adequada implantação de juntas atendendo à sua tipologia e quantidade, e ao seu devido controlo. Por fim, e não menos importante, deve ser executado um processo de cura adequado, de modo a que ocorra um correto processo de hidratação do cimento no betão. Todos estes aspetos diminuem as tensões internas no betão que provocam situações de retração, dilatação e *curling* no betão. A temperatura e a humidade são fatores que têm uma grande influência neste tipo de estruturas, portanto é importante garantir que os pavimentos tenham a capacidade para resistir aos esforços gerados por estes fatores (Cristelli, R., 2010).

As ações diretas (sobrecargas) são diretamente aplicadas à estrutura, fruto das operações desenvolvidas na mesma. Desta maneira é de extrema importância conhecer como se vão

proceder as várias atividades dentro da área industrial e saber classificar cada ação para que a estrutura seja corretamente dimensionada (Cristelli, R., 2010). Deste modo as ações diretas podem ser estáticas ou dinâmicas. As ações estáticas são provocadas por carregamentos imóveis como é o caso de prateleiras de armazenamento, maquinaria industrial ou outros elementos fixos. Deve-se ter o cuidado de considerar, em fase de projeto, linhas dinâmicas de produção e possíveis mudanças de disposição em função de novos equipamentos. Cada carregamento estático ainda deve ser classificado quanto à sua configuração de transmissão de esforços ao pavimento, podendo ser linear, distribuído ou pontual (ver Figura 12) (João, C., 2014).



a) Estrutura de estantes apoiadas sobre carris – carga linear (<https://www.mecalux.pt/estantes-paletizacao/estantes-paletizacao-compacta>)



b) *Mezzanines* – cargas pontuais (<http://www.luxuryflatsinlondon.com/2004/ideas/mezzanines-manufacturers/>)

Figura 12 – Tipos de cargas estáticas

As ações dinâmicas, nos pavimentos industriais, são constituídas pela operação dos veículos e vibrações provenientes de maquinaria industrial. Como tal, é necessário conhecer o tipo de veículos/máquinas que operam em cada situação em particular (exemplo: distância entre eixos, peso total do veículo incluindo a sua carga máxima) pois, normalmente são ações de curta duração mas de elevada frequência. Tais ações levam a um grande desgaste dos materiais por fadiga e por essa razão deve ser feita uma criteriosa escolha de materiais e sistema de pavimento a implantar, para que seja garantida a durabilidade do pavimento e a operacionalidade. Por exemplo os empilhadores, que são as máquinas que mais operam dentro dos armazéns, são bastante sensíveis a inclinações e a irregularidades no pavimento o que leva a uma diminuição da velocidade das operações e assim a redução a produtividade do trabalho (João, C., 2014).

2.5. Patologias Recorrentes

É primordial conhecer as principais patologias a que os pavimentos estão vulneráveis e ainda mais importante, conhecer as suas causas para que estas problemáticas sejam precavidas. A origem destas patologias é de erros, tanto de dimensionamento/conceção, como de execução e/ou de um inadequado uso do pavimento. Na Tabela 1 são descritas as principais patologias bem como as causas/origens mais comuns.

No entanto, quando não é possível uma prevenção atempada, deve se recorrer à reabilitação que, na maioria das vezes por uma questão financeira, passa pela conceção de uma nova camada desligada da existente (Passos, M., 2011).

Tabela 1 – Patologias em pavimentos industriais (ArcelorMittal, 2014)

<i>Patologia</i>	<i>Causa</i>
Betão não consegue ser bombeado	<ul style="list-style-type: none"> • Incorreta dosagem da composição: quantidade de finos menores de 0,2 mm é insuficiente (< 450kg/m³); • Segregação do betão durante o transporte; • Redução do diâmetro da mangueira de bombagem; • Variação do tempo de presa do betão; • <i>Slump</i> do betão inconsistente; • Uso excessivo de superplastificastes.
Desgaste das extremidades	<ul style="list-style-type: none"> • Incorreta composição do betão utilizado; • Acabamento tardio das extremidades.
Fissuras resultantes de assentamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Má conceção/dimensionamento da base/sub-base; • Humidade do solo; • Coeficiente de permeabilidade baixo; • Compactação insuficiente; • Solo expansivo.
Fissuras resultantes de cargas excessivas	<ul style="list-style-type: none"> • Deficiente dimensionamento (não consideração das cargas previstas); • Instalação precoce de estantes/maquinaria; • Utilização do pavimento para estaleiro da construção.
Delaminação superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Doses incorretas de superplastificaste; • Água de exsudação não evaporada; • Excesso de ar no betão; • Incorreta técnica de acabamento superficial do pavimento.
Planos de fragilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Betonagem descontínua (interrupção em planta);

<i>Patologia</i>	<i>Causa</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • Trabalhadores inexperientes/deficiente programação de trabalhos.
Juntas danificadas	<ul style="list-style-type: none"> • Implantação de inadequado tipo de junta; • Ausência de dispositivos de transferência de carga entre placas; • Espaço excessivo entre juntas; • Acabamento deficiente das bordas das juntas; • Juntas em zonas de tráfego intenso; • Ausência de selante.
Fissuração	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecargas na superfície; • Cura incorreta (secagem do betão antes de obter resistência); • Choques térmicos e/ou ciclos de secagem e humificação nas primeiras idades.
Desgaste Superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Incorreta composição do betão utilizado; • Água de exsudação excessiva; • Endurecimento muito lento do betão; • Gases de escape.
Aparecimento de fibras à superfície	<ul style="list-style-type: none"> • Passagem do helicóptero demasiado cedo; • Dimensão dos agregados excessivamente grande quando comparada com o espaçamento entre fibras; • Incorreta composição do betão utilizado; • Fibras demasiado compridas e/ou demasiado flexíveis.

3. *Curling*

3.1. Introdução

O ACI 302.1R (2015) define o *curling* como uma distorção de um elemento originalmente linear ou plano num elemento de forma curva, tal como o *warping* de uma laje, devido à fluência ou a gradientes de temperatura/humidade em zonas adjacentes às suas faces opostas.

É bem conhecido que as lajes de betão tendem a perder o seu nivelamento ao longo do tempo, deformando-se (Nassiri, S., 2011). Essa deformação, denominada de *curling/warping* pela terminologia inglesa, deve-se à combinação de cinco fatores não lineares: i) o gradiente de temperatura do pavimento; ii) o gradiente de temperatura ambiente; iii) o gradiente de humidade do pavimento; iv) a retração diferencial irreversível; e v) a fluência (Rao, S. e Roesler, J., 2005). Seguidamente apresenta-se de que forma é que cada um destes componentes influenciam o *curling* nos pavimentos.

Estes gradientes, ao longo da espessura da laje, introduzem esforços adicionais no pavimento, já que o movimento é restringido pelo peso próprio da laje. A Figura 13 esquematiza as forças presentes que ocorrem logo nas primeiras idades do betão (Rodrigues, J., 2011).

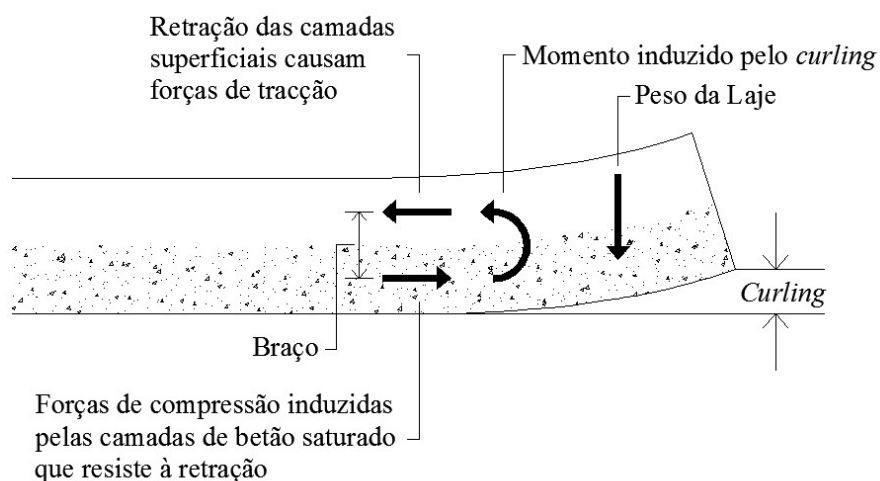


Figura 13 – Esquema adaptado da retração em pavimentos industriais (CCAA, 2006)

i) Gradiente de temperatura de construção

Um dos fatores que dá origem ao fenômeno de *curling* é o gradiente de temperatura de construção que, tal como o nome indica, é induzido nos pavimentos aquando a sua construção. Deste modo, um gradiente de temperatura nulo não corresponde necessariamente a um pavimento plano, ao contrário do que se pensava até os anos 80. A verdade é que o gradiente de temperatura num pavimento é nulo apenas no instante em que está a ser colocado, mas na maioria dos casos quando o betão endurece já tem um gradiente de temperatura introduzido no pavimento (Rao, S. e Roesler, J., 2005). Isto acontece porque, na generalidade, os pavimentos de betão são realizados durante o dia e nos meses mais quentes. Assim, a temperatura no topo do pavimento vai aumentar a uma velocidade superior face à parte inferior do betão, desenvolvendo um gradiente térmico de construção. Como o betão ainda está húmido, e em processo de endurecimento, não apresenta muita resistência estrutural. Como tal, não se vai deformar, como é de esperar quando um gradiente de temperatura se desenvolve. Desta forma o pavimento apresenta um gradiente de temperatura precoce e qualquer mudança climática leva ao desenvolvimento de *curling* (Hiller, J., 2011).

ii) Gradiente de temperatura

Como foi explicado anteriormente, um gradiente de temperatura é desenvolvido nos primeiros momentos da existência de um pavimento (gradiente de temperatura de construção do pavimento), apesar do pavimento permanecer plano. Se a temperatura à qual o pavimento é exposto se altera, este reage, deformando-se. É muito usual que o topo da laje esteja sujeito a flutuações de temperatura superiores às da sua base, pelo simples fato do topo estar mais exposto às variações diárias de temperatura do que a sua base. A temperatura do ar, a radiação solar, a nebulosidade e a precipitação afetam diretamente os gradientes de temperatura nos pavimentos de betão (Hiller, J., 2011). Durante o dia, a parte superior do pavimento de betão está tipicamente mais quente, enquanto a parte inferior está mais fria. Desta forma, cria-se um gradiente positivo. Contrariamente, à noite verifica-se o oposto, a parte superior encontra-se mais fria do que a parte inferior, levando ao desenvolvimento de um gradiente negativo. Estas diferenças nos gradientes de temperatura que se vão verificando ao longo do dia, desenvolvem diferentes tensões ao longo da espessura do pavimento, levando a que ocorra o chamado *curling* (Rao, S. e Roesler, J., 2005).



a) *Curling* resultante de uma superfície mais fria e seca do que a base (*upward curling*)

b) *Curling* resultante de uma superfície mais quente e húmida do que a base (*downward curling*)

Figura 14 – *Curling* em pavimentos

Analisando a figura acima representada podem-se fazer alguns reparos. A Figura 14 a), que representa um pavimento com um gradiente negativo tem os limites do pavimento com tendência a curvar para cima. Desta forma os limites do pavimento perdem o contacto com a sub-base enquanto o centro continua apoiado. Por outro lado, a Figura 14 b) que corresponde à representação do pavimento com um gradiente positivo onde os limites da laje tendem a curvar para baixo, e por sua vez fazem pressão para a sub-base, tem tendência a formar um vazio no centro do pavimento (Hiller, J., 2011). Desta forma, quando estes pavimentos são submetidos a cargas, nas zonas de transição entre o pavimento apoiado e o pavimento não apoiado, têm tendência a criar um plano de fissuração ao longo desse limite, devido às tensões geradas como a Figura 15 ilustra.

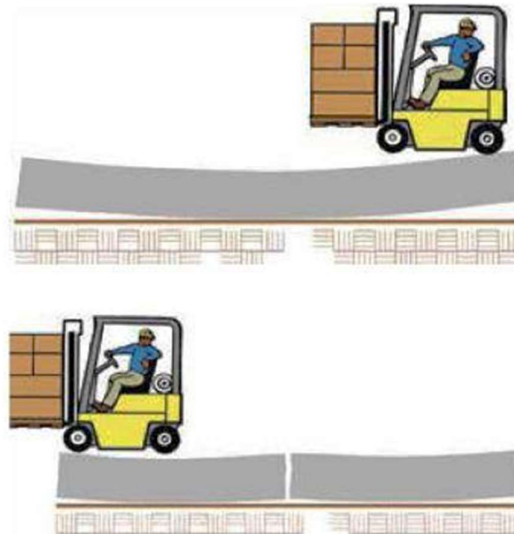


Figura 15 – Fissura causada pela combinação de *curling* e das cargas a que o pavimento é sujeito

iii) *Gradiente de humidade*

As flutuações de humidade entre o topo e a base da laje dos pavimentos causam efeitos similares aos gradientes de temperatura. O betão retrai à medida que a humidade interna diminui do topo da laje até à base (gradiente de humidade positivo), e expande quando a humidade interna aumenta (gradiente de humidade negativo). Um gradiente de humidade

positivo é mais usual neste tipo de pavimentos (Granja, J., *et al.*, 2011). A diminuição da humidade interna do betão deve-se às trocas com o meio ambiente (evaporação) e/ou à auto-dissecação (hidratação das partículas de cimento), onde a camada superior da laje está mais vulnerável a essa perda, enquanto a base da laje se encontra húmida, devido a fatores como a fraca drenagem da base do pavimento, à adoção de sub-bases permeáveis ou simplesmente, por a base da laje não estar tão exposta a variações de humidade como o seu topo. Desta forma desenvolvem-se tensões que levam ao desenvolvimento do *curling* (Rao, S. e Roesler, J., 2005).

iv) Retração diferencial irreversível

A retração por secagem é definida como uma redução no volume do betão devido à perda de água durante a cura do betão. Deste modo, a camada superior da laje está mais suscetível à ocorrência deste tipo de retração nas primeiras idades pois o volume de perda de água é bastante superior quanto comparado com a base da laje, devido ao fraco processo de cura do betão. Estas condições proporcionam diferenças irreversíveis de retração entre o topo e a base da laje que conduzem a tensões devido à retração igualmente irreversível, causando o *curling* da laje (Rao, S. e Roesler, J., 2005).

v) Fluência

A fluência é o aumento de uma deformação com o tempo sob a ação de cargas permanentes. Num pavimento com *curling*, as tensões criadas quando a laje está restringida tanto pelos limites como pelas lajes adjacentes, bem como o efeito do peso próprio resulta em fluência, especialmente nas primeiras idades, quando o betão está a ganhar resistência. Desta forma, a fluência pode diminuir as tensões de retração do betão, conduzindo à diminuição do *curling* quando o pavimento tem tendência a curvar para cima (*upward curling* - gradiente positivo). De outro modo, agrava a situação de *curling* na laje (CCAA, 2006).

3.2. Efeitos do *curling*

Quando um pavimento tende a levantar devido ao *curling* (situação mais usual), os limites tendem a comportar-se como uma consola, uma vez que perdem o suporte inferior. As cargas aplicadas nestas estruturas, assim como o peso próprio, restringem o *upward*

curling, sendo criadas tensões internas que, se passarem a resistência do betão, podem criar fendilhação. Portanto, a fendilhação é um dos efeitos diretamente relacionado ao *curling* (Fortin, C., 2005). Outro efeito é a falta de nivelamento do pavimento. Inevitavelmente quando o *curling* se manifesta num pavimento, este perde a sua regularidade. No entanto, as diferentes cargas aplicadas nos vários painéis de laje levam a que o *curling* se manifeste de forma igualmente diferente, o que conduz a que as diferenças de altura dos painéis sejam denotadas ao longo das juntas. Estes efeitos do *curling* causam grandes desvantagens aos utilizadores como comprometem a durabilidade do betão (Cristelli, R., 2010). A operação de máquinas, como é exemplo dos empilhadores, é comprometida pela falta de regularidade do pavimento. Estes equipamentos de precisão são bastante sensíveis a estas deformações e a sua calibração pode ser muito cara, assim como, a troca dos pneus fruto do desgaste precoce provocado por estas deformações no pavimento (João, C., 2014).

3.3. Fatores de Influenciam o *curling*

Os fatores que influenciam o desenvolvimento do *curling* são aqueles que estão associados à mudança dimensional do betão. A humidade é perdida uniformemente pelo topo e pela base da laje e a temperatura desta também é uniforme, deste modo os gradientes de humidade e temperatura não se desenvolvem. Esta seria a situação ideal para que o *curling* não se desenvolvesse. Como na prática isto é bastante difícil de atingir, seguidamente serão discutidos alguns componentes que influenciam o desenvolvimento do *curling* e de que forma, pois a prevenção é preferível face à reparação (CCAA, 2006).

Aditivos no betão

A composição do betão utilizado tem, indiscutivelmente, uma grande influência no desenvolvimento de *curling* nos pavimentos. O uso de redutores de retração ou mesmo betão de retração compensada na composição do betão ajuda a reduzir bastante o desenvolvimento de *curling*. Também se pode substituir parte do cimento por cinzas volantes para assim diminuir o calor gerado pela hidratação do cimento e diminuir a ocorrência de gradientes térmicos (Mailvaganam, N., 2000).

