



Avaliação do comportamento estrutural de pré-lajes de betão com fibras sintéticas

Daniel Teixeira Fernandes Dias de Almeida

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Militar

Orientadores: Professor Doutor José Joaquim Costa Branco Oliveira Pedro

Professor Doutor João Pedro Lage da Costa Firmo

Outubro de 2023

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Para a realização deste trabalho, gostaria de agradecer, em primeiro lugar, à minha família pelo apoio ao longo de toda a minha vida, sendo essencial no meu percurso académico na Academia Militar e no Instituto Superior Técnico.

Expressar o meu enorme agradecimento aos orientadores, ao Professor Doutor José Oliveira Pedro e ao Professor Doutor João Pedro Lage da Costa Firmo, por toda a disponibilidade, dedicação e empenho, tirando-me todas as dúvidas que foram surgindo, por todo o conhecimento e capacidades técnicas e espírito crítico, que procuraram transmitir ao longo deste trabalho, sempre com o objetivo de melhorar o meu desempenho.

Agradeço também aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais, Sr. Jorge Pontes e Sr. Fernando Alves, pelas suas disponibilidades, prontidão e apoio na realização deste trabalho. Foram fundamentais em toda a campanha experimental, começando na betonagem e acabando na realização dos ensaios, a minha sincera gratidão.

Um agradecimento à SIKA Portugal pela disponibilização das fibras sintéticas.

Por fim, mas não menos importante, agradecer aos meus amigos e camaradas, com foco nos de Engenharia Militar e da Especialização de Estruturas, por me ouvirem sempre nos momentos mais difíceis, pelos conselhos, motivação e amizade demonstrados ao longo de todo o curso, a eles o meu profundo obrigado.

Resumo

O betão é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção. Pode combinar-se com outros materiais (como o aço) para compensar algumas das suas características menos vantajosas, como a sua reduzida resistência à tração e o comportamento pouco dúctil. Nas últimas décadas, tem-se assistido ao desenvolvimento de betões com incorporação de diferentes tipos de fibras, melhorando algumas dessas desvantagens e possibilitando a redução ou eliminação das armaduras convencionais.

Neste contexto, apresenta-se nesta dissertação um estudo experimental para avaliar a possibilidade de utilizar pré-lajes constituídas por betão com adição de fibras sintéticas como cofragens perdidas para a betonagem da laje de tabuleiro de uma ponte a construir em ambiente marítimo. Primeiramente determinaram-se as propriedades mecânicas de betão simples (como referência) e de betão com duas dosagens de fibras de poliolefinas (6 kg/m^3 e 10 kg/m^3). De seguida, foram realizados ensaios de flexão em pré-lajes constituídas pelos 3 tipos de betão com dimensões $100 \times 50 \times 5 \text{ cm}^3$ definidos a partir do caso de estudo, sujeitas a diferentes tipos de carregamento e condições de apoio, que, além de tentarem simular aproximadamente as ações a que serão sujeitas no caso de estudo, pretenderam simular outras possíveis aplicações.

Os resultados obtidos nos ensaios mostraram um aumento da carga máxima e da resistência residual pós-fissuração com o aumento da dosagem de fibras. Observou-se ainda que nas pré-lajes de betão com fibras foi possível atingir níveis de ductilidade consideráveis. Finalmente, concluiu-se que as pré-lajes estudadas apresentam uma resistência suficiente para suportar as ações impostas durante a fase de betonagem da laje do tabuleiro da ponte.

Palavras-chave: Betão reforçado com fibras, propriedades mecânicas, pré-lajes, ensaios de flexão.

Abstract

Concrete is one of the most widely used materials in the construction industry. It can be combined with other materials (such as steel) to compensate for some of its less advantageous characteristics, such as its low tensile strength and low ductile behaviour. The last few decades have seen the development of concrete incorporating different types of fibres, improving some of these disadvantages and making it possible to reduce or eliminate conventional reinforcement.

In this context, this dissertation presents an experimental study to assess the possibility of using pre-slabs made of concrete with added synthetic fibres as lost formwork for a concrete bridge deck to be built in a maritime environment. Firstly, the mechanical properties of plain concrete (as a reference) and concrete with two dosages of polyolefins fibres (6 kg/m^3 and 10 kg/m^3) were determined. Next, flexural tests were carried out on pre-slabs made of the 3 types of concrete with dimensions of $100 \times 50 \times 5 \text{ cm}^3$ defined from the case study, subjected to different types of loading and support conditions which, in addition to trying to approximately simulate the actions to which they will be subjected in the case study, were intended to simulate other possible applications.

The results obtained in the tests showed an increase in the maximum load and post-cracking residual strength as the fibre dosage increased. It was also observed that it was possible to achieve considerable levels of ductility in concrete pre-slabs with fibres. Finally, it was concluded that the pre-slabs studied have sufficient strength to withstand the actions imposed during the casting phase of the concrete bridge deck.

Keywords: Fibre-reinforced concrete, mechanical properties, pre-slabs, flexural tests.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XV
LISTA DE ACRÓNIMOS E SIGLAS.....	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO.....	1
1.2 OBJETIVOS GERAIS E METODOLOGIA.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	2
2. SOLUÇÕES DE BETÃO COM FIBRAS – ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	3
2.2 BETÃO COM INCORPORAÇÃO DE FIBRAS CURTAS.....	3
2.2.1 Tipos de fibras e suas propriedades.....	3
2.2.1.1 Fibras de aço.....	4
2.2.1.2 Fibras de carbono.....	5
2.2.1.3 Fibras sintéticas.....	5
2.2.2 Propriedades de betões com fibras.....	6
2.2.2.1 Estado fresco.....	6
2.2.2.2 Estado endurecido.....	7
2.2.3 Dimensionamento de elementos estruturais de betão com fibras segundo o fib Model Code 2010.....	12
2.2.3.1 Princípios de dimensionamento.....	12
2.2.3.2 Propriedades do material.....	13
2.2.3.3 Fatores de segurança parciais.....	15
2.2.3.4 Verificação da segurança (ELU) para lajes.....	16
2.2.3.5 Verificações de segurança em serviço (ELS) para lajes.....	18
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	21
3.1 ENQUADRAMENTO - CASO DE ESTUDO.....	21
3.2 OBJETIVOS E DESCRIÇÃO DAS SÉRIES EXPERIMENTAIS.....	22
3.3 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS.....	23
3.4 FABRICO DAS PRÉ-LAJES E PROVETES DE CARATERIZAÇÃO DO BETÃO.....	24
3.5 ENSAIOS DE CARATERIZAÇÃO DO BETÃO.....	26
3.5.1 Ensaios de compressão.....	26
3.5.2 Ensaios à compressão diametral.....	29
3.5.3 Ensaios de flexão.....	31
3.6 ENSAIOS DE FLEXÃO EM LAJES.....	35
3.6.1 Esquema de ensaio, instrumentação e procedimento.....	35
3.6.2 Resultados e discussão.....	41
3.6.2.1 Comportamento carga-deslocamento.....	41
3.6.2.2 Modos e cargas de rotura.....	46
3.6.2.3 Comparação com estimativas de resistência.....	51
3.7 ESPESURA MÁXIMA DA LAJE A BETONAR SOBRE AS PRÉ-LAJES.....	58
4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	61
4.1 CONCLUSÕES DO TRABALHO REALIZADO.....	61

4.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	ANEXOS.....	67
	ANEXO A – BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA	67
	ANEXO B – SIKAFIBRE T-48.....	71
	ANEXO C – RELATÓRIO DE ENSAIOS	73