Relação Água/Cimento

Comparando a influência que a relação água/cimento (a/c) tem numa pasta de cimento com a que tem no betão, esta última é menos significativa. Foi mostrado que para um volume

constante de pasta, a retração não é afetada de uma forma significativa pela redução a/c ($a/c = 0.34$ para 0.65), ao contrário do que é frequentemente assumido (Bissonnette, B., 1996).

Agregados

Este é um dos parâmetros que mais influencia a retração e por sua vez o *curling*. Os agregados restringem a contração da pasta de cimento que afetam a retração do betão. Quanto mais rígidos são os agregados, menor é a magnitude da retração. Alguns estudos mostram que a retração pode ser três vezes maior com agregados mais macios (Bissonnette, B., 1996). O tamanho máximo do agregado não tem grande influência, mas o uso de uma granulometria extensa tem resultados na diminuição da retração (Neville, A., 2000).

Espessura da Laje/Peso Próprio da Laje

A espessura do pavimento é um fator determinante no dimensionamento de um pavimento. Uma vez que o fenómeno do *curling* está muito associado ao peso da laje. Deste modo, quanto menor é a altura da laje, menor é o peso próprio, aumentando assim a tendência ao *curling*. Uma redução de 50% no *curling* nos limites das lajes é verificada aumentando a altura da laje de 150 mm para 200 mm (CCAA, 2006). As lajes mais finas, especialmente os topos, são mais suscetíveis à retração. Para lajes não ligadas às camadas adjacentes é necessário estabelecer uma altura mínima para controlo do *curling*, e como tal é recomendado pelo ACI 302.1R (2015) uma altura mínima de 75 mm e um aumento do número de juntas.

Espessura dos Limites da Laje

O aumento da espessura junto aos limites nas juntas de construção é uma das soluções propostas, pois contribui para um aumento de peso e também reduz a área exposta à secagem do betão. Ambos ajudam a reduzir o *upward curling*. O guia de dimensionamento de lajes térreas ACI 302.1R (2015) recomenda um aumento de espessura de 50% com um declive de 5%. No entanto outros autores têm uma opinião diferente, pois referem que este método não é economicamente viável face aos benefícios que possa trazer em relação ao *curling*. Por essa razão é uma solução que tem de ser avaliada em cada caso (Suprenant, B., 2002).

Geometria da Estrutura

Um fator importante na retração é a relação entre a área exposta ao meio envolvente e o volume da laje. Por exemplo, quando a área exposta é muito elevada a perda de água para o ambiente dá-se de uma forma mais rápida, comparando com uma área de superfície menor.

Ora, se a retração está diretamente ligada à perda de água, e este tipo de estrutura está mais suscetível a tal, é intuitivo pensar que este tipo de estruturas sofre mais com a retração do betão (Mailvaganam, N., 2000). A execução de placas cada vez maiores (e juntas cada vez mais espaçadas) e com menores espessuras (pavimentos mais esbeltos), fazem com que estas estruturas sejam cada vez mais suscetíveis à ocorrência da retração e *curling* (Fortin, C., 2005).

Reforço

O reforço do pavimento é outra solução proposta pela ACI 302.1R (2015). A percentagem de armadura sugerida para os pavimentos é de 1%, diminuindo cerca de 60% a 80% do *curling* como a tabela abaixo sugere, tendo em atenção que o reforço deve ser perpendicular aos limites do pavimento e localizado a 1/3 do topo deste, pois é onde a retração se pronuncia mais. Em lajes não estruturais, a quantidade de armadura utilizada é muito reduzida e deste modo não tem grande influência no controlo dimensional das lajes. Deste modo, as malhas convencionais não farão grande diferença no que toca ao controlo/diminuição do *curling* (Suprenant, B., 2002).

Tabela 2 – Efeitos da quantidade de reforço no *curling* (Adaptada de Suprenant, B., 2002)

<i>Reforço (%)</i>	<i>Redução na deflexão de curling</i>
0.46	30%
0.92	60%
1.38	100%
1.74	Deflexão negativa (direção oposta)

Pré-Esforço

O pré-esforço pode ser usado nestes casos com grandes benefícios, pois este introduz momentos no pavimento, opostos aos momentos criados pelo *curling*. Deste modo o pré-esforço permite reduzir ou mesmo eliminar o problema do *curling* nos pavimentos (Cristelli, R., 2010).

Sub-Base/Solo de Base

A sub-base ou mesmo o solo de base pode influenciar o *curling*. Deste modo, o material de suporte estando húmido leva à criação de um ambiente húmido, que previne que a base da laje seque, criando condições para que o betão expanda em vez de retrair (Passos, M., 2011). Assim, por exemplo, a expansão da base da laje e a retração do topo desta, leva a um aumento do momento de *curling* e, conseqüentemente, deflexão. Deste modo, quando o

pavimento está localizado perto de lençóis de água devem ser previstas membranas para que a água não seja transferida para a laje, ou mesmo o rebaixamento do nível freático (João, C., 2014).

Membrana Plástica

Barreiras de vapor, impermeabilizações ou qualquer tipo de membrana plástica previne a troca da água entre a laje e o material de suporte ou vice-versa. Tal solução promove um ambiente húmido quando o betão é colocado, contrariamente ao ambiente a que a superfície do pavimento é exposto, promovendo assim a ocorrência de *curling* (Ytterberg, R., 1993).

Espaçamento das Juntas

O espaçamento de juntas deverá ser, aproximadamente, trinta vezes a altura da laje. Quanto menores os painéis, menor é a tendência à ocorrência de *curling*. Mais importante do que a quantidade de juntas é o detalhe da sua construção. Elementos como barras de transferência (ferrolhos), imbricamento entre agregados, ou outro método que implique a transferência de cargas de um painel para o outro, ajuda a minimizar o *curling*, restringido o movimento (Passos, M., 2011).

Cura

A cura é benéfica quando a humidade necessária é mantida no betão e isso minimiza e/ou adia a retração. O objetivo principal da cura é ajudar o betão a desenvolver a resistência adequada para resistir aos esforços induzidos pela retração. Deste modo a cura não tem efeitos diretos no que toca ao *curling* (pois a retração ocorre mais cedo ou mais tarde), mas sim nas propriedades mecânicas do betão sensíveis ao *curling* e na durabilidade. O uso de membranas de cura, a cobertura com tecidos/mantas húmidas, a molha constante, são alguns dos métodos para que seja realizada uma correta cura do betão (Ytterberg, R., 1993).

3.4. Medidas de prevenção/reparação

Atualmente não existem soluções no mercado que permitam eliminar este fenómeno, apenas recomendações para reduzir o risco de *curling* e algumas técnicas utilizadas para a reparação desta patologia (ACI 302.1R, 2015). As recomendações existentes estão na sua grande maioria relacionadas com o betão e com a construção do pavimento: equilíbrio do teor em humidade e da temperatura na face inferior e superior do pavimento; utilização de

betões com agregados de maiores diâmetros e com granulometria extensa e menores relações água/cimento, sem afetar a sua trabalhabilidade; uso de sub-bases permeáveis; uso de adjuvantes para redução e compensação de retração; uso de maiores percentagens de armadura no terço superior da laje; e uso de pós-tensão.

Em pavimentos não aderentes a utilização de uma camada de separação impermeável na interface aumenta o risco do *curling*, resultante do aumento de humidade na face inferior da laje. Em pavimentos térreos para reduzir a humidade na base do pavimento, e de acordo com as prescrições do ACI 302.1R (2015), deve ser colocado sobre essa interface uma camada de areia com uma espessura de 75 mm. No entanto, de acordo com Robert Ytterberg (1992) esta solução é de difícil implementação devido ao risco de deslocamento durante a execução do novo pavimento. Este autor recomenda, em alternativa, o uso de uma camada composta por folha de plástico mais 150 mm de brita e uma camada de areia com 12.5 mm ou em alternativa a utilização de uma folha de polietileno (ou manta de neoprene) com aberturas que permitam a drenagem do pavimento.

Outra medida preventiva que pode ser utilizada consiste na alteração da geometria do pavimento em zona de juntas através do aumento localizado da espessura do pavimento, de forma a garantir nestas zonas um acréscimo de peso para contrariar as tensões de flexão induzidas pelo *curling* (ver Figura 16). Esta medida é no entanto de difícil execução e exige um maior volume de escavação e maiores cuidados na preparação da sub-base.

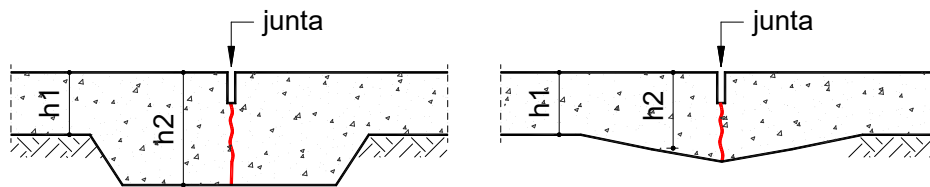
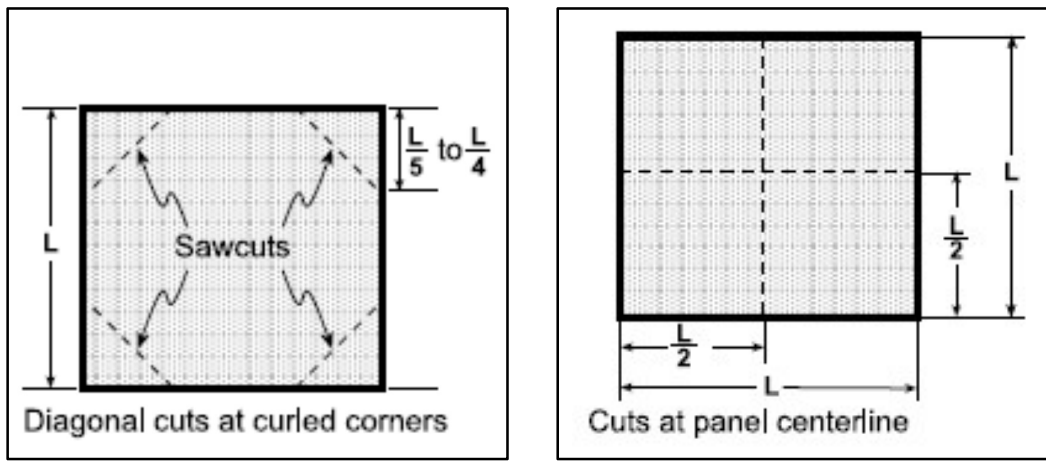


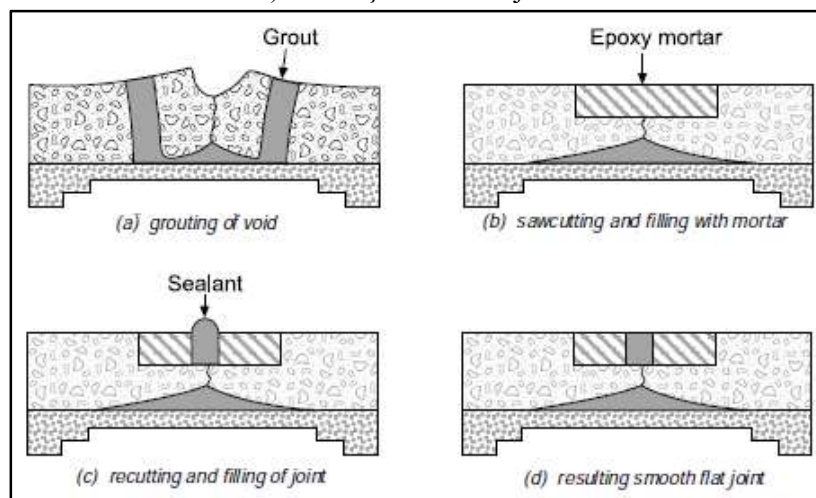
Figura 16 – Alteração da geometria do pavimento com o aumento localizado da espessura

A reparação de pavimentos com patologias associadas ao *curling* pode ser realizada por corte de novas juntas, reparação da junta e colocação de cilindros metálicos nas zonas das juntas existentes.

Uma das técnicas utilizadas consiste na execução de novas juntas com cortes diagonais nos cantos ou nas zonas centrais do pavimento, de modo a contrariar as tensões resultantes do *curling* (ver Figura 17 a). Em situações com maior degradação procede-se à retificação da superfície na zona afetada e injeção de calda de cimento na zona das juntas (ver Figura 17 b) (Mailvaganam, N., 2000).



a) Execução de novas juntas



b) Reparação da junta

Figura 17 – Técnicas de reparação do *curling*: execução de novas juntas e reparação de juntas

A reparação do *curling* pode também ser efetuada através da aplicação de cilindros metálicos, em furos previamente executados nas zonas de juntas por carotagem, que após aperto permitem restituir a transferência de carga (ver Figura 18). Estes cilindros são comercializados pela empresa CoGri Group (CG Flooring Systems) com a designação comercial CoGri Joint Stabilizer.

Por outro lado a utilização de conetores de transferência de carga nas juntas de construção não impede a deformação dos pavimentos por efeito do *curling*.

As soluções apresentadas exigem o condicionamento e em muitas situações o encerramento do espaço a reabilitar, representando custos elevados para o sector industrial e comercial.



a) Cilindros



b) Carotagem do pavimento



c) Aperto dos conetores



d) Reabilitação concluída

Figura 18 – Técnicas de reparação do *curling*: colocação de cilindros estabilizadores de juntas

3.5. Trabalhos de Referência

Nesta secção são apresentados os principais trabalhos realizados para o estudo do fenómeno do *curling*, com especial referencia para a geometria dos modelos e os parâmetros avaliados em cada estudo.

Ramseyer, C. et al. (2012)

O trabalho desenvolvido por Ramseyer, C. et al. (2012) teve como principal objetivo estudar o efeito da retração no *curling*. Para atingir os objetivos definidos os autores fabricaram 15 lajes com dimensões em planta de 0.92×6.10 m² e uma espessura de 7.5 cm, assentes numa sub-base de areia húmida, com 10.0 cm de espessura, colocada diretamente sobre o solo. As variáveis estudadas foram: a humidade relativa e temperatura interna do betão (leituras na secção em 5 profundidades diferentes com incrementos de 1.25 cm), humidade relativa e temperatura ambiente, *curling*, abertura das juntas e observação visual de fendilhação.

A base das lajes foi sujeita à humidade do solo (humidade relativa de 100%), a parte superior sujeita a condições ambientais controladas e exposta a humidades relativas de 30% e 60%, de modo a criar um gradiente de humidade, e a temperatura de 21 °C. Em cada laje foi adotada uma percentagem mínima de mínima para controlo da retração a 0.15%. Para impedir o movimento da laje devido à retração/expansão foram colocadas treliças metálicas nas extremidades das lajes e executadas juntas serradas a uma distância de 1,5 m de cada extremidade (Figura 19). Os autores consideraram lajes com cinco composições de betão diferentes, utilizando misturas com redutores de retração, utilização de betão de alto desempenho e betão de retração compensada.

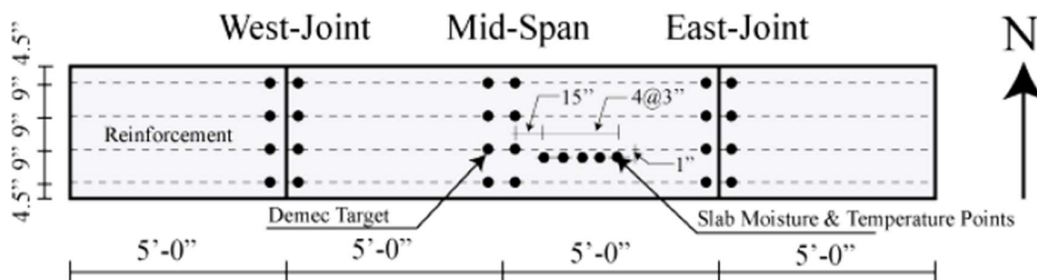


Figura 19 – Geometria dos modelos e instrumentação adotados por Ramseyer, C., et al., 2012

As principais conclusões deste estudo foram as seguintes: i) a perda de humidade é mais significativa na superfície das lajes, mais especificamente até aos 4-5 cm de profundidade, sendo insignificante a variação na restante espessura; ii) as lajes de betão de alto desempenho apresentaram uma retração mais evidente (maior gradiente de humidade) e uma maior sensibilidade ao *curling*; e iii) as lajes com misturas de retração compensada mostraram ser muito estáveis, não apresentando *curling*, pouca ou nenhuma retração ou fendilhação. Estas conclusões são ilustradas nos gráficos apresentados da Figura 20.