Índice de Figuras

Figura 1 - Classificação das fibras segunda a norma NP EN 14889, adaptado de [3].	3
Figura 2 - Geometria das fibras de aço, adaptado de [15].	4
Figura 3 - Fibras de carbono curtas.	5
Figura 4 - Influência da percentagem de fibras na relação tensão de compressão-extensão, registada em ensaios de compressão em provetes de betão reforçado com fibras de aço, adaptado de [33].	7
Figura 5 - Relação carga-deslocamento num ensaio de tração uniaxial em provetes de betão reforçados com fibras de aço com controlo de deslocamentos, adaptado de [30].	8
Figura 6 - Influência da quantidade de fibras na relação carga-flecha em ensaios de flexão sob prismas (350 x 100 x 100 mm ³) de betão reforçado com fibras de aço, adaptado de [33].	9
Figura 7 - Relação força-deslocamento nos provetes reforçados com 30, 60, 90 kg/m ³ de fibras de aço, adaptado de [47].	11
Figura 8 - Principais diferenças entre BS e BRF sob compressão uniaxial, tanto com resistência normal como alta (retirado do fib Model Code 2010).	13
Figura 9 - Análise inversa de uma viga em flexão realizada para obter a relação entre tensão e abertura de fissuras (retirado do fib Model Code 2010).	14
Figura 10 - Setup requerido pela EN 14651 (dimensões em mm) (retirado do fib Model Code 2010).	15
Figura 11 - Curva Força-CMOD para BS (diagrama a tracejado) e BRF (diagrama contínuo) (retirado do fib Model Code 2010).	15
Figura 12 - ELU para o momento fletor e força axial: Utilização da relação simplificada entre tensão/deformação (retirado do fib Model Code 2010).	16
Figura 13 - Profundidade efetiva da laje considerando a penetração do apoio (dv) e a profundidade efetiva para os cálculos de flexão (d) (retirado do fib Model Code 2010).	17
Figura 14 - Área de tensão efetiva do betão numa laje (retirado do fib Model Code 2010).	18
Figura 15 - Secção transversal da ponte marítima em estudo.	21
Figura 16 - Produção do betão.	23
Figura 17 - SikaFiber T-48.	24
Figura 18 - Cofragens das pré-lajes e prismas.	24
Figura 19 - Betonagem.	25
Figura 20 - Aspeto final das pré-lajes após descofragem.	25
Figura 21 - Betonagem e descofragem dos provetes cúbicos e cilíndricos e provetes prismáticos.	26
Figura 22 - Máquina usada para os ensaios à compressão.	26
Figura 23 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (retirado da Norma NP EN 12390-3).	27
Figura 24 - Provetes cúbicos de betão simples (esquerda), com 6 kg/m ³ (centro) e 10kg/m ³ de fibras (direita) após ensaios de compressão.	28
Figura 25 - Exemplo do ensaio em provetes cilíndricos (retirado da norma NP EN 12390-6).	29
Figura 26 - Máquina de ensaio à compressão diametral e exemplo de um provete durante um ensaio.	29
Figura 27 - Provetes cilíndricos de betão simples (esquerda), com 6 kg/m ³ (centro) e 10kg/m ³ de fibras (direita) após ensaios de compressão diametral.	31
Figura 28 - Exemplo do ensaio em provetes prismáticos (retirado da norma NP EN 12390-5).	32
Figura 29 - Máquina usada para os ensaios à flexão.	32
Figura 30 - Resultados para os prismas BF0.	33
Figura 31 - Pós-ensaio dos prismas BF0.	33
Figura 32 - Resultados para os prismas BF6.	33
Figura 33 - Pós-ensaio dos prismas BF6.	34
Figura 34 - Resultados para os prismas BF10.	34
Figura 35 - Pós-ensaio dos prismas BF10.	34
Figura 36 - Montagem do Setup dos ensaios. A – apoios; B – transdutor para medição de deslocamentos.	36
Figura 37 - Montagem do pórtico. A – pórtico; B – macaco hidráulico; C – rótula; D – perfil metálico; E – pré-laje; F – célula de carga; G - transdutor para medição de deslocamentos (defletómetro).	36
Figura 38 - Célula de carga e macaco hidráulico, respetivamente, usados nos ensaios.	37
Figura 39 - Ligações das células de carga à datalogger e computador.	37

Figura 40 - Unidade de pressão hidráulica (para ligação ao macaco hidráulico).	37
Figura 41 - Esquema de ensaio do Setup 0.	38
Figura 42 - Dimensões em centímetros do Setup 0.	38
Figura 43 - Esquema de ensaio do Setup 1.	39
Figura 44 - Dimensões em centímetros do Setup 1.	39
Figura 45 - Esquema de ensaio do Setup 2.	39
Figura 46 - Dimensões em centímetros do Setup 2.	40
Figura 47 - Esquema de ensaio do Setup 3.	40
Figura 48 - Dimensões em centímetros do ensaio Setup 3 – identificação dos vãos (1-2 e 3-4).	40
Figura 49 - Comparação entre pré-lajes com quantidades de fibras diferentes para o Setup 0.	41
Figura 50 - Comparação entre as lajes com quantidades de fibras diferentes para o Setup 1.	42
Figura 51 - Comparação entre as lajes com quantidades de fibras diferentes para o Setup 2.	43
Figura 52 - Comparação do BF0 nos diferentes vãos (1-2 e 3-4) para o Setup 3.	44
Figura 53 - Comparação do BF6 nos diferentes vãos (1-2 e 3-4) para o Setup 3.	44
Figura 54 - Comparação do BF10 nos diferentes vãos (1-2 e 3-4) para o Setup 3.	45
Figura 55 - Rotura das pré-lajes de BF0 (esquerda), BF6 (centro) e BF10 (direita), respetivamente (Setup 0).	46
Figura 56 - Momentos no Setup 0.	47
Figura 57 - Rotura das pré-lajes de BF0 (esquerda), BF6 (centro) e BF10 (direita) no Setup 1.	48
Figura 58 - Momentos no Setup 1.	48
Figura 59 - Rotura das pré-lajes de BF0 (esquerda), BF6 (centro) e BF10 (direita) no Setup 2.	49
Figura 60 - Momentos no Setup 2.	49
Figura 61 - Rotura das pré-lajes de BF0 (esquerda), BF6 (centro) e BF10 (direita) no Setup 3.	50
Figura 62 - Momentos no Setup 3.	50
Figura 63 - Identificação do P1 experimental na pré-laje BF0 do Setup 3.	53
Figura 64 - Identificação do P1 experimental na pré-laje BF10 do Setup 3.	53
Figura 65 - Cálculo do M_{cr} com a carga P1.	54
Figura 66 - Cálculo do $M_{vão}$.	54
Figura 67 - Determinação do $M_{vão}$, fase 2 (Fase 2) para ΔP .	55
Figura 68 - Sobreposição de efeitos para a primeira hipótese no Setup 3.	55
Figura 69 - Determinação do P_{ult} no Setup 0.	57
Figura 70 - Relação do M_{cr} com o $M_{patamar}$ (Diagrama azul – distribuição elástica de esforços; Diagrama preto a tracejado – distribuição elástica com redistribuição de esforços do apoio para o vão).	57
Figura 71 - Momento máximo numa estrutura simplesmente apoiada com uma carga uniformemente distribuída.	58