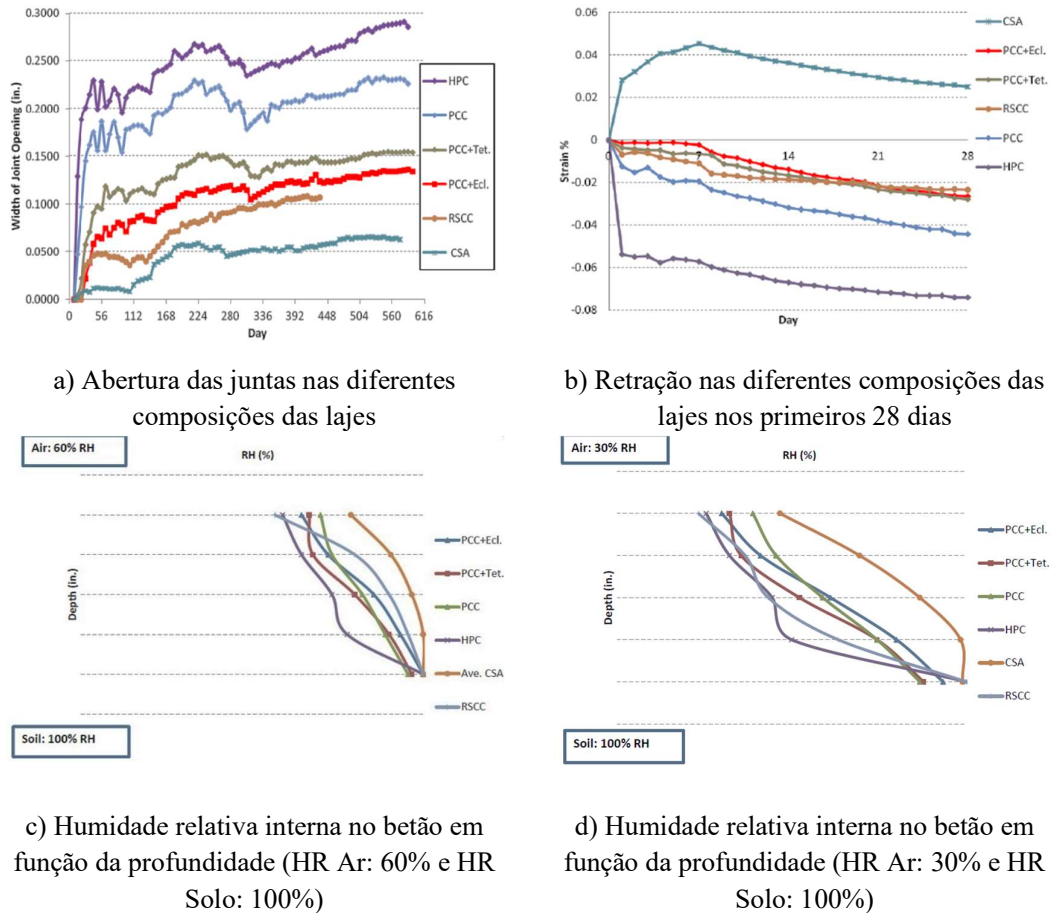


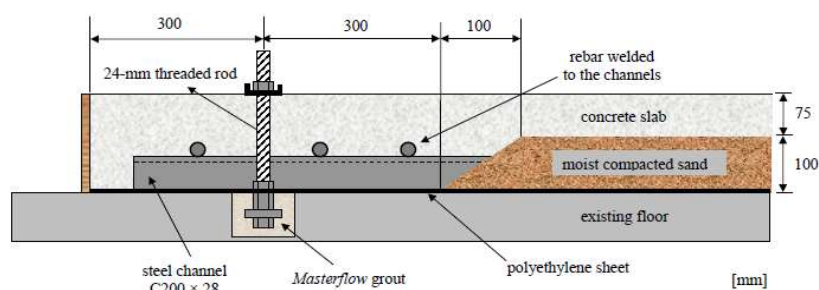
Figura 20 – Resultados nas lajes de composições diferentes (Ramseyer, C., *et al.*, 2012)

Fortin, C., (2005)

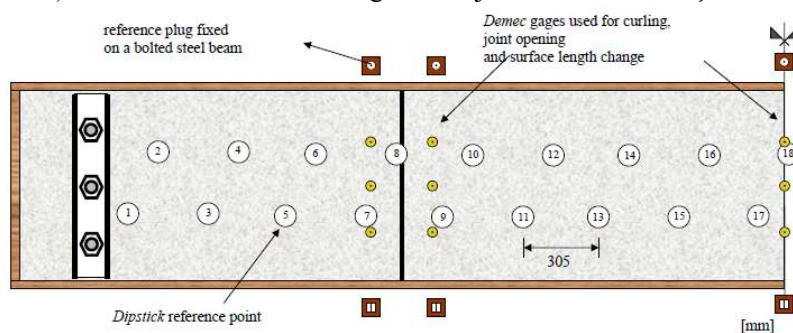
O trabalho desenvolvido por Fortin, C. (2005) teve como principal objetivo relacionar o *curling* com a abertura de juntas. Para atingir tal objetivo foram fabricadas 12 lajes com 8 composições de betão e diferentes tipos de reforço. Os autores adotaram betão normal, betão com redutores de retração e betão auto-compactável. A armadura utilizada nas diferentes lajes consistiu em malhas eletrossoldadas, utilização de fibras de polipropileno, utilização

de fibras híbridas (aço e polipropileno) e ainda três lajes com betão simples. Foram adotadas lajes com dimensões em planta de $1.0 \times 6.0 \text{ m}^2$ e 7.5 cm de espessura, assentes numa sub-base composta por areia húmida compactada, de 10 cm de espessura, e um filme plástico na interface areia / solo. Foram executadas juntas serradas a 1.5 m das extremidades da laje de modo a garantir um vão central de 3.0 m.

Neste trabalho os fenómenos estudados foram o *curling*, o movimento das juntas, a retração e a fluência. A Figura 21 ilustra a geometria dos modelos e a instrumentação adotada. As medições foram realizadas em intervalos regulares durante 12 meses, num ambiente controlado com 30% de humidade relativa e temperatura de 23 °C. Após os 12 meses foi colocada uma carga de 250 kg e foi medido o movimento vertical das lajes.



a) Detalhe da zona de ancoragem da laje e da sua constituição

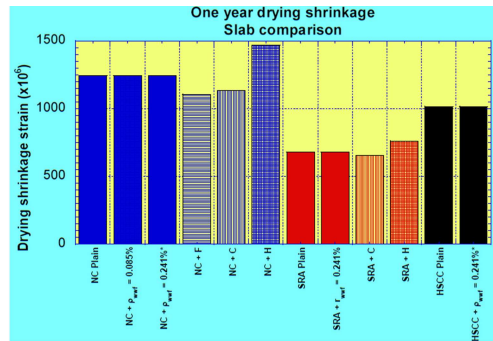


b) Instrumentação adotada para avaliação do *curling*

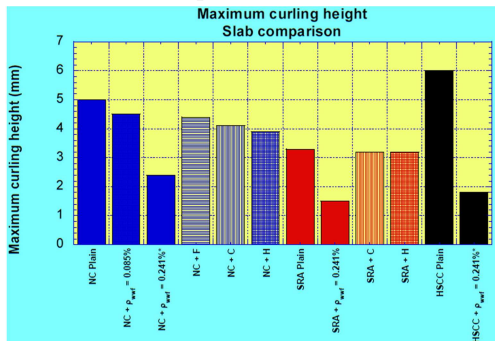
Figura 21 – Modelos e instrumentação utilizados por Fortin, C., 2005

As principais conclusões deste estudo são bastante extensas, mas de uma forma resumida os autores concluíram que o *curling* ocorre nas primeiras idades do betão e há uma relação proporcional entre o *curling* e a retração. Os resultados obtidos nas lajes com betão simples demonstraram que 7 dias após a betonagem já tinha ocorrido 40% do *curling* e 28 dias depois aproximadamente 70%. Os valores de retração seguiram um padrão similar. Outra conclusão deste estudo foi que dependendo das condições de humidade a que as lajes estão expostas, o comportamento destas em termos de *Curling*, e de abertura de juntas, também varia significativamente. Em algumas lajes verificou-se que o *curling* decresceu

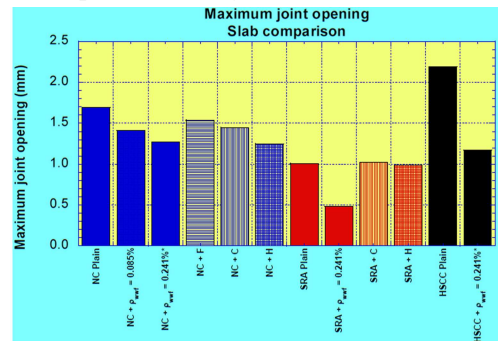
assim que a camada de areia começou a secar. Isto implica que, se um filme plástico é colocado entre a laje e o solo, o *curling* decresce e a as juntas começam a afastar-se desse que o período de cura do betão seja suficiente para o betão secar completamente. Os resultados deste estudo evidenciam igualmente as vantagens que existem no uso de redutores de retração no betão, onde a combinação destes redutores de retração com o reforço convencional conduziu à menor taxa de *curling* e menor abertura de juntas, como os gráficos da Figura 22 sugerem. Por fim, em relação aos tipos de fibras utilizadas, as lajes reforçadas com fibras híbridas (aço e polipropileno) foram as que apresentaram um melhor desempenho na redução de *curling* e na abertura de juntas, e não foi observado nenhum tipo de fissuração nas juntas durante todo o tempo de investigação, ao contrário das lajes reforçadas com malha eletrossoldada.



a) Comparação da retração das diferentes composições de lajes em 365 dias



b) Comparação do *curling* máximo das diferentes composições de lajes em 365 dias



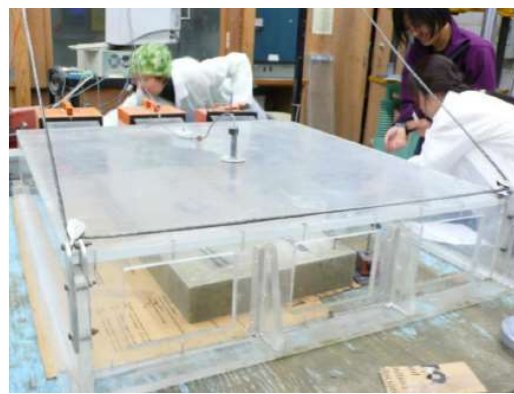
c) Comparação da abertura de juntas das diferentes composições de lajes em 365 dias

Figura 22 – Resultados obtidos no estudo realizado por Fortin, C., (2005)

Banthia, N. et al. (2014)

O trabalho desenvolvido por Banthia, N. et al. (2014) descreve o estudo de lajes de betão submetidas a temperatura e humidade em ambientes controlados. A composição das lajes varia entre um betão normal, considerado como referência, e betão com três percentagens

diferentes de microfibras de celulose (0.1%, 0.2% e 0.3%). Foram ensaiadas 8 lajes (2 de cada composição) com dimensões em planta de 0.50×1.00 m² e 10 cm de espessura colocadas numa sub-base de areia húmida. As condições de temperatura e humidade a que as lajes foram sujeitas foram escolhidas com vista a potenciar a ocorrência de retração e de *curling* nas lajes. Neste contexto as lajes foram expostas a uma temperatura de 47°C e 5% de humidade relativa. Para avaliar o *curling* os autores colocaram 5 extensómetros com uma localização ilustrada na Figura 23 a). A Figura 23 b) ilustra a câmara onde as lajes foram mantidas por um período de 7 dias (tempo de ensaio).



a) Configuração dos extensómetros na laje

b) Laje em ambiente controlado

Figura 23 – Esquema de ensaio e instrumentação adotado por Banthia, N., *et al.*, 2014

As principais conclusões deste trabalho então relacionadas a influência no *curling* das fibras de celulose utilizadas na composição do betão. Pôde verificar-se que os extensómetros junto dos limites das lajes registaram valores de extensões superiores comparativamente aos que se encontravam no centro das lajes, e a adição de fibras permitiu que a laje se deformasse com controlo da fendilhação. Os autores verificaram que quando adicionado um volume de fibras ‘ótimo’, estas não só diminuem o *curling* nas lajes mas também aumentam a capacidade da laje pós fendilhação. O volume ótimo de fibras de celulose encontradas neste estudo foi de 0.3% como se pode observar no gráfico da Figura 24.

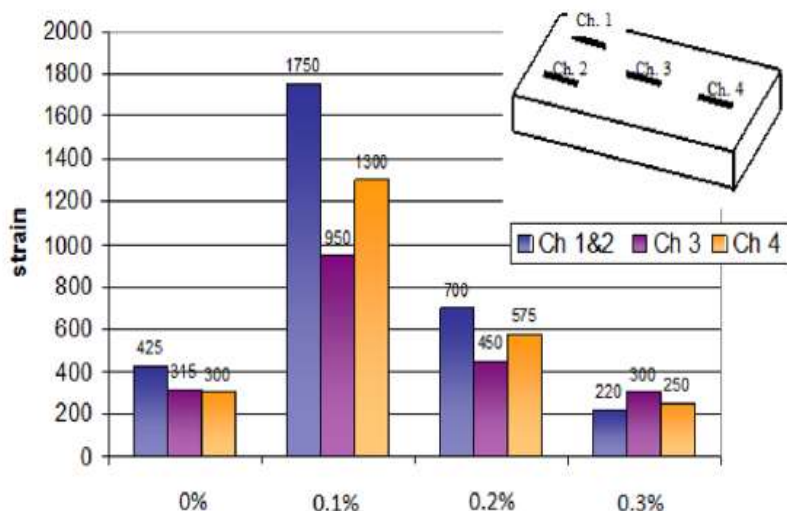


Figura 24 – Extensões observadas em função do volume de fibras utilizado (Banthia, N. et al. (2014))

3.6. Notas finais

Os trabalhos referidos na secção anterior permitiram fornecer informações importantes acerca do fenómeno do *curling*, bem como possibilitaram o fornecimento de dados importantes para definir a geometria dos modelos a utilizar, as variáveis a considerar e ainda, a constituição dos modelos.

Segundo Ramseyer, C., et al. (2012) as principais variáveis que influenciam o *curling* são os gradientes de humidade e temperatura internas que foram manipuladas de modo a maximizar as deformações devido ao *curling*, através de uma sub-base de areia húmida e de um ambiente controlado. Tal como o autor anterior, Fortin, C. (2005) utilizou uma interface entre a laje e o solo constituída por areia húmida e um filme plástico na sua base de modo a conservar a humidade da areia. Banthia, N., et al. (2014) também adotou uma sub-base de areia húmida, contudo destaca-se dos restantes autores pela fixação de um valor de humidade relativa ambiente mais baixo e pouco usual de 5%.

Deste modo, considerando os trabalhos desenvolvidos pelos autores supracitados, verifica-se que as variáveis que mais influenciam este fenómeno são a humidade e temperatura ambientes, os gradientes de humidade e temperatura e a interface laje / sub-base.

4. Programa Experimental. Materiais e Metodologia de Ensaios

4.1. Introdução

A preparação e a idealização do programa experimental baseou-se no estado da arte apresentado no capítulo anterior, em que foram identificados os principais parâmetros que afetam o *curling*.

Com o objetivo de avaliar os parâmetros que influenciam o *curling*, foram fabricadas 8 lajes de betão com fibras metálicas (situação corrente neste tipo de pavimentos), colocadas em dois ambientes diferentes, com o objetivo de avaliar a influência dos gradientes de humidade e de temperatura e a influência da interface entre o solo e a laje do betão em que se consideram duas situações distintas: i) laje assente em filme plástico; e ii) laje assente num camada de areia com 10 cm de espessura.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Betão Armado da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria do Instituto Politécnico de Leiria.

4.2. Planeamento dos Ensaios e Geometria dos Modelos

Na Tabela 3 estão indicadas todos os trabalhos laboratoriais realizados e as respetivas datas de início e fim, iniciando com os trabalhos preparatórios (representados a laranja), passando pelo período de medições (representado a verde) e acabando nos ensaios experimentais normalizados (representados a azul), descritos de forma pormenorizada na secção 4.3.

Foram fabricadas 8 lajes de betão com fibras de aço, com dimensões em planta de $0.56 \times 2.90 \text{ m}^2$ e com uma espessura de 5 cm. As fibras utilizadas foram as HE 75/35 (ArcelorMittal). Foram escolhidas em função da sua capacidade de trabalhabilidade do betão uma vez que o betão utilizado teria de ser autocompactável e da sua forma, que permite uma maior ancoragem das fibras dentro do betão, sendo propícia a sua aplicação em pavimentos industriais. A constituição dos modelos apenas diferia na sub-base adotada: i) 4 das lajes

assentaram sobre uma camada de areia húmida com 10 cm de espessura (lajes do tipo 1 e 3); e ii) as outras 4 sobre um filme plástico (lajes do tipo 2 e 4). A laje com a sub-base de areia húmida tinha como objetivo simular um pavimento onde seriam possíveis as trocas de água da laje com a sub-base, enquanto as lajes com o filme plástico simulariam uma situação onde não é possível a mudança das condições de humidade e temperatura pela sub-base, mas apenas pela superfície da laje, onde a humidade e temperatura ambientes têm uma maior influência.