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades de algumas fibras sintéticas, adaptado de [20].	6
Tabela 2 - Fatores de segurança parciais (retirado do fib Model Code 2010).	15
Tabela 3 - Valores para τ_{bm} , β e η_r para varões de aço nervurados (retirado do fib Model Code 2010).	19
Tabela 4 - Nomenclatura adotada para as pré-lajes em função do Setup e quantidade de fibras adicionadas.	23
Tabela 5 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão simples (28 dias, cura húmida).	27
Tabela 6 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão com 6 kg/m ³ fibras (28 dias, cura húmida).	27
Tabela 7 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão simples (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).	28
Tabela 8 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão com 6 kg/m ³ de fibras (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).	28
Tabela 9 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão com 10 kg/m ³ de fibras (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).	28
Tabela 10 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão simples (28 dias, cura húmida).	30
Tabela 11 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão com 6kg/m ³ de fibras (28 dias, cura húmida).	30
Tabela 12 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão simples (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).	30
Tabela 13 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão com 6kg/m ³ de fibras (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).	30
Tabela 14 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão com 10kg/m ³ de fibras (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).	31
Tabela 15 - Resultados da resistência à flexão em prismas.	35
Tabela 16 - Resultados no Setup 0.	42
Tabela 17 - Resultados no Setup 1.	42
Tabela 18 - Resultados no Setup 2.	43
Tabela 19 - Resultados no Setup 3.	45
Tabela 20 - Resumo dos resultados obtidos no Setup 0.	47
Tabela 21 - Resumo dos resultados obtidos no Setup 1.	48
Tabela 22 - Resumo dos resultados obtidos no Setup 2.	49
Tabela 23 - Resumo dos resultados obtidos no Setup 3.	50
Tabela 24 - Comparação da percentagem de recuperação de todos os Setups.	51
Tabela 25 - Comparação da ductilidade de todos os Setups.	51
Tabela 26 - Previsões da carga máxima obtida através das propriedades do betão dos cilindros e prismas para o Setup 0.	52
Tabela 27 - Previsão da carga máxima obtida através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0 para o Setup 1.	52
Tabela 28 - Previsão da carga máxima obtida através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0 para o Setup 2.	52
Tabela 29 - Valores de P1 através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.	54
Tabela 30 - Cálculo do $M_{vão}$, fase 1 através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.	55
Tabela 31 - Cálculo do ΔP através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.	56
Tabela 32 - P_{total} obtido através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.	56
Tabela 33 - Cálculo do $M_{patamar}$.	57
Tabela 34 - $P_{máx}$ obtido através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.	58
Tabela 35 - Determinação das espessuras máximas da laje a betonar.	59

Lista de Acrónimos e Siglas

BF0	Betão sem qualquer tipo de armadura ou fibras
BF10	Betão com incorporação de 10 kg/m ³ de fibras sintéticas
BF6	Betão com incorporação de 6 kg/m ³ de fibras sintéticas
BRF	Betão Reforçado com Fibras
BRFS	Betão Reforçado com Fibras Sintéticas
BS	Betão Simples
CMOD	Crack Mouth Open Displacement
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
Fib	The International Federation for Structural Concrete
IST	Instituto Superior Técnico
LERM	Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais
LP	Limite de Proporcionalidade

Lista de Símbolos

\emptyset_s	diâmetro dos varões de aço
h_{sp}	distância entre a ponta do entalhe e o topo do provete
$A_{c,ef}$	área efetiva do betão sob tensão
A_c	área da secção transversal do provete cúbico
A_{ct}	área em tração da secção transversal do betão
$A_{s,min}$	área mínima de armadura convencional em aço
A_s	área dos varões de aço
E_s	módulo de elasticidade do aço
F_j	carga correspondente ao $CMOD = CMOD_j$
K_{Rd}	fator calculado através de uma análise estrutural que tem em consideração uma redistribuição aleatória das propriedades mecânicas
M_{cr}	momento de fendilhação nas pré-lajes
$M_{patamar}$	momento residual instalado no apoio após a fissuração da pré-laje no <i>Setup 0</i>
$M_{vão}$	momento no vão calculado através da sobreposição de efeitos no <i>Setup 3</i>
P_1	carga após uma quebra no gráfico até atingir o $P_{máx}$ no <i>Setup 3</i>
P_{SLS}	carga de serviço máxima
P_{cr}	carga de fendilhação
$P_{máx,k}$	valor característico da capacidade de carga do elemento
$P_{máx,m}$	valor médio da capacidade de carga do elemento
$P_{máx}$	carga máxima atingida nos ensaios experimentais
P_{rd}	carga resistente
P_u	carga última

P_{ult}	carga máxima local da fase pós-fissuração, ou seja, carga última
V_{Ed}	esforço transversal atuante/força de corte de dimensionamento
$V_{Rd,F}$	resistência ao corte do betão reforçado com fibras
$V_{Rd,S}$	resistência ao corte proveniente dos estribos
V_{Rd}	esforço transversal resistente
b_0	perímetro de controlo da resistência ao corte
b_1	largura do provete
b_w	largura da alma
d_v	profundidade efetiva da resistência ao corte
f_{Ftsd}	valor de dimensionamento da resistência pós-fissuração para a abertura de fendas típicas de condições de serviço
f_{Ftud}	valor de dimensionamento da resistência pós-fissuração para a abertura de fendas típicas do estado limite último
f_{Ftsk}	valor característico de f_{Fts}
f_{Ftsm}	valor médio para a força residual do betão reforçado com fibras
f_{Ftuk}	valor característico da resistência à tração residual última do betão reforçado com fibras
f_{Ftum}	valor médio da resistência à tração residual última do betão reforçado com fibras
f_{R1}	resistência residual do betão reforçado com fibras para condições de serviço
f_{Rj}	resistência residual à tração por flexão correspondente ao $CMOD = CMOD_j$
f_c	resistência à compressão do provete cúbico
f_{cf}	tensão resistente à tração em flexão do provete prismático
f_{cfm}	tensão resistente à tração em flexão média dos provetes prismáticos
f_{ck}	resistência característica à compressão do betão
f_{cm}	resistência à compressão média dos provetes cúbicos
f_{ct}	resistência à rotura por tração do provete cilíndrico ou tensão resistente à tração do betão em flexão
f_{ctm}	valor médio da resistência à tração do betão
f_{yk}	resistência característica do aço
k_1	coeficiente que considera as tensões não uniformes de autoequilíbrio, levando a uma redução da força de fissuração
k_c	coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção transversal antes da fissuração e a alteração do braço de alavanca interno
$l_{s,máx}$	comprimento ao longo do qual ocorre o deslizamento entre o betão e o aço
w_d	comprimento de uma fenda em betões reforçados com fibras
γ_F	fator de segurança parcial para betões reforçados com fibras
γ_C	fator de segurança parcial para propriedades dos materiais de betão
$\delta_{P,máx}$	deslocamento para a carga máxima
δ_{SLS}	deslocamento na carga de serviço máxima
δ_{peak}	deslocamento na carga máxima

δ_u	deslocamento/deformação última
δ_{ult}	deslocamento último para a carga última
ε_{Fu}	tensão de rotura à tração no betão reforçado com fibras
ε_{cu}	tensão de rotura à compressão no betão reforçado com fibras
ε_{sh}	deformação por retração
ε_{su}	tensão de rotura à tração no aço
η_r	coeficiente para considerar a contribuição da retração
$\rho_{s,ef}$	rácio da armadura eficiente ($A_s/A_{c,ef}$)
σ_s	tensão de cedência do aço
σ_{sr}	tensão do aço na fissura sob a carga de fissuração
σ_t	tensão de tração
τ_{bm}	tensão de aderência dos varões de aço ao betão
φ_s	coeficiente de fluência
ΔP	diferença entre $P_{máx}$ e P_1 no <i>Setup 3</i>
F	carga
$P(f_{Fd})$	carga resistente calculada considerando a resistência de projeto do betão reforçado com fibras
c	recobrimento do betão
k	parâmetro empírico para ter em conta a influência do revestimento de betão
l	comprimento do vão
β	coeficiente empírico para avaliar a deformação média ao longo de $l_{s,máx}$ dependendo do tipo de carregamento
δ	flecha

1. Introdução

1.1 Enquadramento do trabalho

O betão revela-se um material altamente adaptável na construção de estruturas, desfrutando de uma ampla aplicabilidade. Isso advém, entre outros fatores, da sua capacidade de ser moldado em diversas formas e geometrias e ser combinado com outros materiais (e.g. aço em varão ou em fibras), melhorando o seu comportamento sob esforços de tração e ductilidade. Devido a esta adaptabilidade e ao seu custo relativamente reduzido, o betão, simples ou armado, é um dos materiais de construção mais utilizados em todo o mundo [1].