Tabela 3 – Trabalhos laboratoriais realizados

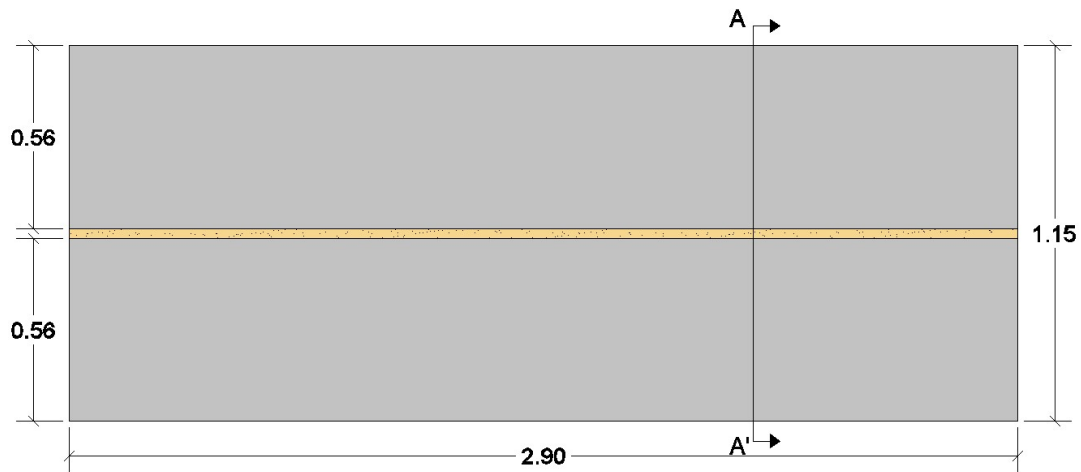
<i>Atividade</i>	<i>Data</i>	7 de Março	11 de Maio	15 de Maio	16 de Maio	17 de Maio	19 de Maio	24 de Maio	31 de Maio	7 de Junho	14 de Junho	29 de Junho	30 de Junho	5 de Julho
<i>Trabalhos Preparatórios</i>														
<i>Medição da Humidade Relativa e Temperatura Internas nas Lajes</i>														
<i>Medição da Humidade Relativa e Temperatura Ambiente</i>														
<i>Medição do Curling das Lajes</i>														
<i>Ensaio de Resistência à Compressão</i>														
<i>Ensaio para obtenção do Módulo de Elasticidade</i>														
<i>Ensaio de Retração</i>														
<i>Ensaio de Resistência à Flexão</i>														
<i>Determinação do tempo de propagação de ultra-sons no betão - Pundit</i>														

Para simular diferentes condições ambientais as lajes foram colocadas em dois ambientes distintos. No piso 0 do laboratório (ligação direta ao exterior) foram colocadas 4 lajes (2 lajes do tipo 1 e 2 lajes do 2) de modo a que o ambiente estivesse sujeito às flutuações típicas que ocorrem durante um dia, uma vez que uma das fachadas do laboratório é constituída maioritariamente por janelas e tendo havido o cuidado de colocar as lajes junto do portão que frequentemente está aberto, de modo a simular o ambiente normal de um recinto industrial. No piso -1 (cave) colocaram-se as outras 4 lajes (2 lajes do tipo 1 e 2 lajes do 2). O ambiente do piso -1 é totalmente diferente, uma vez que é um piso enterrado, onde a temperatura e humidade ambientes são bastante constantes, mantendo-se uma temperatura relativamente baixa e humidade alta. Na Tabela 4 são indicadas as características dos modelos e a localização das lajes.

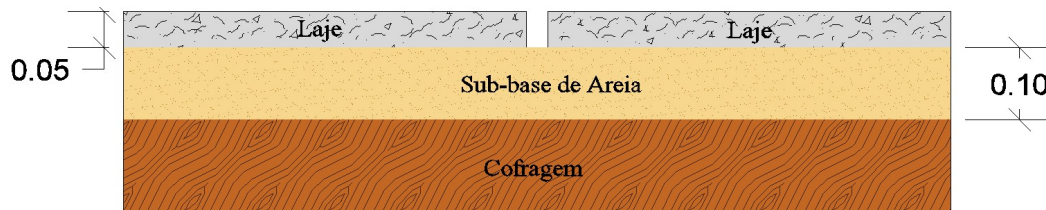
Tabela 4 – Quadro resumo das características das lajes construídas

<i>Modelos</i>	<i>Designação</i>	<i>Ambiente</i>	<i>Sub-base (Interface)</i>
Tipo 1	L1A	Piso 0	Camada de areia com 10 cm
	L1B	Piso -1	
Tipo 2	L2A	Piso 0	Filme plástico com 250 μ de espessura
	L2B	Piso -1	

Na Figura 25 é apresentada a geometria dos modelos utilizados neste trabalho.



a) Planta das lajes de Tipologia 1



b) Corte AA'

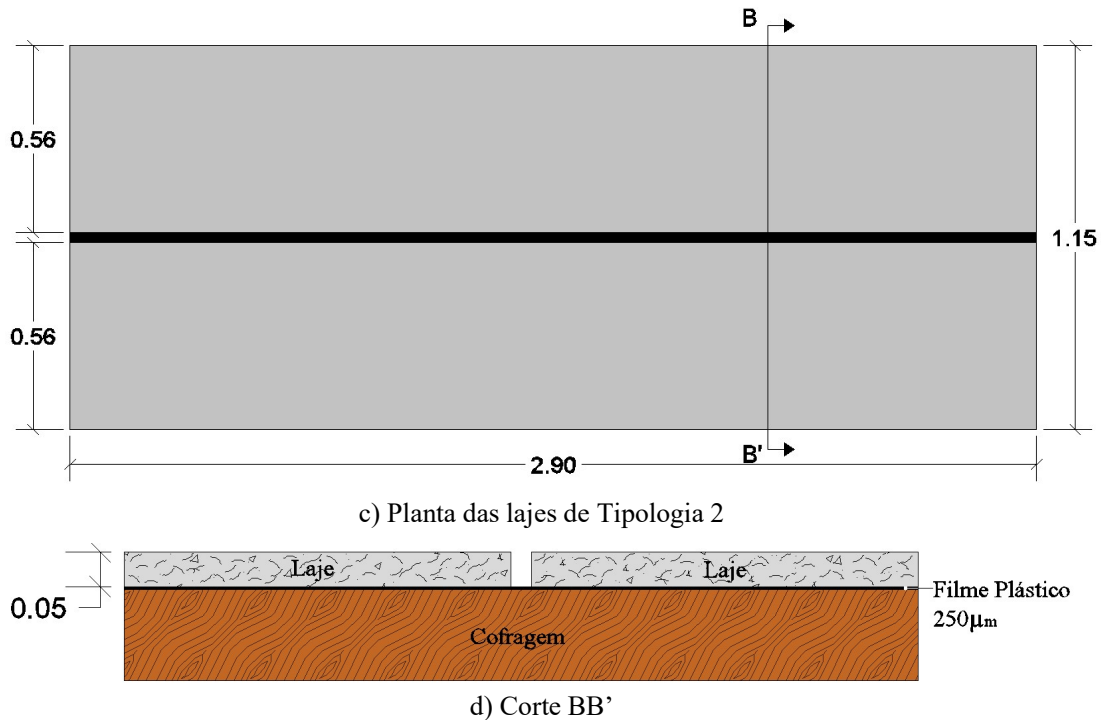


Figura 25 – Geometria dos modelos utilizados

4.3. Fabrico das lajes

O fabrico das lajes é ilustrado na Figura 26, e consistiu nas seguintes fases: (1) execução das cofragens; (2) colocação da sub-base; e (3) betonagem das lajes e provetes de ensaio.

Inicialmente foram preparadas as cofragens constituídas por painéis com uma base com dimensões em planta de $1.15 \times 2.90 \text{ m}^2$ (Figura 26 a), e divididas longitudinalmente para que cada painel servisse de base para duas lajes (Figura 26 b).

Após a montagem das cofragens selaram-se as juntas com silicone. Seguidamente colocou-se uma sub-base de areia, com 10 cm de espessura devidamente compactada, em quatro lajes (Figura 26 c) e filme plástico (Figura 26 d) nas restantes quatro. Após a colocação da sub-base, e no dia da betonagem, saturou-se a madeira das cofragens para que estas não absorvessem a água do betão necessária para uma correta cura (Figura 26 e) e borrifou-se a areia das lajes com a sub-base de areia para que quando se colocasse o betão, a areia ficasse intacta (Figura 26 f).

Antes da betonagem colocou-se descofrante para facilitar a desmontagem dos lados das cofragens (Figura 26 g). Após a chegada do camião betoneira (Figura 26 h) adicionaram-se as fibras ao betão e realizou-se o ensaio de abaixamento.

Após adicionar as fibras, o betão foi sendo descarregado e colocado nas cofragens (Figura 26 i) e j). Finalmente procede-se ao nivelamento da superfície (Figura 26 k). A Figura 26 l) ilustra as lajes concluídas.



a) Bases da cofragem



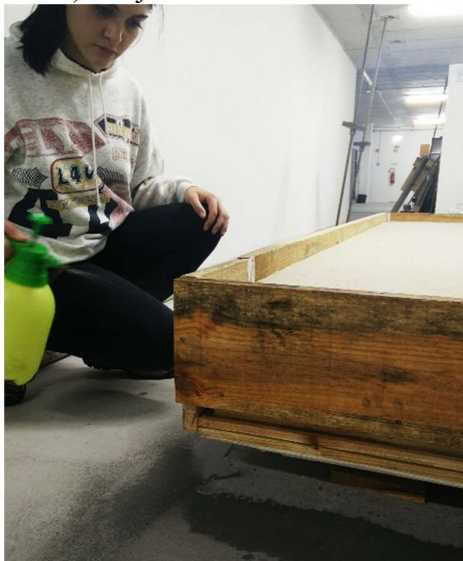
b) Cofragens realizadas



c) Laje com sub-base de areia



d) Laje com filme plástico



e) Saturação da madeira das cofragens



f) Humidificação da areia



g) Colocação de descofrante nas lajes



h) Descarga do betão



i) Betonagem das lajes com sub-base de areia



j) Betonagem das lajes com filme plástico



k) Acabamento das lajes com a talocha



l) Modelos concluídos

Figura 26 – Fabrico das lajes

Vinte e quatro horas após a betonagem procedeu-se à descofragem das lajes.

4.4. Ensaios de caracterização do Betão

4.4.1. Introdução

Para produzir as lajes de betão, pretendia-se um betão com uma classe de resistência correntemente utilizada neste tipo de pavimentos, com classe de consistência S4 a S5 com agregados pequenos (brita 1), devido à reduzida espessura da laje. Assim, solicitou-se à empresa Betão Liz, S.A., um betão com uma classe de resistência C30/37 e classe de consistência S4-S5.

Para a betonagem foi encomendado 1.6 m³ de betão. Além das lajes, foram igualmente produzidos provetes normalizados para a realização de ensaios de caracterização mecânica.

Para a caracterização do betão utilizado no fabrico das lajes, realizaram-se os seguintes ensaios:

- Caracterização no estado fresco: consistência.
- Caracterização no estado endurecido: resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico.

Os ensaios foram realizados de acordo com as seguintes normas portuguesas e especificações do LNEC:

- Ensaios do betão fresco. Parte 1: Amostragem (NP EN 12350-1, 2009);
- Ensaios do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento (NP EN 12350-2, 2009);
- Ensaios do betão endurecido. Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes (NP EN 12390-1, 2009);
- Ensaios do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica (NP EN 12390-2, 2009);
- Ensaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes (NP EN 12390-3, 2009);
- Ensaios do betão endurecido. Parte 5: Resistência à flexão de provetes (NP EN 12390-5, 2009)
- Ensaios do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons (NP EN 12504-4, 2007)

4.4.2. Ensaio de Espalhamento

A classe do betão foi obtida através da realização do ensaio de espalhamento (Figura 27). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5



Figura 27 – Ensaio de espalhamento

Tabela 5 – Resultado do ensaio de espalhamento

Diâmetro de espalhamento (<i>mm</i>)	Classe
560 <i>mm</i>	S5

De acordo com os resultados obtidos o betão satisfaz a classe de consistência pretendida.

4.4.3. Ensaio de Resistência à Compressão

Foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão utilizando provetes normalizados com 15 cm de aresta. Para obter o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo, foram realizados ensaios aos 1, 5, 7, 14, 21, 28, 56 dias. A Figura 28 ilustra a realização do ensaio.

Na Figura 29 são apresentados os resultados de resistência à compressão ao longo do tempo. O valor obtido da tensão de rotura à compressão aos 28 dias foi de 55.02 MPa.

Da análise do gráfico anterior (Figura 29) verifica-se que a curva proposta pelo Eurocódigo 2, para betões normais, se ajusta razoavelmente aos valores da resistência à compressão obtidos.



Figura 28 – Ensaio dos provetes à compressão

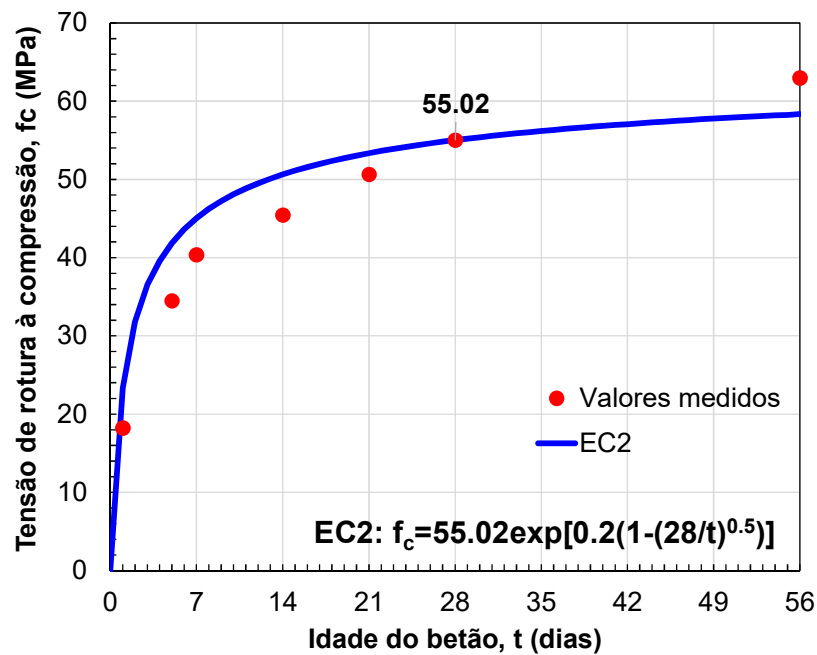
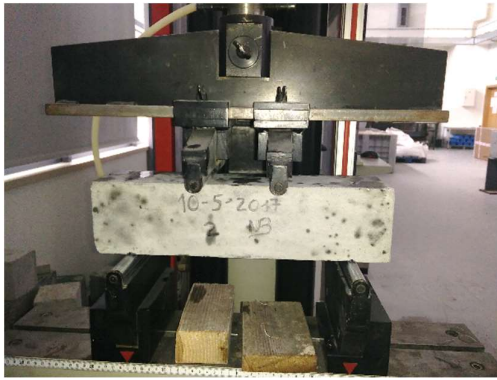


Figura 29 – Evolução da resistência à compressão com o tempo

4.4.4. Ensaio de Resistência à Flexão

Os provetes prismáticos ensaiados tinham dimensões de $100 \times 100 \times 400$ mm. O ensaio de flexão foi realizado aos 56 dias. A Figura 30 ilustra a realização do ensaio e na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos. O valor obtido da média dos 3 provetes foi de 6.25 MPa.



a) Esquema de ensaio



b) Rotura do provete

Figura 30 – Provete ensaiado à flexão

Tabela 6 – Valores médios obtidos no ensaio de flexão

Provete	Força registada (kN)	Tensão de flexão (MPa)
1	20.97	6.29
2	20.82	6.24
3	20.72	6.22

4.4.5. Ensaio de Retração

O procedimento de ensaio para determinação da retração no betão utilizada foi a preconizada na especificação do LNEC E 398-1993. Foram utilizados provetes prismáticos normalizados com as dimensões $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$. O ensaio foi realizado aos 1, 3, 8, 15, 29 e 45 dias. A Figura 31 mostra os provetes de ensaio (P1 e P2).



Figura 31 – Provetes do ensaio de retração

Na Figura 32 são apresentados os resultados da evolução da retração ao longo do tempo dos 2 provetes e ainda é apresentada os valores de retração segundo o EC2.

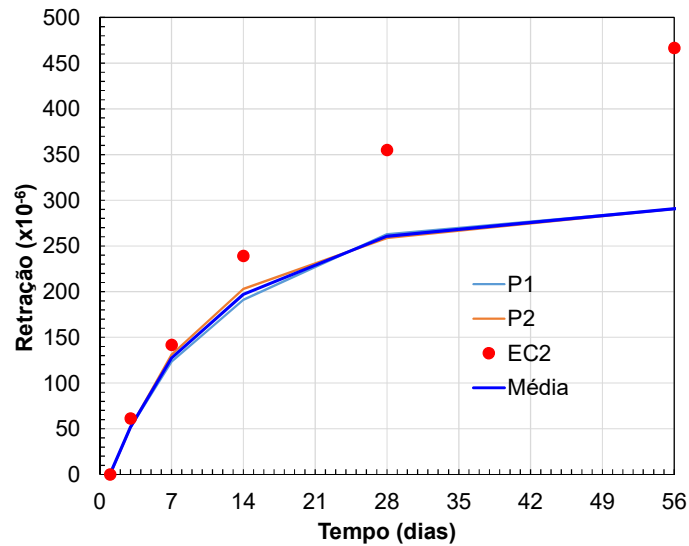


Figura 32 – Evolução da retração ao longo do tempo

Da análise do gráfico da Figura 32, conclui-se que os valores de retração verificados nos dois provetes de ensaio (P1 e P2) são bastante similares, mas quando comparados com os valores resultantes do EC2, este último apresenta valores superiores. Para uma resistência à compressão do betão aos 28 dias (55.02 MPa) os valores obtidos para a retração são valores correntes.