A incorporação de diferentes tipos de fibras em materiais de construção é algo que remonta aos primórdios da construção. A adição de palha na argila para fabricação de tijolos e a introdução de crinas de cavalo em argamassas, realizados pelos romanos, são exemplos ancestrais da utilização de fibras. Um testemunho do uso ancestral destas fibras é também evidenciado na construção de estruturas de adobe, que persiste até os dias atuais [2]. A partir da década de 1960, as pesquisas sobre Betões Reforçados com Fibras (BRF) aumentaram consideravelmente em termos de intensidade e foco. O BRF consiste na combinação de betão simples (BS) com fibras aleatoriamente dispersas que podem ser de diferentes tipos, nomeadamente metálicas, sintéticas, de carbono, entre outras. A inclusão destas fibras tem como principal objetivo melhorar o comportamento do betão quando sujeito a tensões de tração [3]. Quando ocorre a fissuração do betão, as fibras permitem que as tensões de tração sejam transferidas através delas, o que resulta numa maior capacidade de deformação após se atingir a tensão máxima à tração (i.e. diminuição do comportamento frágil). A ação das fibras contribui, portanto, para um melhor comportamento do betão em estado fissurado [4].

O Betão Reforçado com Fibras Sintéticas (BRFS) é um dos tipos de BRF no qual são incorporadas fibras de base sintética, por exemplo as de polipropileno, polietileno, poliolefinas, entre outras. As fibras sintéticas, tal como as dos restantes tipos, permitem melhorar o comportamento do betão em estado fissurado, em particular aumentando a sua capacidade de deformação e de absorver energia [3,5]. A inclusão destas fibras na mistura do betão proporciona ainda vantagens significativas em termos de desempenho e durabilidade, contribuindo assim para a constante evolução das técnicas de construção [6]. As principais vantagens deste tipo de fibras em relação às fibras convencionais (aço) são: a) uma maior resistência à corrosão, b) o seu reduzido peso, c) uma melhor aderência ao betão e d) um melhor controlo da abertura de fissuras. Este tipo de betão com fibras tem sido usado em diversos contextos da construção, como em pavimentos industriais, revestimento de túneis, componentes pré-fabricados e outros elementos estruturais [5].

A realização da presente dissertação surge no contexto do crescente desenvolvimento e procura da tecnologia de betão com incorporação de fibras sintéticas para aplicações em ambientes de elevada agressividade, onde o uso de fibras metálicas, suscetíveis à corrosão, pode comprometer a durabilidade dos elementos. O estudo experimental desenvolvido nesta dissertação teve origem num caso de estudo real em que uma empresa de construção pretendia avaliar a possibilidade de utilizar pré-lajes de betão com incorporação de fibras sintéticas como cofragem perdida (não colaborante) na betonagem *in situ* de uma laje de um tabuleiro de uma ponte construída em ambiente marítimo.

1.2 Objetivos gerais e metodologia

Tendo em conta o contexto enquadrador referido na secção anterior, esta dissertação tem como objetivo principal estudar o comportamento mecânico de pré-lajes de betão com adição de fibras sintéticas, de reduzida espessura (5 cm) e sem qualquer tipo de armadura ordinária, com vista à utilização como cofragem perdida para tabuleiros de pontes. Para tal, foi concebido um programa experimental que incluiu os seguintes tipos de ensaio:

- Ensaios de caracterização das propriedades mecânicas à compressão, tração e flexão de provetes de betão simples (como referência) e de BRFS com duas dosagens de fibras sintéticas (6 kg/m³ e 10 kg/m³);
- Ensaios de flexão em pré-lajes constituídas pelos 3 tipos de betão mencionados e com dimensões definidas de acordo os requisitos geométricos do projeto que originou o presente estudo (100 × 50 × 5 cm³, comprimento × largura × espessura), sujeitas a diferentes tipos de carregamento e condições de apoio, que, além de tentarem simular aproximadamente as ações a que serão sujeitas no caso de estudo real, pretenderam simular outras possíveis aplicações.

Após a realização dos ensaios referidos acima, pretendeu-se verificar a possibilidade de estimar a resistência à flexão das pré-lajes ensaiadas através de cálculos expeditos/simplificados, utilizando as propriedades dos materiais obtidas nos ensaios de caracterização.

1.3 Organização do documento

O presente trabalho está dividido em 4 capítulos. O presente capítulo introduz o tema da dissertação, apresenta os objetivos gerais, a metodologia adotada para atingir esses objetivos e descreve a organização do documento.

O segundo capítulo resume o Estado da Arte sobre Betão Reforçado com Fibras. Aborda conceitos sobre o tipo de fibras e suas propriedades, bem como de betão com incorporação de fibras curtas, seguindo-se a apresentação dos princípios de dimensionamento de elementos estruturais em betão com fibras segundo o *fib Model Code 2010*.

O terceiro capítulo inicia-se com a descrição do caso de estudo real que originou a realização desta dissertação, seguindo-se a descrição da campanha experimental realizada, em que se definem as várias séries experimentais, descrevem-se os materiais e os respetivos ensaios de caracterização. Seguidamente são apresentados os ensaios de flexão realizados às pré-lajes, em que se descrevem os diferentes esquemas de ensaios e procedimento experimental. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, comparando-se igualmente as resistências obtidas com as previstas através de cálculos simplificados.

O quarto e último capítulo resume as conclusões obtidas e apresenta possíveis desenvolvimentos futuros decorrentes da realização do presente trabalho.

2. Soluções de betão com fibras – Estado da Arte

2.1 Considerações gerais

O betão é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção para diferentes fins (estruturais e não estruturais), devido à sua versatilidade, em particular pelo facto de se poder combinar com outros materiais (como o aço) para compensar algumas das suas características menos vantajosas (e.g. reduzida resistência à tração e comportamento frágil).

A incorporação de diferentes tipos de fibras na sua composição também permite superar algumas dessas fragilidades, contribuir para a redução da quantidade de armaduras convencionais e, em alguns casos particulares, dispensar a utilização destas [7].

2.2 Betão com incorporação de fibras curtas

Um dos principais benefícios da incorporação de fibras curtas no betão é o aumento da resistência à tração, o que contribui para mitigar a ocorrência de fissuração e reduzir a sua abertura. Além disso, as fibras adicionadas permitem melhorar o desempenho do material em compressão, a resistência ao choque, resistência ao impacto, à abrasão e ao fogo [8].

Quando formulados e produzidos adequadamente, os betões reforçados com fibras curtas apresentam elevada durabilidade, sendo amplamente utilizados em pisos industriais, componentes pré-fabricados (incluindo para aplicações estruturais) e revestimento de túneis [9].

2.2.1 Tipos de fibras e suas propriedades

A incorporação de fibras no betão é considerada um reforço estrutural quando contribui para a capacidade de suporte de carga de um elemento de betão [3]. Deste modo, foi criada uma norma nacional com enquadramento europeu - NP EN 14889 (2008) - que abrange diferentes tipos de fibras para serem incorporadas no betão, sendo classificadas em grupos distintos, como mostra a seguinte Figura:

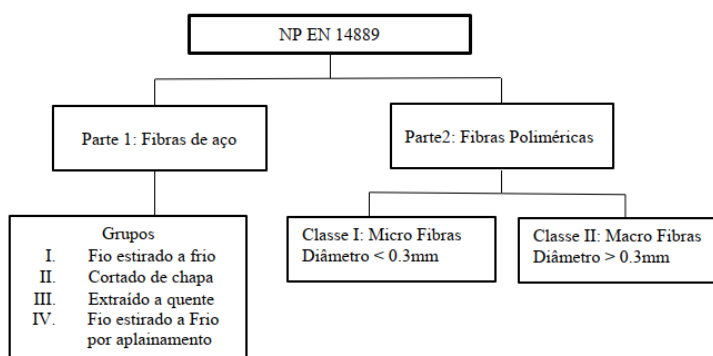


Figura 1 - Classificação das fibras segunda a norma NP EN 14889, adaptado de [3].

Um dos aspetos cruciais para o bom desempenho mecânico do betão com fibras é garantir uma adequada ligação entre os dois materiais, por este motivo, têm sido realizados estudos que

visaram melhorar a interação entre a fibra e matriz (i.e. o betão) através dos seguintes processos [10,11]:

- Aumentar a rugosidade da fibra;
- Realizar torções na fibra ao longo do seu comprimento;
- Alterar a forma da fibra para criar conexões mecânicas nas extremidades (zona de ancoragem);
- Promover deformações ao longo da extensão da fibra, como indentação ou frisagem;
- Aplicar processos micromecânicos à superfície da fibra, como tratamento químico de cauterização ou tratamento por plasma.

2.2.1.1 Fibras de aço

As fibras de aço para incorporação no betão fresco podem apresentar diferentes formas e serem constituídas por diferentes tipos de aço [13, 14]. Em relação à sua forma, as geometrias mais comuns são as ilustradas na Figura 2. As que possuem ganchos nas extremidades apresentam uma melhor ligação ao betão, pois é necessária uma quantidade maior de energia para arrancá-las da matriz cimentícia [15].

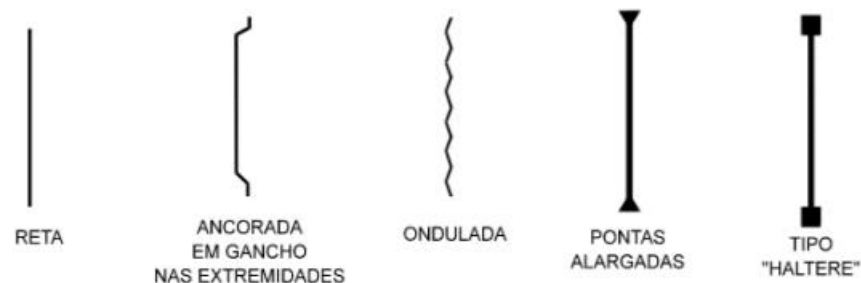


Figura 2 - Geometria das fibras de aço, adaptado de [15].

O comprimento médio das fibras de aço pode variar de 6 a 70 mm, e o seu diâmetro fica dentro da faixa de 0,1 a 1 milímetro [16,20].

Relativamente às propriedades mecânicas mais relevantes, destaca-se a sua elevada resistência à tração (500-2600 MPa) e o seu módulo de elasticidade (210 GPa) [17,20].

Estudos comparativos recentes demonstram que ao aumentar a quantidade de fibras de aço no betão, é possível obter uma distribuição mais equilibrada das tensões, devido ao facto de se obterem fendas de menor abertura e mais uniformemente distribuídas ao longo das peças; por outras palavras, em betões com fibras, verificam-se danos mais distribuídos (em vez de danos mais concentrados com a formação de “macro-fendas”, típico de elementos de betão simples) [15].

Relativamente ao fenómeno da corrosão, tem sido observado que a corrosão das fibras de aço apresenta menores consequências estruturais do que a corrosão das armaduras convencionais do betão armado [15].

As fibras de aço são frequentemente utilizadas em pavimentos de edifícios industriais e em estruturas de suporte em túneis. As vantagens dessas fibras podem ser enumeradas sob dois pontos de vista. Em termos económicos, apesar do custo de betão com fibras de aço ser superior ao de betão convencional, verifica-se que pode conduzir a uma redução da quantidade de armaduras

convencionais, e, com isso, a uma redução na mão de obra necessária à preparação de armaduras, contribuindo igualmente para a redução do tempo de execução. Do ponto de vista técnico, destaca-se o reforço homogêneo proporcionado pelas fibras, melhoria generalizada do comportamento do betão em estado fissurado, em particular da sua ductilidade [18].

2.2.1.2 *Fibras de carbono*

As fibras de carbono (Figura 3) têm sido cada vez mais utilizadas na indústria da construção devido às seguintes propriedades/características [19]:

- Resistência à tração muito elevada (1800 - 2600 MPa) [20];
- Peso específico reduzido;
- Elevada resistência química a agentes agressivos (i.e. elevada durabilidade);
- Coeficiente de dilatação térmica reduzido;
- Elevado módulo de elasticidade (230 - 380 GPa) [20].

O diâmetro de uma fibra de carbono pode variar entre 7-18 μm e o seu comprimento entre 2 - 100 mm [20,21].



Figura 3 - Fibras de carbono curtas.

Alguns estudos concluíram que o aumento da quantidade de fibras de carbono não tem impacto adverso na resistência à segregação do betão [22]; quanto à fadiga, as fibras de carbono exercem um efeito positivo [23]; relativamente ao seu comportamento face a ações dinâmicas, betões reforçados com fibras de carbono absorvem mais eficazmente ondas sonoras, propriedade útil para reduzir os níveis de ruído, como por exemplo, na produção de barreiras sonoras em linhas de comboio de alta velocidade [24].

2.2.1.3 *Fibras sintéticas*

Esta variedade de fibras é fabricada em fios individuais de secção circular ou retangular. De entre o grupo de fibras sintéticas destacam-se as fibras à base de poliéster, polipropileno, polietileno, poliamida, aramida e poliolefinas [18,25]. A seguinte Tabela resume as principais propriedades mecânicas das fibras sintéticas mais comuns.

Tabela 1 - Propriedades de algumas fibras sintéticas, adaptado de [20].

Tipo de fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Diâmetro (µm)
Aramida	2700 - 3100	62 - 120	10 - 12
Poliamida	700 - 1000	3,9 - 6,0	10 - 50
Poliéster	280 - 1200	10 - 18	10 - 80
Polietileno	80 - 600	2,0 - 5,0	25 - 1000
Polipropileno	450 - 700	3,5 - 5,2	20 - 200
Poliolefinas	275 - 600	2,5 - 9,0	500 - 900

A adição deste tipo de fibras ao betão tem sido alvo de estudos relativamente à melhoria de algumas propriedades mecânicas. No entanto, verificou-se que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade não apresenta grandes variações com a adição deste tipo de fibras. Este tipo de fibras possuem um comprimento entre 20 e 60 mm [25].

As fibras sintéticas têm recebido cada vez mais atenção tanto da comunidade científica como da indústria de construção devido às suas vantagens em termos de sustentabilidade comparativamente às fibras de aço [26]. Atualmente, há uma crescente investigação sobre as fibras sintéticas, especialmente no uso de fibras de polipropileno com vista a melhorar o desempenho de estruturas de betão em situação de incêndio. Os estudos têm revelado resultados positivos, uma vez que a adição dessas fibras permite mitigar a ocorrência de *spalling* explosivo em betões expostos a altas temperaturas [15]. As fibras de polipropileno estabilizadas contra a oxidação e revestidas com um agente dispersante, que permita uma boa dispersão, representam o tipo de fibra mais eficaz para combater o *spalling* explosivo [27]. As fibras ao fundirem-se pelo efeito da temperatura formam um sistema de canais interconectados que permitem aliviar as pressões internas do vapor de água gerado durante a exposição do betão a um incêndio. Os estudos realizados neste tema têm mostrado que quantas mais fibras forem adicionadas ao betão, mais vias interconectadas haverá para permitir a fuga do vapor [28], reduzindo a possibilidade de ocorrência de *spalling* explosivo.

2.2.2 Propriedades de betões com fibras

2.2.2.1 Estado fresco

As características do betão com fibras no estado fresco são afetadas pela quantidade e forma das fibras incorporadas, bem como pela composição do próprio betão [29].