4.4.6. Velocidade de Propagação de ultra-sons

A determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons foi realizada com o *Pundit*. Com este ensaio não-destrutivo pretende-se estimar o módulo de elasticidade dinâmico. Foram efetuadas três leituras aos 28 dias nos provetes cúbicos normalizados, provetes esses utilizados para determinação da resistência à compressão, utilizando o método direto. A Figura 33 ilustra a realização do ensaio.

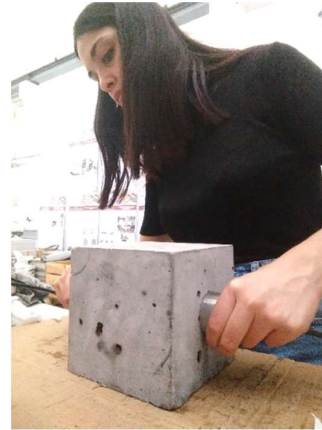
Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos no ensaio da velocidade de propagação de ultra-sons.

O módulo de elasticidade dinâmico, E_d , foi obtido através da seguinte expressão:

$$E_d = V_p^2 \times \rho \times \frac{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}{1 - \nu_d} \quad (\text{Expressão 1})$$



a) Calibração do equipamento



b) Realização do ensaio

Figura 33 – Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons

Tabela 7 – Valor medido da velocidade de propagação de ultra-sons

Ensaio	Percurso (m)	Tempo de percurso (μ s)	Velocidade de Propagação (m/s)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)
1	0.15	28.0	5363.8	61.37

4.4.7. Determinação do módulo de Elasticidade

O procedimento de ensaio para determinação do módulo de elasticidade secante à compressão teve em conta a norma nacional NP EN 12390-13.

De uma forma resumida esta norma indica que se deve ensaiar um provete de ensaio à compressão uniaxial, registando-se as tensões e as extensões e com estas determinar a inclinação da secante à curva de tensões-extensões na primeira carga e após três ciclos de carga (Método A). O provete de ensaio utilizado foi um prisma de 10 cm de lado e 20 cm de altura.

Começou-se por determinar a resistência à compressão do betão, f_c , de acordo com a NP EN 12390-3 para definir os níveis de tensão do ciclo de ensaio. Determinada a resistência à compressão do betão, definiu-se os valores de tensão com base nas seguintes expressões:

$$\sigma_a = f_c / 3 \quad (\text{Expressão 2})$$

$$0,10 f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 f_c \quad (\text{Expressão 3})$$

$$0,5 \text{MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_b \quad (\text{Expressão 4})$$

Na Tabela 8 estão discriminados os valores inseridos na máquina de ensaio para determinação do módulo de elasticidade secante aos 110 dias de idade do betão.

Tabela 8 – Valores utilizados na determinação do módulo de elasticidade

Idade do Betão	f_c	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	σ_p [MPa]
110 Dias	71.85	23.95	10.78	0,5

Inicialmente foram devidamente fixados axialmente os instrumentos de medição, como se pode ver nas Figura 34, depois deu-se início ao ciclo para determinar o módulo de elasticidade, constituído por 3 ciclos de pré-carga para verificação da estabilidade dos instrumentos de medição de extensões e o posicionamento do provete, e por fim 3 ciclos de carga a uma velocidade de 0,6 MPa/s, para determinação do módulo de elasticidade secante inicial, $E_{C,0}$, e estabilizado, $E_{C,S}$.



Figura 34 – Instrumentação para medição do módulo de elasticidade

Na Tabela 9 estão indicados os valores para determinação do módulo de elasticidade secante inicial, $E_{C,0}$, e estabilizado, $E_{C,S}$, e o respetivo valor final.

Tabela 9 - Valores para o cálculo do módulo de elasticidade

Módulo de Elasticidade Secante Inicial – $E_{C,0}$					
<i>Idade do provete</i>	σ_a^m [MPa]	σ_b^m [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$	$\varepsilon_{b,0}$	$E_{C,0}$ [GPa]
<i>110 dias</i>	53.99	24.30	1.74×10^{-4}	6.90×10^{-4}	28
Módulo de Elasticidade Secante Estabilizado – $E_{C,S}$					
<i>Idade do provete</i>	σ_a^m [MPa]	σ_b^m [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$	$\varepsilon_{b,2}$	$E_{C,S}$ [GPa]
<i>110 dias</i>	53.99	24.30	1.78×10^{-4}	9.30×10^{-4}	35

4.5. Instrumentação

A instrumentação adotada teve como objetivo realizar medições que permitissem avaliar a deformação da laje nos topos e na sua zona central, os gradientes de temperatura e humidade relativa ao longo da espessura das lajes em estudo e monitorizar a temperatura ambiente nas duas zonas de ensaio. A Figura 35 ilustra as diversas fases de instalação dos aparelhos de medida.

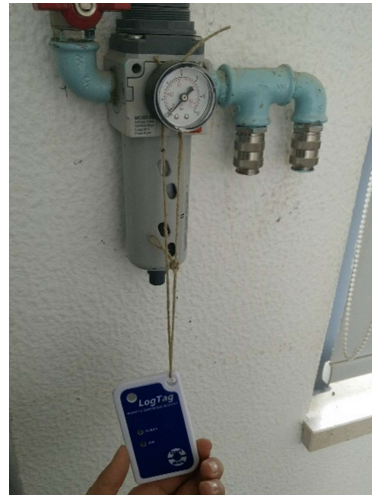
Para documentar o histórico da temperatura e humidade ambientes foram utilizados registadores *LogTag* (Figura 35 a). Tendo sido colocados dois registadores em cada um dos pisos de ensaio.

Para a medição da deformação nos topos e na linha central das lajes foram utilizados comparadores da *Mitutoyo*, com precisão de 1 μ m. Inicialmente colocaram-se chapas de metal com o objetivo de regularizar a superfície. Para o suporte dos comparadores executaram-se umas peças de madeira em L (Figura 35 c) e d).

Para medir os gradientes de temperatura e humidade relativa ao longo da espessura da laje foi utilizado um sensor comercial da *Vaisala Structural Humidity Measurement Kit*, modelo *SHM40*. Para efetuar as medições com este equipamento foram executados furos (Figura 35 e) no betão endurecido para a instalação de mangas plásticas (Figura 35 f), 3 em cada laje, a profundidades predefinidas de 4.0 cm, 3.0 cm e 1.5 cm abaixo da superfície e afastados de 10.0 cm.



a) Registrador *LogTag*



b) Colagem das placas de metal no local dos comparadores



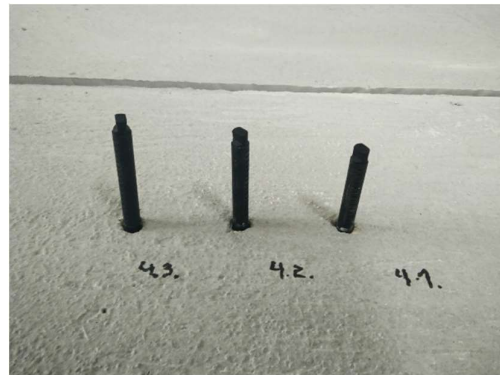
c) Fixação do suporte do comparador



d) Comparador colocado no suporte



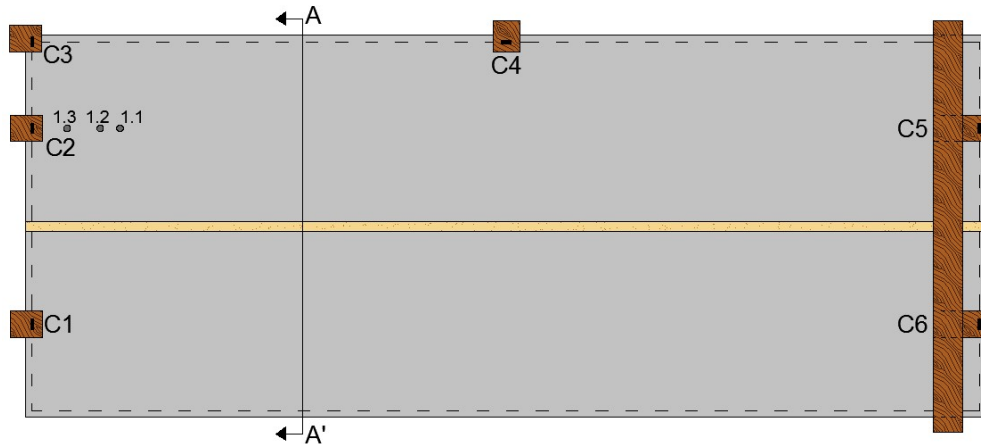
e) Furação da laje para a colocação dos tubos plásticos



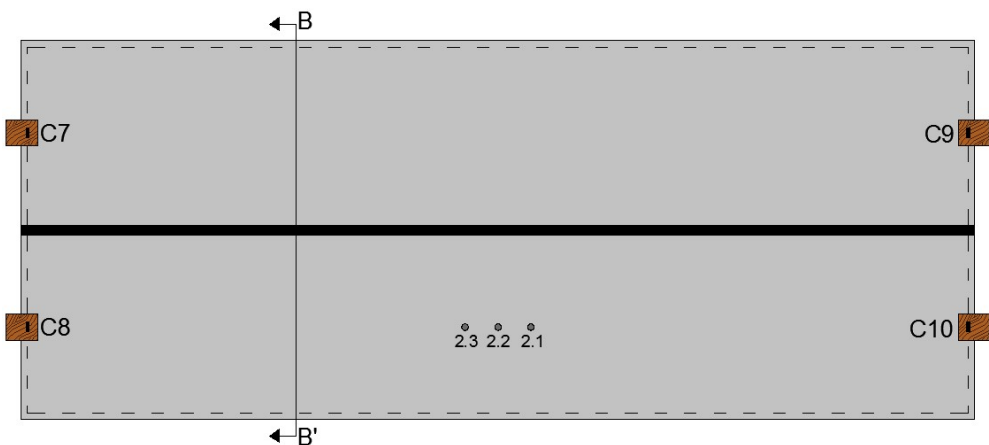
f) Tubos plásticos para recolha de leituras dos gradientes

Figura 35 – Instalação dos aparelhos de medida

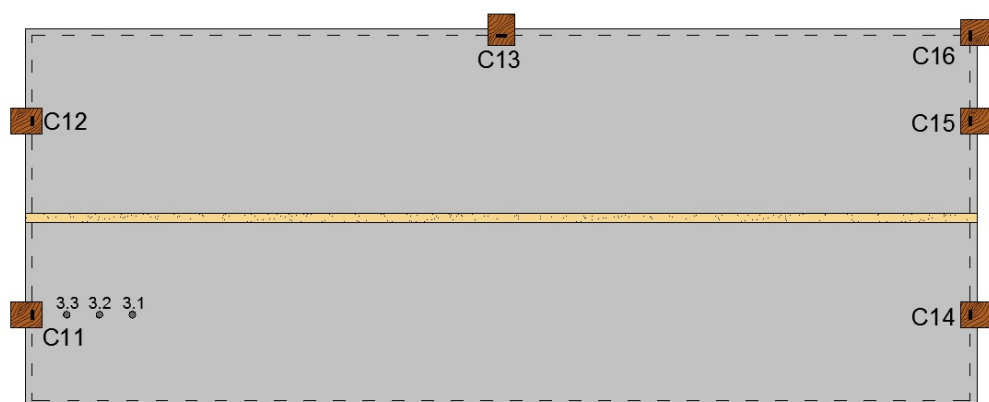
Por fim, foi definida uma nomenclatura para cada comparador e para cada furo realizado, de modo a tornar a recolha de dados, descrita no ponto seguinte, mais organizada e clara. A Figura 36 e a Figura 37 mostram a localização da instrumentação e a identificação correspondente.



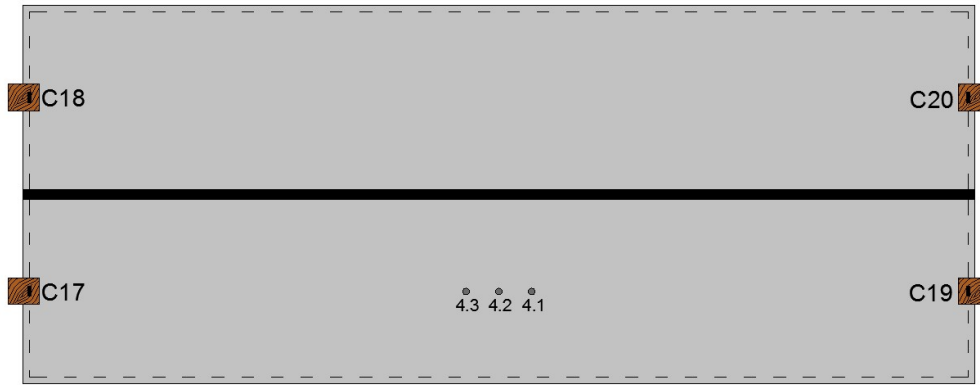
a) *Setup* de medição da laje-tipo L1A



b) *Setup* de medição da laje-tipo L2A



c) *Setup* de medição das laje-tipo L1B



d) Setup de medição das lajes-tipo L2B

Figura 36 – Localização dos comparadores e dos furos para medição da humidade relativa e temperatura internas do betão nas diferentes lajes

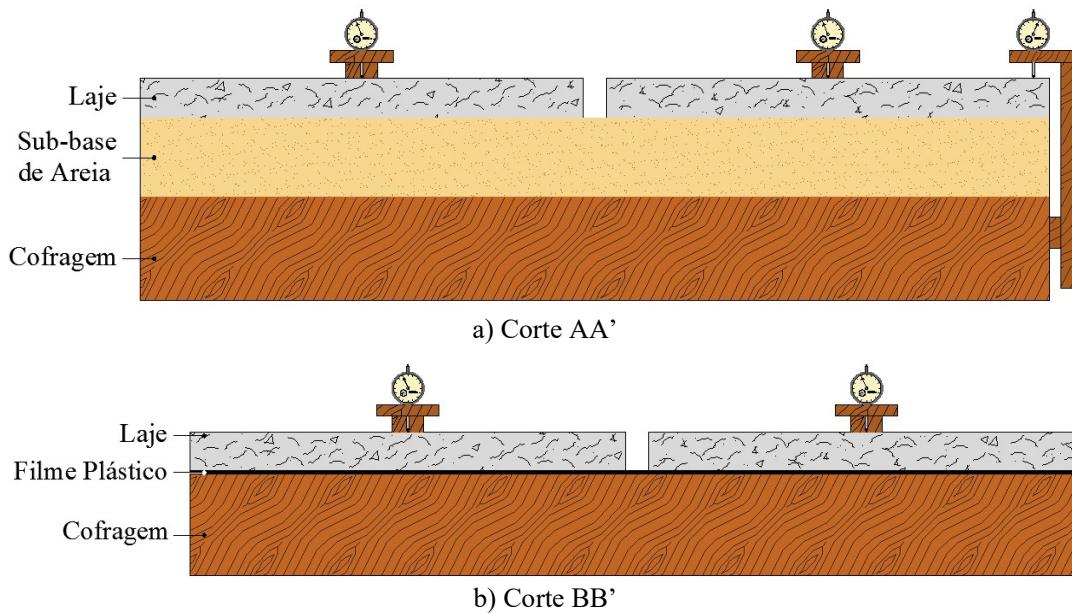


Figura 37 – Cortes referentes à Figura 36 a) e b)

4.6. Medições

Antes de iniciar o período de medições elaborou-se uma pequena laje (67 x 40 x 10 cm) com o objetivo de testar o equipamento de medição de humidade e de temperatura internas do betão (Figura 38).

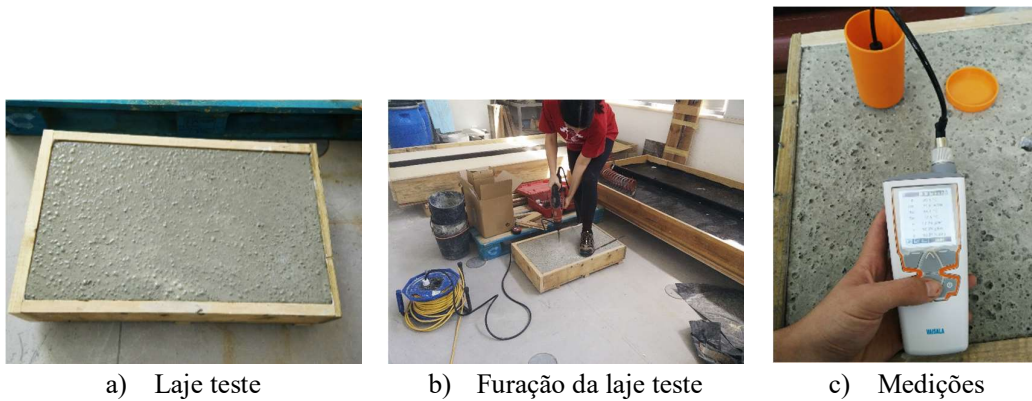


Figura 38 – Ensaio do equipamento de medição na laje teste

Comprovado que o equipamento estava de acordo com o descrito, iniciou-se a fase de medições. Esta fase consistiu na recolha dos dados da deformação dada pelos comparadores e dos gradientes de temperatura e humidade relativa nos 12 furos realizados. A recolha das leituras nos comparadores foi realizada todos os dias úteis, de 16 de Maio a 29 de Junho. O tempo decorrido desde a leitura do primeiro comparador até ao último foi cerca de 15 minutos, pois constituía um processo momentâneo de obtenção de valores. A Figura 39 ilustra esse mesmo processo. Recolheram-se, diariamente, leituras dos 20 comparadores.

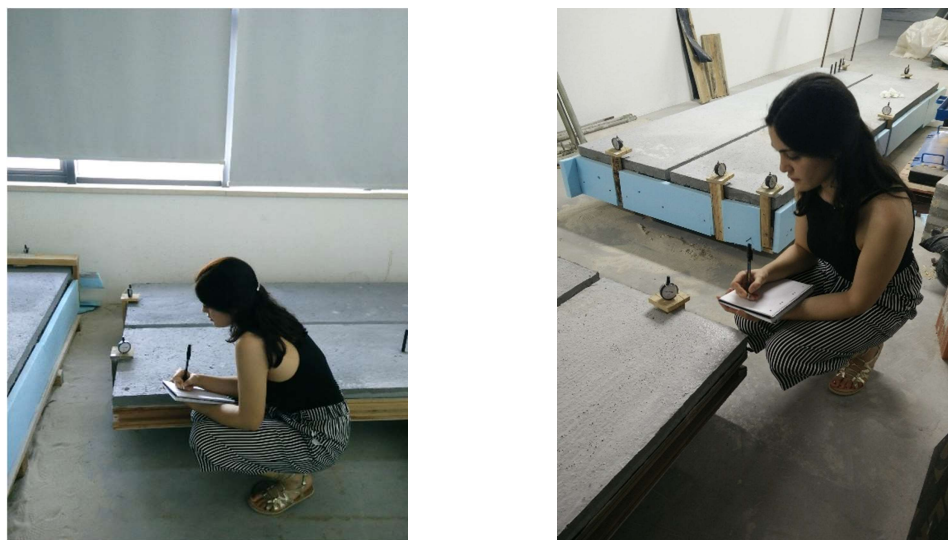


Figura 39 – Leitura dos valores de deformação dada pelos comparadores

As leituras de humidade relativa e temperatura na secção da laje foram igualmente anotadas todos os dias úteis desde 16 de Maio a 29 de Junho. A obtenção dos valores iniciava às 9h30 até às 16h, pois a aquisição dos valores de humidade relativa e temperatura de cada furo carecia de 30 minutos para estabilização de valores, só então poderiam ser anotados os valores dados pelo equipamento. Inicialmente os furos eram selados com os tubos de plástico

com uma rolha de borracha como é ilustrado na Figura 40 a). Quando se pretendia medir a humidade relativa e temperatura nos furos, inseria-se a capa de proteção no tubo, retirava-se a rolha e inseria-se a sonda no tubo, colocando a rolha que vinha incorporada na sonda. Enrolava-se o cabo dentro da capa de proteção para se conseguir fechar a capa protetora com a tampa. Passados 30 minutos de estabilização dos valores, abria-se a tampa da capa de proteção e ligava-se o cabo ao leitor, recolhendo os valores, como ilustrado na Figura 40 b).



a) Período de estabilização dos valores de humidade e temperatura internas do betão no furo 2.2



b) Leitura da humidade e temperatura internas do betão no furo 2.2

Figura 40 – Recolha dos valores da humidade e temperatura na secção da laje

5. Resultados. Análise e Discussão

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados do trabalho experimental desenvolvido e feita uma análise e discussão dos mesmos, apresentando os resultados das leituras efetuadas durante 50 dias (período útil) correspondentes à humidade relativa e temperatura ambiente, gradientes de temperatura e humidade na espessura das lajes e deformação das lajes.

Na secção 5.2 são apresentados os resultados das leituras efetuadas, na secção 5.3 são analisados e discutidos os resultados dos diferentes parâmetros avaliados e a sua influência no comportamento da laje associado ao Curling, e por fim na secção 5.4 os resultados obtidos são comparados com trabalhos de referência.

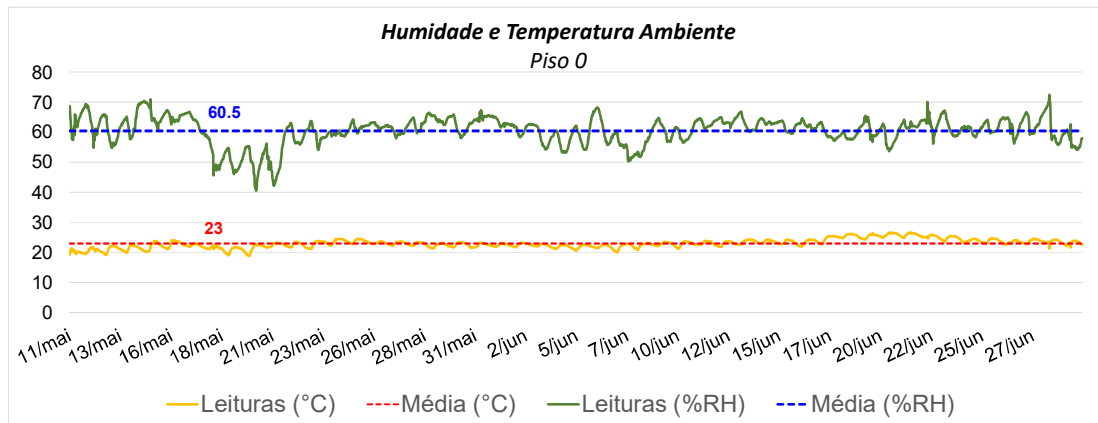
5.2. Resultados

Nesta secção são apresentados os resultados para cada uma das condições de exposição consideradas (lajes colocadas no piso 0 e lajes colocadas no Piso -1 do laboratório) e para cada um dos modelos considerados:

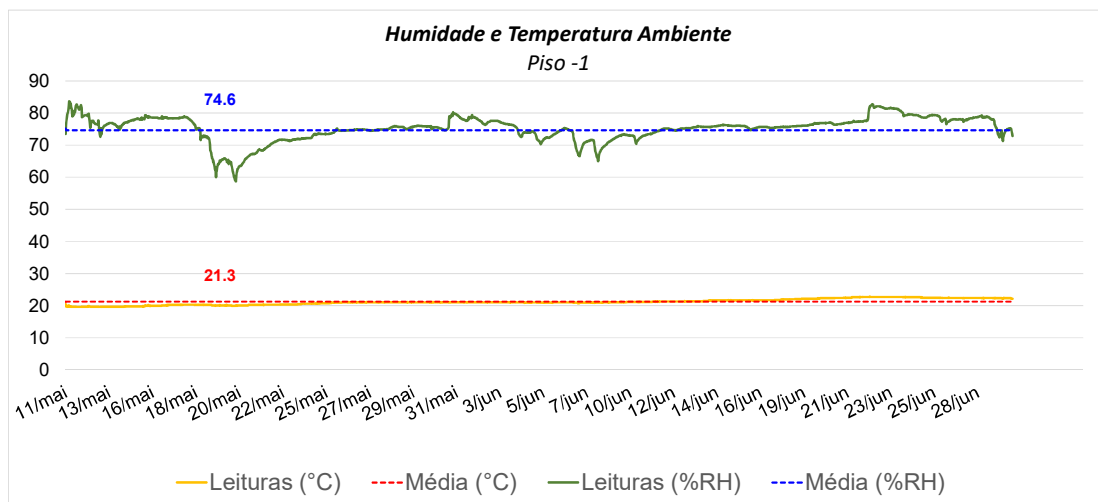
- L1A: Ambiente Piso 0 e interface com camada de areia de 10 cm de espessura;
- L2A: Ambiente Piso 0 e interface com filme plástico com espessura de 250 μ ;
- L1B: Ambiente Piso -1 e interface com camada de areia de 10 cm de espessura;
- L2B: Ambiente Piso -1 e interface com filme plástico com espessura de 250 μ .

Na Figura 41 são apresentados os resultados da humidade relativa e temperatura ambiente do Piso 0 e Piso -1 respetivamente, na Figura 42 os resultados obtidos do gradiente de humidade (humidade interna), na Figura 43 são apresentados os resultados das medições do gradiente de temperatura (temperatura interna) e por último na Figura 44 são apresentados os valores das deformações observados nas lajes.

- Humidade Relativa e Temperatura Ambiente



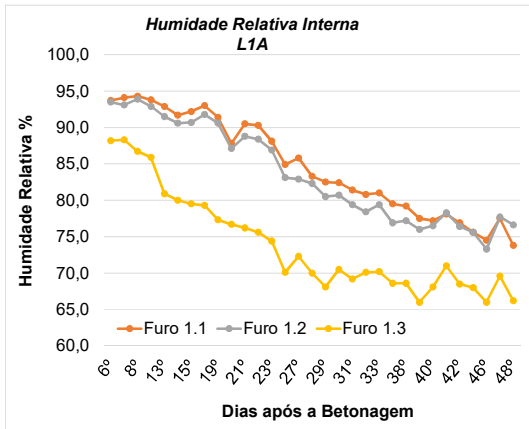
a) Piso 0



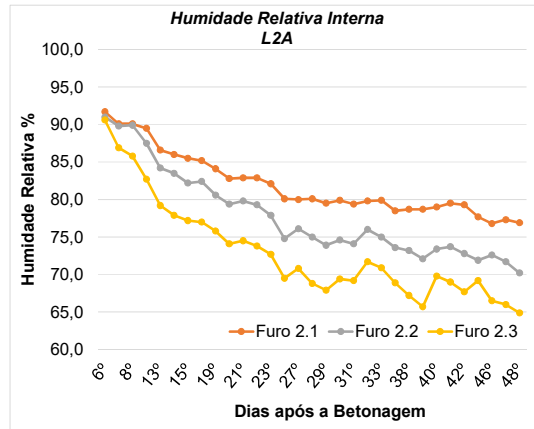
b) Piso -1

Figura 41 – Valores da humidade relativa e da temperatura ambiente

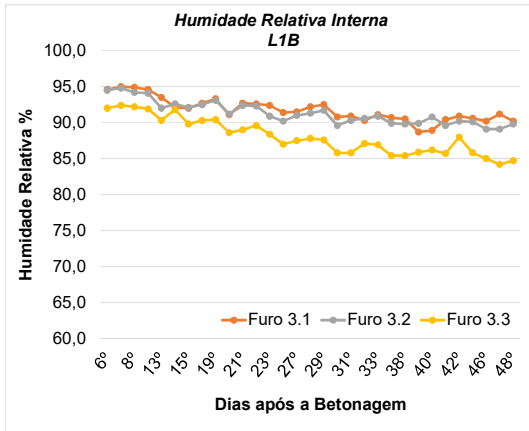
- *Gradiente de Humidade (Humidade Relativa Interna)*



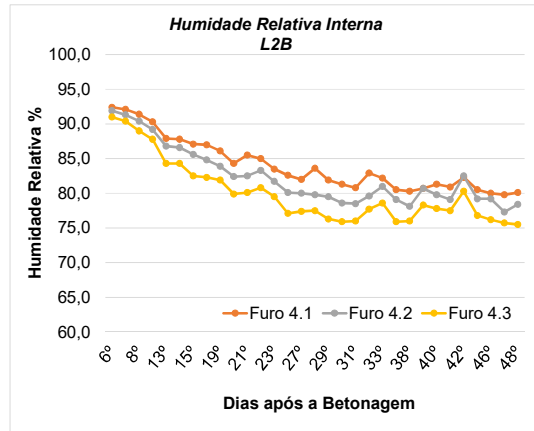
a) Gradiente de Humidade da laje L1A



b) Gradiente de Humidade da laje L2A



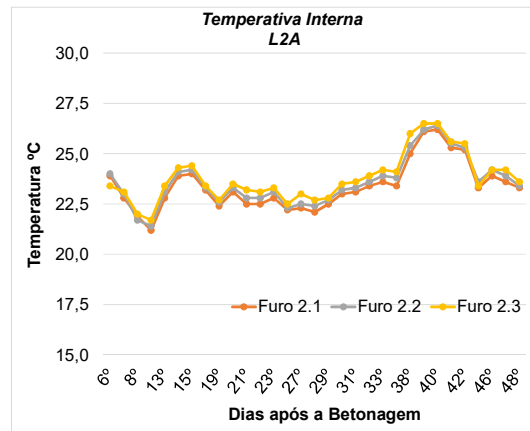
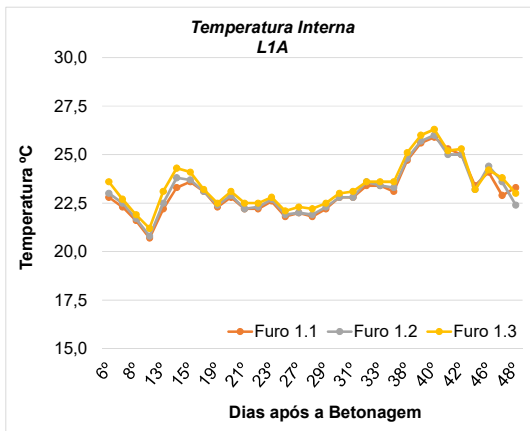
c) Gradiente de Humidade da laje L1B



d) Gradiente de Humidade da laje L2B

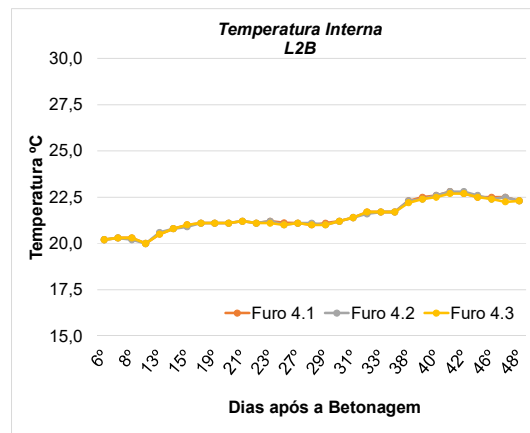
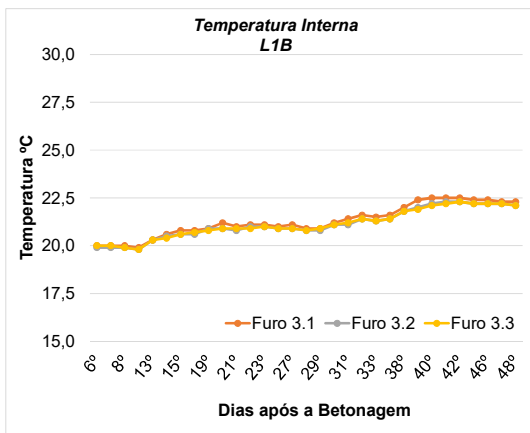
Figura 42 – Variação do gradiente de humidade ao longo do tempo

- Gradiente de temperatura (Temperatura Interna)



a) Gradiente de Temperatura da laje L1A

b) Gradiente de Temperatura da laje L2A



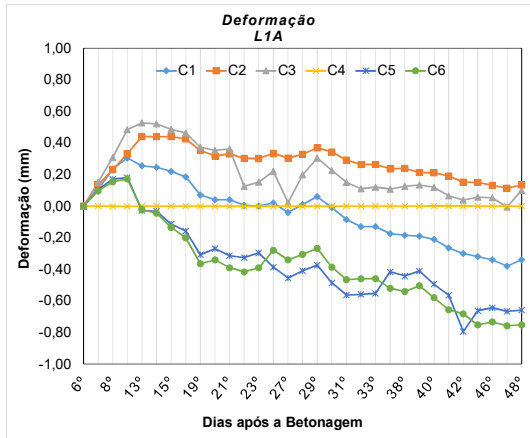
c) Gradiente de Temperatura da laje L1B

d) Gradiente de Temperatura da laje L2B

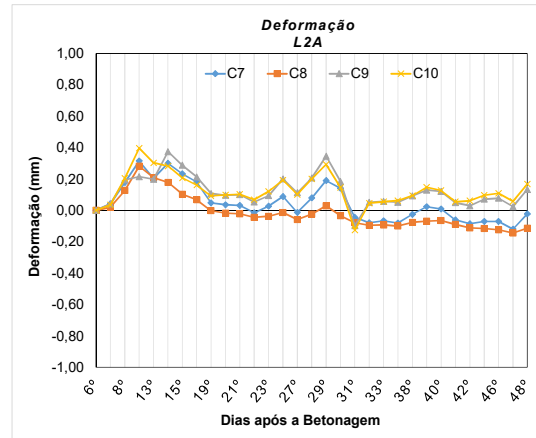
Figura 43 – Variação do gradiente de temperatura ao longo do tempo

- Deformação

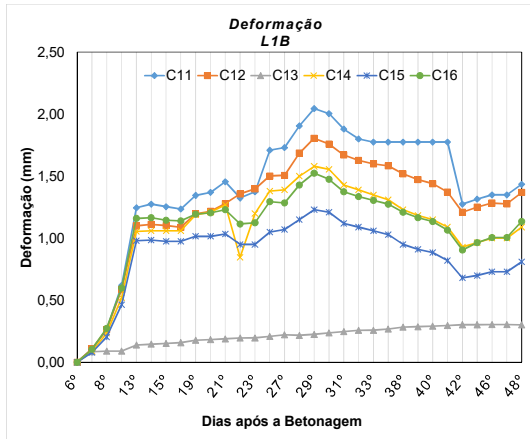
Seguidamente são apresentados graficamente os valores de deformação recolhidos dos comparadores. A nomenclatura e posicionamento dos mesmos está ilustrada na Figura 36 (ver secção 4.5.).