Relativamente à quantidade de fibras, em geral, existe uma redução da trabalhabilidade do betão com o aumento da quantidade de fibras. Quanto à sua geometria, é importante utilizar fibras de tamanho e forma adequados à composição do betão de forma a não comprometer uma apropriada trabalhabilidade e não promover segregação [29,30].

Em geral, a trabalhabilidade do betão com fibras é menor comparativamente à do betão sem fibras. No entanto, durante a fase de vibração, é importante que não seja exagerada, pois as fibras têm tendência a alinhar-se de acordo com direções preferenciais, o que não é benéfico, pois pretende-

se que apresentem direções aleatórias para melhorar as propriedades do betão em todas as direções. Este fenómeno de alinhamento de fibras pode ser influenciado por vários fatores, como a proximidade da cofragem, a intensidade da vibração e a altura da queda do betão [29].

Quando usadas em grandes quantidades, as fibras longas e finas têm uma maior tendência para formar aglomerados do que as fibras curtas e mais esbeltas [29].

2.2.2.2 Estado endurecido

As características do betão com fibras no estado endurecido são influenciadas pela composição do próprio betão e pelas características do tipo, orientação e quantidade de fibras introduzidas. A inclusão de fibras no betão manifesta-se, sobretudo, num aumento da capacidade de deformação após se atingirem as tensões máximas de compressão ou tração, ou seja, na fase amolecimento (*softening*) do betão. A amplitude desse efeito é influenciada pela qualidade da aderência entre as fibras e o betão, bem como pela quantidade de fibras utilizadas. Nas subsecções seguintes descreve-se com maior detalhe o efeito da inclusão de fibras curtas em diferentes propriedades do betão em estado endurecido [29].

- Compressão

Em geral, a resistência à compressão tende a aumentar ligeiramente com a adição de fibras [30]. Além disso, observa-se que fibras com melhor aderência à matriz, como aquelas com extremidades dobradas ou alargadas, originam um maior aumento na resistência à compressão [31,32]. Quando as fibras são mais numerosas, finas e possuem melhores propriedades de aderência à matriz, a extensão correspondente à resistência à compressão também apresenta um ligeiro aumento. No entanto, e tal como se observa na Figura 4, é após o ponto de tensão máxima que o efeito das fibras se torna mais evidente no comportamento do betão à compressão. Nessa fase de amolecimento, quanto maior for a quantidade de fibras mais gradual será a redução de tensão e maior será a capacidade de deformação (máxima) [30,33].

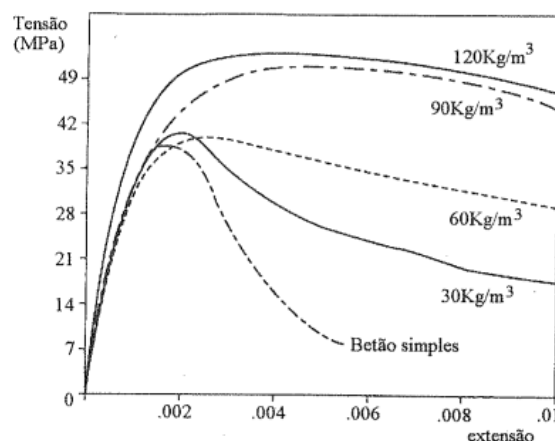


Figura 4 - Influência da percentagem de fibras na relação tensão de compressão-extensão, registada em ensaios de compressão em provetes de betão reforçado com fibras de aço, adaptado de [33].

O aumento da capacidade de deformação decorrente da adição de fibras não é somente influenciado pelas características das próprias fibras, mas também pelas propriedades da matriz na

qual elas estão incorporadas. Isso ocorre porque a quantidade de fibras necessárias para se atingir uma determinada capacidade de deformação do material será tanto maior quanto mais resistente e rígida for a matriz. Em outras palavras, quanto mais resistente e rígida for a matriz, maior será a quantidade de fibras necessárias para se obter uma melhoria significativa na fase amolecimento do material reforçado [30,34].

- Tração uniaxial

Em dosagens de fibras de aço superiores a 2% em volume, o aumento de tensão resistente à tração do betão pode ser significativo, sendo possível aumentar 30% a 40% em relação ao betão simples. No entanto, é importante realçar que esse aumento depende da quantidade de fibras posicionadas ao longo da direção de tração e da composição geral do betão utilizado [29,31].

Na Figura 5 representa-se a relação carga-deslocamento de um ensaio de tração uniaxial num provete de betão reforçado com fibras de aço. A resposta destes provetes, comparativamente aos de betão simples, apresenta um comportamento não linear mais evidente entre o Limite de Proporcionalidade (LP) e o ponto de máxima carga (II); um ramo descendente de menor declive (III), e uma deformação última (δ_u) mais elevada. A presença de fibras que atravessam microfendas distribuídas no betão também confere resistência ao fecho destas (i.e. afeta a resposta em fase de descarga). Como resultado, o betão reforçado com fibras apresenta uma capacidade maior de deformação residual em comparação com o betão simples. Isso significa que o material reforçado com fibras tem uma maior capacidade de resistir às deformações permanentes após a ocorrência de carregamentos ou processos de fissuração [30].

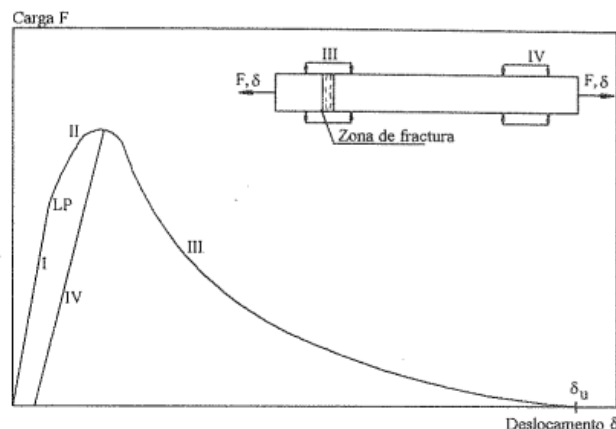


Figura 5 - Relação carga-deslocamento num ensaio de tração uniaxial em provetes de betão reforçados com fibras de aço com controlo de deslocamentos, adaptado de [30].

A resistência à tração de betões com fibras depende igualmente do método de produção, em particular do número de fibras alinhadas segundo a direção das tensões de tração. No entanto, como as direções das tensões de tração podem variar ao longo de um elemento estrutural, é mais usual utilizarem-se fibras aleatoriamente distribuídas. Para uma percentagem de 5% de fibras de vidro, podem ser obtidos valores entre os 9 e 12 MPa para betão projetado [35]. Para betões com uma percentagem de 8% em volume de fibras de vidro são obtidos valores de resistência à tração na ordem dos 20 MPa [36].

- Flexão

A adição de fibras ao betão, e em particular a sua contribuição para o comportamento em tração, pode alterar a distribuição de tensões numa secção transversal sujeita à flexão, o que resulta no deslocamento do eixo neutro para a zona comprimida. Isso ocorre porque as fibras continuam a contribuir em tração para o equilíbrio da secção mesmo após se ter atingido a tensão de rotura (à tração) do betão [29,39,40].

Tal como era expectável, com o aumento da quantidade de fibras, a resistência do betão à tração (em flexão) também aumenta, tal como se observa na Figura 6, onde se ilustra diagramas carga-flecha ($F-\delta$) resultantes de ensaio de flexão realizados em amostras de betão reforçadas com diferentes quantidades de fibras de aço.