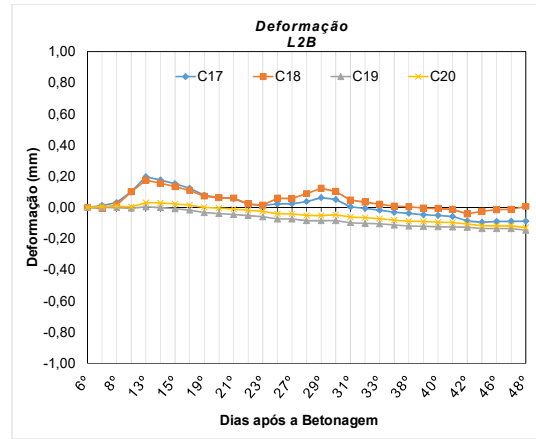
a) Deformação da Laje L1A



b) Deformação da Laje L2A



c) Deformação da Laje L1B



d) Deformação da Laje L2B

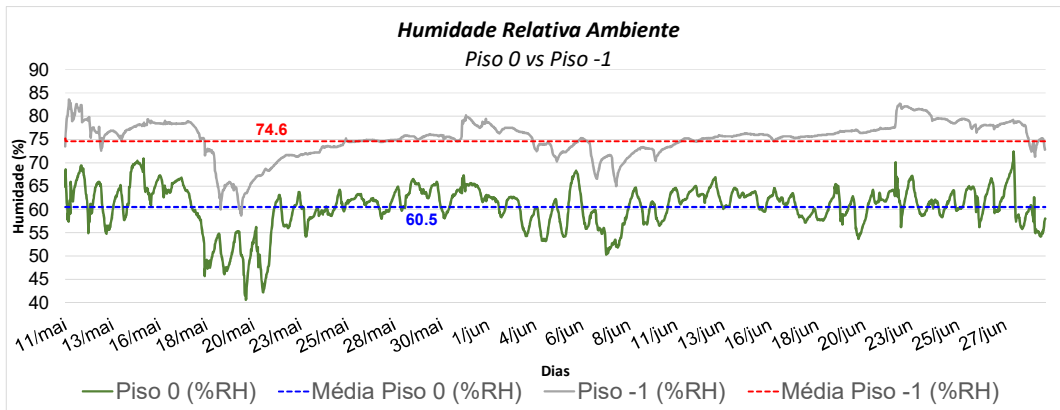
Figura 44 – Variação da deformação das lajes ao longo do tempo

5.3. Análise e Discussão dos Resultados

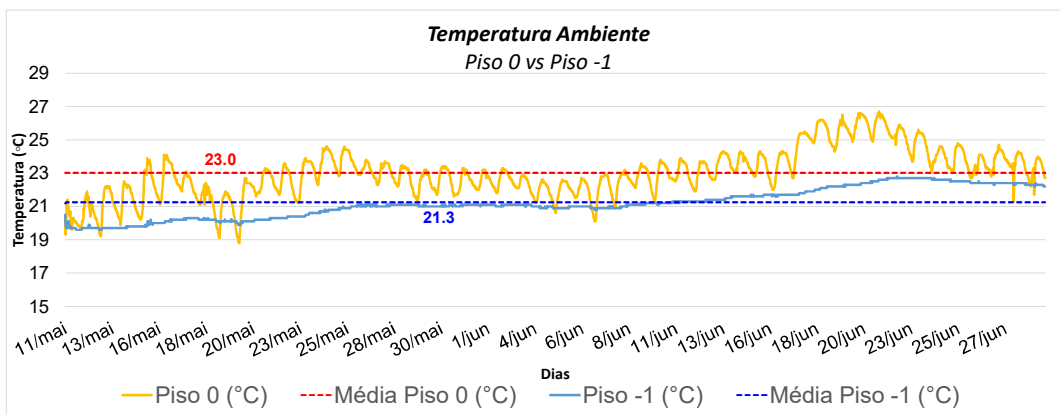
Nesta secção são discutidos e analisados os resultados obtidos da temperatura e humidade ambiente, dos gradientes de humidade e temperatura, e da deformação das lajes. Irão ser analisadas cada uma das variáveis referidas anteriormente de forma isolada e por fim relacioná-las com o *curling*.

- Humidade Relativa e Temperatura Ambiente

Como já foi referido anteriormente, as lajes foram submetidas a dois ambientes diferentes simulando uma laje no interior e outra no exterior. Na Figura 45 são apresentados os valores da Humidade Relativa (Figura 45 a) e Temperatura Ambiente (Figura 45 b) para cada um dos espaços utilizados.



a) Humidade relativa ambiente Piso 0 vs Piso -1



b) Temperatura ambiente Piso 0 vs Piso -1

Figura 45 – Variação da humidade relativa e da temperatura ambiente

Na Figura 45 a) são ilustradas as variações diárias de humidade relativa a que as lajes estiveram expostas no piso 0 e piso -1. No Piso 0 o ambiente caracterizou-se por sucessivas

flutuações de humidade onde se registaram valores de humidade entre os 40.6% e os 72.4%, com um valor médio de 60.5%. No piso -1 registaram-se humidades relativas entre os 58.7% e os 83.6%, com um valor médio de 74.6%.

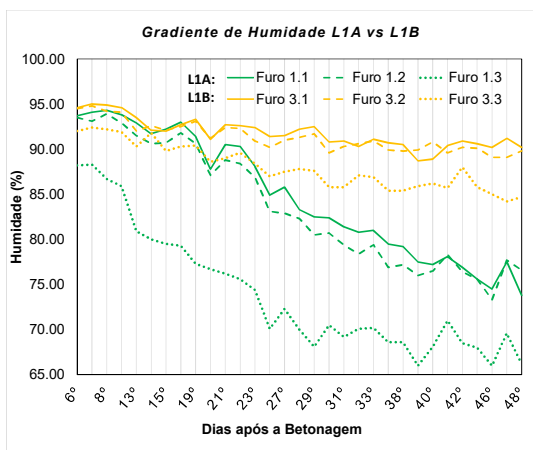
Na Figura 45 b) são ilustradas as variações diárias de temperatura a que as lajes estiveram expostas no piso 0 e piso -1. No piso 0 a temperatura ambiente variou entre 18.8°C e os 26.7°C, com um valor médio de 23.0°C. No piso -1 a temperatura variou entre os 19.6 °C e 22.8 °C, com um valor médio de 21.3°C.

Da análise comparativa verifica-se que as lajes do piso 0 tiveram sujeitas a maiores variações de humidade relativa e de temperatura ambiente comparativamente às lajes colocadas no piso -1 como era espectável por este ser um espaço mais protegido.

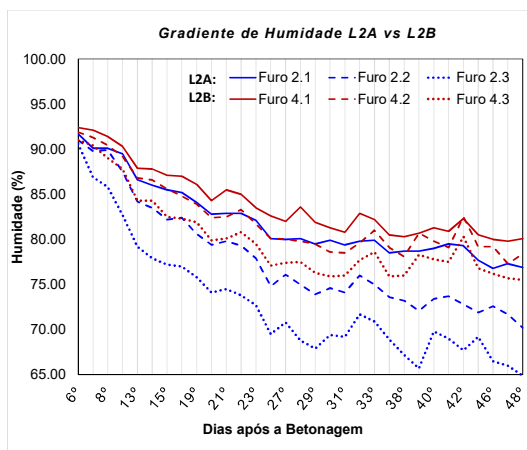
- Gradientes de Humidade Relativa e Temperatura

Na Figura 46 são apresentados os valores da humidade nos 3 furos executados com diferentes profundidades (Furo 1: 4 cm; Furo 2: 3 cm; e Furo 3: 1.5 cm) para as lajes colocadas em cada um dos espaços utilizados e para as lajes com diferentes condições de interface.

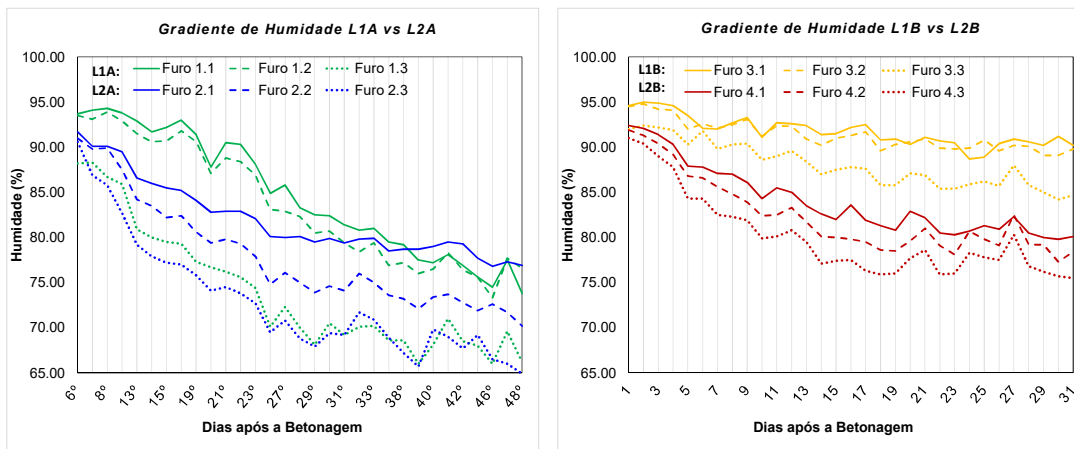
Uma primeira observação da Figura 46 permite verificar que a humidade relativa interna aumenta com a distância à superfície da laje.



a) Lajes do Piso 0 e -1 com interface laje / sub-base de areia



b) Lajes do Piso 0 e -1 com interface laje / sub-base de filme plástico



c) Lajes do Piso 0 com diferentes interfaces d) Lajes do Piso -1 com diferentes interfaces

Figura 46 – Variação de humidade relativa para diferentes condições ambientais e da interface

Na laje L1A (laje do piso 0 com interface laje / sub-base de areia), a humidade relativa interna variou entre os 66% e os 94.3%. Nos furos a maior profundidade (furo 1.1 e 1.2) os valores são muito próximos, contrariamente ao que se observa no furo mais à superfície (furo 1.3) em que se observam valores muito inferiores porque a camada superficial da laje é mais sensível às variações da humidade relativa e temperatura ambiente. A origem desta diferença também está associada ao fato da sub-base de areia estar húmida nos primeiros dias, pois é nesta fase inicial que essa diferença é maior, diminuindo ao longo do período de medição como resultado da perda de humidade.

Na laje L2A (laje do piso 0 com interface laje / sub-base de filme plástico), a humidade relativa interna oscila entre os 64.9% e os 91.7%. Começa por ter praticamente o mesmo valor nos diferentes furos mas, ao longo do período de medição mostram um comportamento similar e as diferenças entre os vários furos são aproximadamente iguais apesar do furo mais superficial, apresentar maiores flutuações como era de esperar por a camada de betão na face superior estar mais exposta à variação ambiental. Este comportamento mais estável deve-se à presença do filme plástico colocado na interface, pois a perda de humidade dá-se apenas no sentido ascendente, sendo mais uniforme a perda de humidade como as Figura 46 b) e c) sugerem.

Na laje L1B (laje do piso -1 com interface laje / sub-base de areia) os valores da humidade relativa interna oscilaram entre os 84.2% e os 95.0%. Pode observar-se nas Figura 46 a) e d) que a humidade relativa ao longo da espessura é bastante semelhante, e com pequenas variações ao longo do tempo, comparativamente ao observado na laje L1A exposta

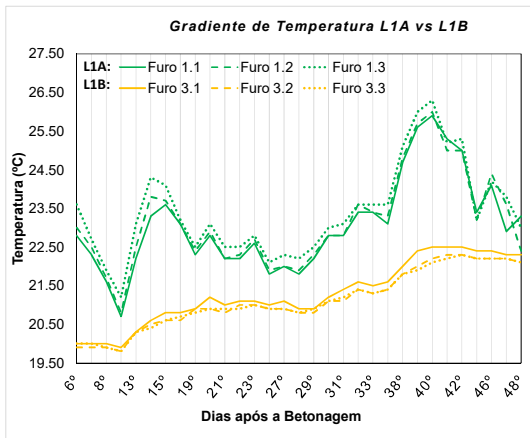
a um ambiente diferente. Esta laje (L1B) foi a única em que os valores de humidade eram muito próximos que em alguns dias a humidade no furo intermédio era superior à humidade do furo inferior. Ao longo do período de medição verificou-se uma ligeira descida da humidade relativa interna, sendo que o furo mais superficial foi onde se verificou uma maior variação como seria de esperar. Esta laje conservou bastante a sua humidade uma vez que a sub-base de areia manteve-se húmida durante o programa experimental.

A laje L2B (laje do piso -1 com interface laje / sub-base de filme plástico) tem um comportamento semelhante à L1B na medida em que os valores registados da humidade eram bastante próximos ao longo da espessura, mas neste caso verificou-se uma diferença mais pronunciada entre os vários furos, em comparação com a laje L1B, bem como a descida dos valores de humidade ao logo do período de medição. Neste caso os valores de humidade variaram entre os 75.5% e os 91.9% (Figura 46 b) e d).

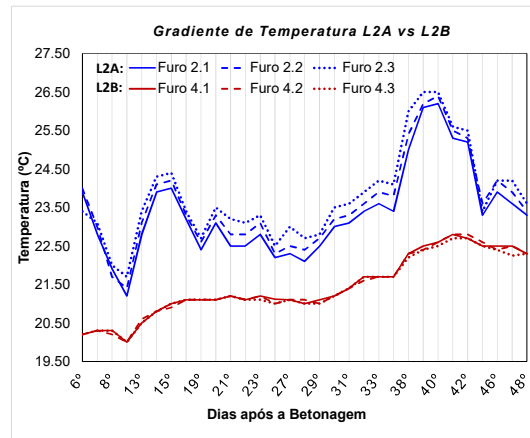
Da análise das Figura 46 a) e b) verifica-se que para as mesmas condições da interface e diferentes condições ambientais que os valores da humidade interior decrescem ao longo do tempo com um decréscimo mais acentuado na laje L2A colocada no Piso 0. No entanto, as lajes com uma interface laje / sub-base com filme plástico (Figura 46 b) apresentaram um comportamento mais próximo entre si apesar de se encontrarem em ambientes diferentes. Comparando as observações anteriores com os valores obtidos para as lajes com diferente interface laje / sub-base mas colocadas no mesmo ambiente (Figura 46 c) e d), verifica-se que as lajes com uma interface laje / sub-base com filme plástico (lajes L2A e L2B) apresentam sistematicamente valores de humidade inferiores que as lajes com uma interface laje / sub-base com areia, concluindo-se assim que a capacidade de reter humidade é maior para as lajes com sub-base de areia (lajes L1A e L1B) com exceção dos valores observados no furo com maior profundidade da laje L2A. Esta observação está relacionada com o fato da areia da sub-base da laje L1A ter secado contrariamente ao observado na laje L1B, uma vez que nesta laje a sub-base de areia manteve-se húmida durante todo o período de medição.

Na Figura 47 são apresentados os valores das leituras da temperatura nos 3 furos executados com diferentes profundidades (Furo 1: 4 cm; Furo 2: 3 cm; e Furo 3: 1.5 cm) para as lajes colocadas em cada um dos espaços utilizados e para as lajes com diferentes condições de interface.

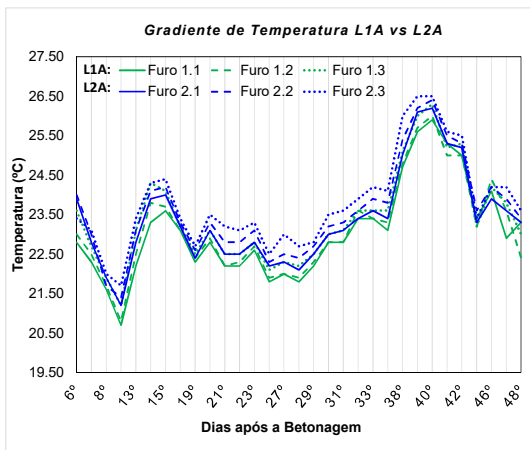
Uma primeira observação da Figura 47 permite verificar que a temperatura interna diminui com a distância à superfície da laje.



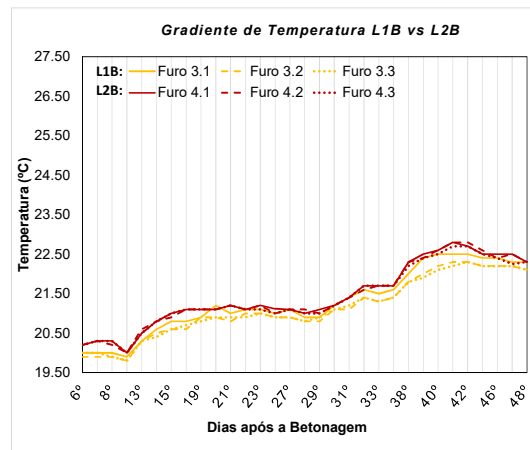
a) Lajes do Piso 0 e -1 com interface laje / sub-base de areia



b) Lajes do Piso 0 e -1 com interface laje / sub-base de filme plástico



c) Laje do Piso 0 com diferentes interfaces



d) Laje do Piso -1 com diferentes interfaces

Figura 47 – Gradiente de temperatura para diferentes condições ambientais e da interface laje / sub-base

Os valores registados das temperaturas internas na laje L1A são bastante próximos ao longo da espessura da laje, sendo praticamente coincidentes ao longo do tempo de medição, variando entre os 20.8°C e os 26.3°C, como se pode observar nas Figura 47 a) e c).

Na laje L2A pode verificar-se pelas Figura 47 b) e c) que os valores registados da temperatura interna são idênticos aos valores medidos na laje L1A, apenas com uma maior diferença entre os furos, ainda que ligeira. Os valores da temperatura interna variaram entre os 21.4°C e os 26.5°C.

Na laje L1B verifica-se que as temperaturas ao longo da espessura da laje são bastante semelhantes, mas com uma amplitude muito inferior à medida na laje L1A (ver Figura 47 a) e d). Nesta laje a temperatura interna variou entre os 19.8°C e os 22.5°C, com um aumento dos valores ao longo do período de medição.

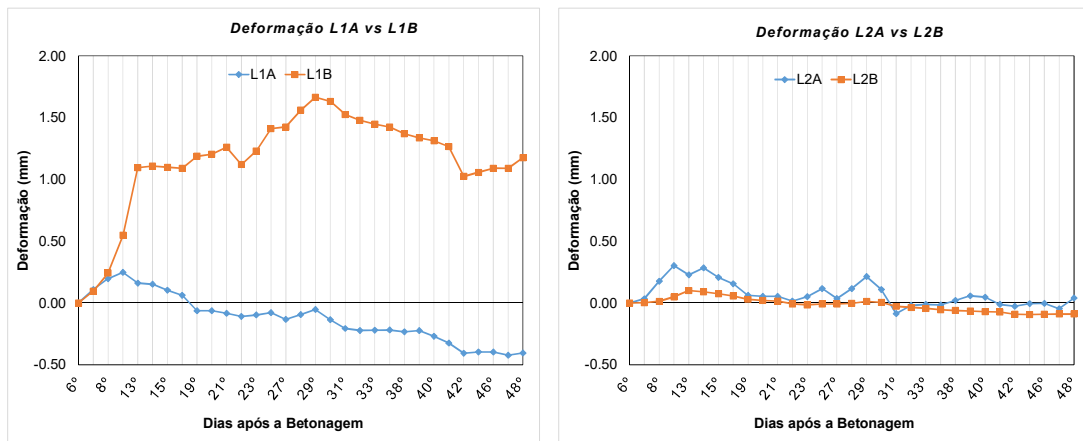
Na laje L2B os valores da temperatura interna são bastante semelhante ao da laje L1B, porém neste caso as temperaturas ao longo da espessura da laje são ainda mais próximas (Figura 47 d). Nesta laje também os valores de temperatura aumentaram progressivamente ao longo do período de medição. Os valores variaram entre os 20.0°C e os 22.8°C.

Da análise das Figura 47 a) e b) observa-se que os valores registados da temperatura interna nas lajes colocadas no piso 0 são superiores aos registados nas lajes do piso -1 independentemente do tipo de interface laje / sub-solo utilizada. Pode assim concluir-se que no caso da temperatura interna os valores registados são bastante sensíveis ao ambiente em que as lajes foram colocadas. Observa-se ainda que as maiores variações registadas da temperatura interna nas lajes do piso 0 se relacionam com a variação da temperatura ambiente registada neste piso como se pode verificar na Figura 45 b).

As Figura 47 c) e d) confirmam as observações anteriores e ilustram que a temperatura interna é pouco sensível ao tipo de interface laje / sub-solo considerada.

- Deformação – Curling

Na Figura 48 são apresentados os valores médios das leituras da deformação obtidas nos comparadores (valores médios do total dos comparadores das lajes do mesmo tipo) para as lajes colocadas em cada um dos espaços utilizados e para as lajes com diferentes condições da interface laje / sub-solo.



a) Lajes com diferentes condições ambientais

b) Lajes com diferente interface laje/sub-base

Figura 48 – Deformação da laje para diferentes condições ambientais e da interface

Da análise das Figura 48 a) e b) conclui-se que a laje que sofreu menor deformação foi a laje L2B (laje com interface laje / sub-base com filme plástico colocada no piso -1) e a que sofreu maiores deformações foi a laje L1B (laje com interface laje / sub-base de areia

colocada no piso -1). Verifica-se que até ao 13º dia após a betonagem em todas as lajes se verificou um aumento do deslocamento no sentido positivo (*upward curling*). Após este dia verifica-se uma variação dos deslocamentos nas diferentes lajes.

A laje L1A foi onde se observou maiores variações do deslocamento (Figura 48 a). Inicialmente sofreu um deslocamento positivo e ao longo do tempo verificou-se uma inversão dos mesmos (*downward curling*). Uma razão que justifica os valores negativos é a atuação do peso próprio da laje, uma vez que a areia da sub-base secou e em algumas extremidades a laje perdeu o seu suporte. O valor máximo do deslocamento foi de -0.407 mm e o final de -0.405 mm.

A laje L2A foi a segunda laje que registou menores deslocamentos (Figura 48 b). Tal como nas outras lajes, registaram-se inicialmente valores crescentes até ao 13º dia e posteriormente decresceu registando-se sucessivas flutuações. No final do período de medição o valor da deformação é praticamente nulo. O valor máximo do deslocamento foi de 0.303 mm e o final de 0.041 mm.

A laje L1B, tal como já foi referido, foi a que registou maiores valores de deslocamento (Figura 48 a), sempre no sentido positivo, registando-se após o 13º dia uma variação dos mesmos. O valor máximo do deslocamento foi de 1.665 mm e o final de 1.176 mm.

A laje L2B foi a que registou os valores mais baixos, não excedendo os 0.20 mm em valor absoluto (Figura 48 b). As flutuações verificadas foram igualmente baixas ao longo de todo o período de medição. O valor máximo do deslocamento foi de 0.102 mm e o final de -0.089 mm.

Desta análise conclui-se que as lajes com filme plástico registaram valores consideravelmente menores de deslocamento (valores máximos de 0.102 mm para a laje L2B e 0.303 mm para a laje L2A), sendo que um ambiente mais controlado e com temperaturas menores ajuda a que os deslocamentos observados nesta tipologia de laje sejam ainda menores. A diferença entre as lajes com sub-base de areia (L1A e L1B) reside no grau de saturação da areia. Na laje L1A a areia secou completamente nos bordos, fazendo com que estas perdessem o apoio, enquanto na laje L2A a areia manteve-se estável e húmida durante todo o período experimental.

5.4. Comparação com Trabalhos de Referência

Nesta secção são comparados os resultados obtidos no presente estudo com os estudos apresentados na secção 3.5 do capítulo 3.

Uma das principais conclusões que Ramseyer, C. et al. (2012) retirou do seu trabalho foi que a perda de humidade é mais significativa na superfície das lajes, mais especificamente até aos 4-5 cm de profundidade. As conclusões do presente trabalho confirmam esses resultados, pois foi evidente a diferença de humidade entre furos, sendo que o furo que estava mais à superfície apresentou uma diferença significativa quando comparado com os outros dois furos. A diferença entre o furo mais superficial e o furo mais profundo chegou a ser de 15%, na laje L1A.

Fortin, C., (2005) concluiu que nas lajes de betão simples 7 dias após o início do período de cura já tinha ocorrido 40% do *curling*. O presente trabalho focou-se em lajes reforçadas com fibras, mas, por exemplo, na laje que se verificou maiores deformações (L1B), 13 dias após o início do período de cura tinha uma deformação de 66% do maior valor verificado ao longo do período de medição.

Banthia, N. et al. (2014) refere nas conclusões do seu trabalho que os extensómetros junto dos limites das lajes registaram valores superiores comparativamente aos que se encontravam no centro. Tal conclusão traduz-se em maiores deformações nos topos da laje. Como se pôde concluir pela comparação das deformações lidas nos comparadores no centro e nos topos das lajes efetuadas, existe a mesma tendência de deformação nas lajes estudadas.

6. *Conclusões e Desenvolvimentos Futuros*

6.1. Síntese das Principais Conclusões

No presente estudo, foram realizados ensaios em lajes de betão reforçado com fibras metálicas com o objetivo principal de estudar o fenómeno do *curling*. Um dos principais objetivos foi avaliar a influência dos parâmetros mais relevantes associados a este fenómeno, nomeadamente: i) humidade relativa e temperatura ambiente; ii) gradiente de temperatura e humidade na secção da laje; e iii) tipo de interface laje / sub-base. O programa experimental foi idealizado de forma a simular a prática corrente na construção deste tipo de pavimentos não aderentes, utilizados na reutilização e reparação de pavimentos existentes, considerando lajes de pequena espessura (5 cm) e a utilização de uma camada de areia e filme plástico na interface laje / sub-solo.

Neste capítulo, apresentam-se as principais conclusões extraídas ao longo deste estudo e são apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos de investigação não contempladas neste estudo

Com base nos resultados obtidos neste trabalho concluiu-se que as lajes que sofreram menores deformações foram aquelas em que se adotou na interface laje / sub-base um filme plástico. De igual modo se conclui que as lajes expostas a um ambiente mais controlado, com variações de humidade relativa e temperatura ambiente menores e em que se observaram menores gradientes de humidade e temperatura tiveram um comportamento mais estável.

As lajes em que foi adotada uma camada de areia na interface laje / sub-base apresentaram um comportamento instável e com diferenças entre elas relacionadas com o a humidade da camada de areia que variou ao longo do tempo de ensaio. Na laje L1A (laje do piso 0) observou-se uma secagem da camada de areia ao longo do programa experimental, associada a perda de areia nas suas extremidades, verificou-se uma deformação negativa nas suas extremidades (*downward curling*), com um valor final do deslocamento de -0.405 mm. Contrariamente, a laje L1B (laje do piso -1) com a sub-base de areia que permaneceu húmida apresentou uma deformação positiva (*upward curling*), com um valor final do deslocamento de +1.176 mm.

As lajes em que foi adotada um filme plástico na interface laje / sub-base apresentaram no final uma deformação residual. A laje L2A (piso 0) o valor do deslocamento final foi de +0.041mm e a laje L2B um valor de -0.089mm.

6.2. Desenvolvimentos Futuros

Tratando-se de uma trabalho experimental com as limitações a ele associadas limitou-se o número de parâmetros a avaliar, parâmetros esses que se concluiu terem grande importância para o estudo do fenômeno do *curling*. Com base nos resultados obtidos no presente estudo propõe-se para desenvolvimentos futuros os seguintes trabalhos:

- Instrumentação e monitorização de pavimentos executados no interior e exterior, desde a fase da construção até um período mínimo de um ano;
- Aplicação de modelos teóricos que tenham em conta o gradientes de humidade e temperatura e correspondente retração do betão, que permitam de uma forma simplificada quantificar as tensões internas induzidas no betão;
- Estudo experimental com diferentes composições de betão com diferentes reforços especialmente fibras metálicas, fibras de polipropileno e a utilização de soluções híbridas;
- Com base nos resultados experimentais obtidos neste trabalho e em estudos de outros autores o desenvolvimento de modelos numéricos que permitam simular o fenômeno do *curling*.

Bibliografia

ACI 302.1R-15, Guide to Concrete Floor and Slab Construction, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, U.S.A., 2015.

Antunes, A. e Barros, J., *Juntas em Pavimentos de Edifícios Industriais*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2003.

Arcelor Mittal, *Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) for industrial floors especially floors without joints and floors on piles - A Practical Guide*, Arcelor Mittal, Luxembourg, 2014.

Banthia, N., et al., *Curling Control in Concrete Slabs Using Fiber Reinforcement*, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 42, nº2, March, 2014.

Bissonnette, B., *Le fluage en traction: un aspect important de la problématique des réparations en béton - Thèse de doctorat*, Université Laval, Canadá, 1996.

Cement Concrete & Aggregates Australia, *Curling of Concrete Slabs*, Cement Concrete & Aggregates Australia, Australia, 2006.

Cristelli, R., *Pavimentos Industriais de Concreto: Análise do Sistema Construtivo*, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2010.

Fortin, C., *Curling and Strain Monitoring of Slabs Strips in a Laboratory Environment*, Master's Thesis, Université Laval, Québec, Canada, 2005.

Granja, J., et al., *Medição de humidade no betão: relatório final da tarefa 1, Relatório do projecto PTDC/ECM/099250/2008- Comportamento em serviço das estruturas de betão: uma abordagem multi-física das tensões auto-induzidas*, Fundação para a Ciência e Tecnologia, 2011.

Hiller, J., *Field Evaluation of Built-In Curling Levels in Rigid Pavements*, Minnesota Department of Transportation, Minnesota, U.S.A, 2011.

João, C.D., *Pavimentos Têrreos Industriais Aspetos Relevantes Ligados à Conceção, Dimensionamento e às Tecnologias De Execução*, Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2014.

Mailvaganam, N., *Construction Technology Updates: Curling of Concrete Slabs on Grade*, Institute for Research in Construction, nº 44, December, 2000.

Nassiri, S., *Establishing Permanent Curl/Warp Temperature Gradient in Jointed Plain Concrete Pavements*, University of Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., 2011.

- Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Pearson Education, Harlow, England, 2000.
- NP EN 12350-1, *Ensaaios do betão fresco - Parte 1: Amostragem*. Instituto Português da Qualidade, 2009.
- NP EN 12350-2, *Ensaaios do betão fresco - Parte 2: Ensaio de abaixamento*. Instituto Português da Qualidade, 2009.
- NP EN 12390-1, *Ensaaios do betão endurecido - Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*. Instituto Português da Qualidade, 2009.
- NP EN 12390-2, *Ensaaios do betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*. Instituto Português da Qualidade, 2009.
- NP EN 12390-3, *Ensaaios do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes*. Instituto Português de Qualidade, 2009.
- NP EN 12390-3, *Ensaaios do betão endurecido - Parte 5: Resistência à flexão dos provetes*. Instituto Português de Qualidade, 2009.
- NP EN 12390-13, *Ensaaios do betão endurecido - Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão*. Instituto Português de Qualidade, 2014.
- NP EN 12504-4, *Ensaaios do betão nas estruturas - Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons*, Instituto Português da Qualidade, 2007.
- National Ready Mixed Concrete Association, *Concrete in Practice – What, Why & How? CIP 19 – Curling of Concrete Slabs*, National Ready Mixed Concrete Association, U.S.A., 2004.
- Oleiro, J.M., *Mosaicos de Conímbriga encontrados durante as sondagens de 1899*, Conímbriga, 1973.
- Passos, M.T., *Pavimentos Têrreos Industriais em Betão Reforçado com Fibras de Aço*, Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2011.
- Ramseyer, C., *et al.*, *Dimensional Stability of Concrete Slabs on Grade*, Oklahoma Transportation Center: Economic Enhancement Through Infrastructure Stewardship, Oklahoma, U.S.A., 2012.
- Rao, S. e Roesler, J., *Characterization of Effective Built-in Curling and Concrete Pavement Cracking on the Palmdale Test Sections*, University of Illinois at Urbana – Champaign, Illinois, U.S.A., 2005.

Rodrigues, J.L., *Conceção de Pavimentos Rígidos*, Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2011.

Siddique, Z., *et al.*, *Temperature and Curling Measurements on Concrete Pavement*, Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Iowa State University, Iowa, U.S.A., 2005.

Suprenant, B.A., *Why Slabs Curl - Part I: A look at the curling mechanism and the effect of moisture and shrinkage gradients on the amount of curling*, Concrete International, March, 2002.

Ytterberg, R.F., *Control of shrinkage and curling in slabs on grade, Part 1: Shrinkage problems - Causes and cures*, The Aberdeen Group, 1992.

Ytterberg, R.F., *Control of shrinkage and curling in slabs on grade, Part 2: How to deal with warping and curling*, The Aberdeen Group, 1992.

Ytterberg, R.F., *Control of shrinkage and curling in slabs on grade, Part 3: How to control cracks*, The Aberdeen Group, 1993.