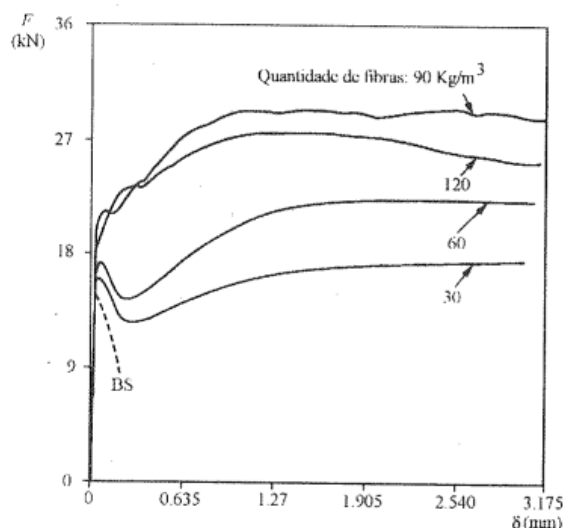


Figura 6 - Influência da quantidade de fibras na relação carga-flecha em ensaios de flexão sob prismas ($350 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$) de betão reforçado com fibras de aço, adaptado de [33].

- Corte

O modo de rotura por corte em estruturas de betão é considerado frágil e, portanto, deve ser evitado. Para evitar esse tipo de falha, é comum dimensionar armaduras específicas para esse efeito, no entanto, em algumas situações, a colocação dessas armaduras e a betonagem dos elementos pode ser difícil e dispendiosa, sobretudo em elementos de reduzida espessura e/ou com alta densidade de armadura. Nesses cenários, o recurso a fibras pode substituir, pelo menos parcialmente, a necessidade de armadura específica para esforços de corte. As fibras de reforço podem assumir parte da responsabilidade de absorver os esforços de corte, permitindo uma melhoria na prática e economia na construção [30].

Os resultados disponíveis na literatura mostram que a utilização de 1% de fibras em volume permite aumentar a resistência ao corte até 30%, mas que esse aumento depende do tipo de ensaio utilizado para a sua determinação e da disposição das fibras na superfície de rotura por corte [29,41].

- Fadiga e impacto

O aumento da resistência à fadiga com a inclusão de fibras é uma das principais razões do uso de betão reforçado com fibras em pavimentos que são sujeitos a um elevado número de ciclos de carga, como pavimentos de edifícios industriais, aeroportos e estradas [30]. O aumento da resistência à fadiga é proporcional à quantidade e esbelteza das fibras e faz diminuir a abertura de fendas sob a ação das cargas [29].

A resistência ao impacto também aumenta com a percentagem das fibras, especialmente se forem de aço e de extremidades dobradas. A orientação das fibras também é um fator importante no aumento da resistência ao impacto [42].

- Fluência e retração

A deformação, por fluência ou retração, diminui com o aumento da percentagem de fibras, sendo pouco relevante a influência da forma das fibras [43,44]. No entanto, verifica-se que percentagens inferiores a 1% (em volume) não têm uma influência significativa na fluência e retração do betão [29].

- Módulo de elasticidade e Coeficiente de Poisson

A incorporação de fibras em quantidades comuns (cerca de 2% em volume) não causa alterações significativas no Módulo de Elasticidade nem no Coeficiente de Poisson do betão [29].

- Absorção de energia

A adição de fibras ao betão tem um impacto particularmente positivo na capacidade de absorção de energia. Isso ocorre porque a energia necessária para superar os mecanismos de reforço das fibras, que surgem após o aparecimento de fendas na matriz, é significativamente maior do que a energia dissipada durante a fratura da mesma [38,45,46]. A capacidade de absorção de energia aumenta com a percentagem, esbelteza e grau de fixação das fibras à matriz. O comprimento da fibra influencia esta propriedade, pois interfere no mecanismo de deslizamento das fibras que é responsável por absorver a energia da fissuração [30].

Os estudos realizados sobre este assunto têm utilizado testes de flexão para avaliar a capacidade de absorção de energia em betões reforçados com fibras de aço. A Figura a seguir ilustra a relação entre a força aplicada e o deslocamento em provetes reforçados com 30, 60 e 90 kg/m³ de fibras de aço [47]:

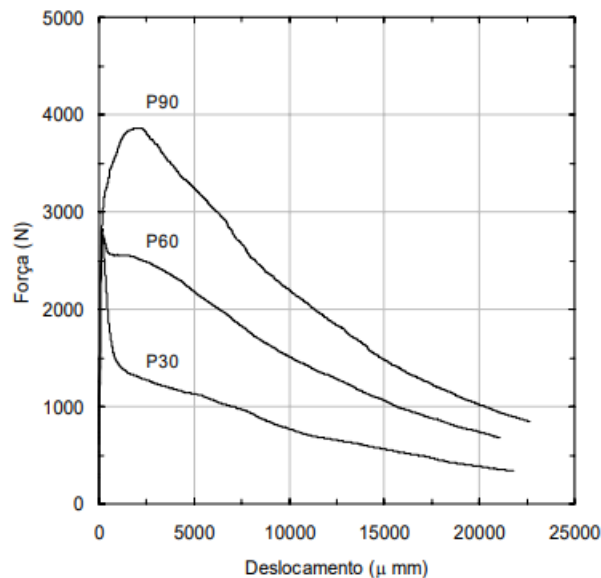


Figura 7 - Relação força-deslocamento nos provetes reforçados com 30, 60, 90 kg/m³ de fibras de aço, adaptado de [47].

Nesta Figura observa-se que tanto a carga máxima como a capacidade de absorção de energia (relacionada com a área abaixo das curvas) aumentam significativamente com a quantidade de fibras (neste exemplo aumentam de 30 para 90 kg/m³ [47].

- Durabilidade

A durabilidade do BRF depende, em grande medida, do tipo de fibra utilizada. As fibras metálicas e sintéticas asseguram uma maior durabilidade que as fibras naturais e de vidro, pois as fibras de vidro, sem qualquer proteção, degradam-se em meios alcalinos [30].

Relativamente às fibras de aço, com exceção das metálicas amorfas e das galvanizadas [48], quando sujeitas a agentes agressivos podem apresentar corrosão significativa, tal como as armaduras convencionais [30]. No entanto, ensaios para avaliação do efeito da corrosão em fibras de aço e de sua implicação na ductilidade e resistência de provetes submetidos a diversas condições de agressividade mostraram um bom desempenho do betão com este tipo de fibras, especialmente em provetes com fendas de abertura inferior a 0,2 mm [49]. Contudo, em ambientes agressivos, a corrosão das fibras pode causar uma redução significativa na sua resistência e ductilidade [50]. Se o mecanismo de rotura for o deslizamento das fibras, o decréscimo da resistência e da ductilidade devido à corrosão das fibras será menor em comparação com betões que rompem por cedência das fibras ou em betões reforçados com armaduras convencionais. Isso ocorre porque a diminuição do diâmetro das fibras devido à corrosão não afeta, significativamente, os mecanismos de deslizamento, desde que a corrosão não comprometa a capacidade resistente da interface fibra-matriz.

A durabilidade dos BRF sujeitos à ação de gelo-degelo é melhorada relativamente à dos betões convencionais (i.e. sem fibras), pois as fibras reduzem a eventual fissuração que é gerada pelo aumento de volume da água quando passa do estado líquido ao sólido [51].

A degradação ao longo do tempo das propriedades de betões com fibras de vidro [45,52,53,54] é atribuída à combinação de dois fatores principais. O primeiro é a agressividade química de meios de alto teor alcalino, típica em misturas à base de cimento *Portland*. O segundo fator é a redução da ductilidade devido à deposição e fixação de produtos hidratados do cimento, especialmente hidróxidos de cálcio, na zona de transição entre a fibra e a matriz, resultando numa microestrutura rígida [55]. Existem três principais abordagens para aumentar a durabilidade de betões reforçados com fibras de vidro. A primeira é reduzir a agressividade química da matriz de cimento, através do uso de aditivos específicos para esse efeito ou controlar a relação água-cimento; a segunda é proteger a superfície das fibras, através de revestimentos protetores; a terceira abordagem é melhorar a estabilidade química das fibras de vidro por meio da sua própria composição. Estas medidas visam preservar as propriedades e aumentar a durabilidade de betões reforçados com fibras de vidro em ambientes agressivos [30].

2.2.3 Dimensionamento de elementos estruturais de betão com fibras segundo o *fib Model Code 2010*

Segundo o *fib Model Code 2010*, o BRF é um material compósito caracterizado por uma matriz cimentícia e fibras discretas (descontínuas). Materiais de fibras com um módulo de Young significativamente afetados pelo tempo e/ou fenómenos termo-higrométricos não estão abrangidos por este código. Refira-se que no caso de betões com fibras orgânicas ou naturais, o comportamento a longo prazo pode ser afetado por fluência adicional causada pelas próprias fibras.

Os capítulos relevantes no *fib Model Code 2010* sobre este tema são os seguintes:

- Capítulo 5.6 - Fibras / Betão Reforçado com Fibras, relativamente aos aspetos do material e valores de projeto;
- Capítulo 7.7 - Verificação de segurança e manutenção de estruturas de Betão Reforçado com Fibras, cobrindo aspetos de projeto estrutural.

2.2.3.1 Princípios de dimensionamento

Os princípios de dimensionamento do *fib Model Code* foram desenvolvidos, na sua maioria, com base no conhecido disponível sobre betão reforçado com fibras de aço.

O dimensionamento estrutural deve satisfazer os requisitos de resistência e de comportamento em serviço para a vida útil alvo dos elementos de BRF.

Para todas as estruturas de BRF sem o reforço convencional mínimo, uma das seguintes condições deve ser satisfeita:

- $\delta_u \geq 20 \delta_{SLS}$;
- $\delta_{peak} \geq 5 \delta_{SLS}$.

Onde δ_u é o deslocamento último, δ_{peak} é o deslocamento na carga máxima e δ_{SLS} é o deslocamento na carga de serviço máxima calculado através de uma análise elástica linear, e assumindo o betão não fissurado (i.e. considerando o módulo de elasticidade inicial).

Normalmente, δ_u está relacionado com o requisito de deformação máxima da estrutura, com controlo da ductilidade. A carga última, P_u , deve ser sempre superior à carga na iniciação da fissuração, P_{cr} , e superior à carga de serviço máxima, P_{SLs} .

Quando a estrutura é capaz de redistribuir significativamente as cargas aplicadas na iminência da rotura, um fator K_{Rd} , que leva em conta os efeitos favoráveis devido à redistribuição, pode ser considerado da seguinte forma:

$$P_{Rd} = K_{Rd} * P(f_{Fd}) \quad (2.1)$$

Onde $P(f_{Fd})$ é a carga resistente calculada tendo em conta a resistência de projeto do betão reforçado com fibras e K_{Rd} pode ser calculado através de uma análise estrutural que tem em consideração uma redistribuição aleatória das propriedades mecânicas. Através da distribuição estatística de capacidade de carga do elemento ($P_{máx}$) a partir de um desvio padrão assumido na lei constitutiva mecânica, o fator K_{Rd} pode ser calculado através de:

$$K_{Rd} = \frac{P_{máx,k} f_{Ftum}}{P_{máx,m} f_{Ftuk}} \leq 1,4 \quad (2.2)$$

Onde:

- $P_{máx,k}$ é o valor característico da capacidade de carga do elemento;
- $P_{máx,m}$ é o valor médio da capacidade de carga do elemento;
- f_{Ftuk} é o valor característico da resistência à tração residual última do BRF;
- f_{Ftum} é o valor médio da resistência à tração residual última do BRF.

2.2.3.2 Propriedades do material

- Comportamento à compressão

De uma forma geral, o potencial aumento da resistência à compressão pela incorporação de fibras é desprezado no *Model Code*, tal como mostra na seguinte Figura.

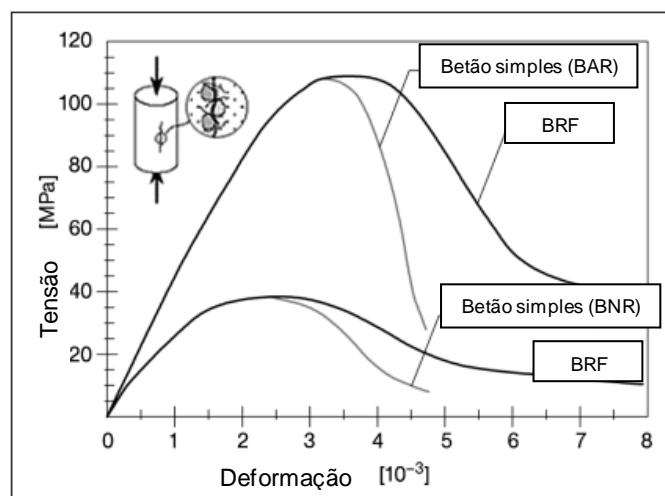


Figura 8 - Principais diferenças entre BS e BRF sob compressão uniaxial, tanto com resistência normal como alta (retirado do fib Model Code 2010).

- Comportamento à tração

No que diz respeito ao comportamento à tração, que é o aspecto mais importante do BRF, existem vários métodos de ensaio possíveis, embora o *fib Model Code 2010* sugira a utilização de ensaios de tração em flexão em que são obtidas relações carga-deslocamento. Através dessas relações é possível derivar as relações entre tensão e abertura de fissuras através de uma análise inversa, realizando cálculos de equilíbrio para várias aberturas de fissuras, conforme ilustrado na Figura 9.

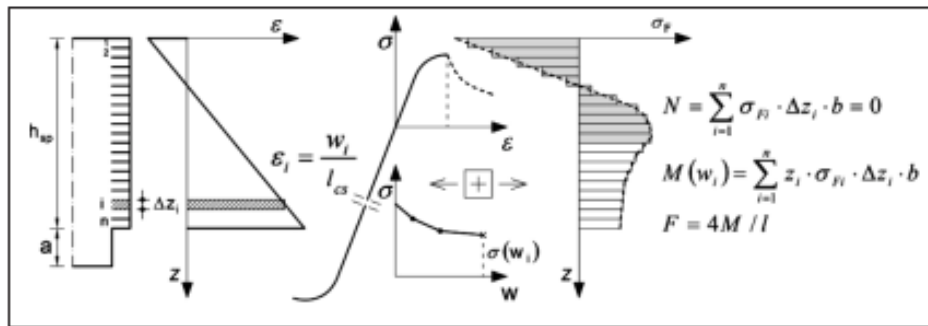


Figura 9 - Análise inversa de uma viga em flexão realizada para obter a relação entre tensão e abertura de fissuras (retirado do *fib Model Code 2010*).

Os valores nominais das propriedades dos materiais podem ser determinados realizando um ensaio de flexão em três pontos numa viga com entalhe a meio vão de acordo com a norma EN 14651 (Figura 10). O diagrama da força aplicada (F) vs. deformação deve ser produzido (Figura 11). A deformação é geralmente expressa em termos de deslocamento de abertura (CMOD), que é a abertura do entalhe na face inferior da viga (Figura 11). O parâmetro f_{Rj} que representa a resistência residual à tração por flexão é avaliado a partir da relação F-CMOD, como se segue:

$$f_{Rj} = \frac{3F_j l}{2b_1 h_{sp}^2} \quad (2.3)$$

onde:

- f_{Rj} [MPa] é a resistência residual à tração por flexão correspondente ao $CMOD = CMOD_j$;
- F_j [N] é a carga correspondente ao $CMOD = CMOD_j$;
- l [mm] é o comprimento do vão;
- b_1 [mm] é a largura do provete;
- h_{sp} [mm] é a distância entre a ponta do entalhe e o topo do provete (125 mm).

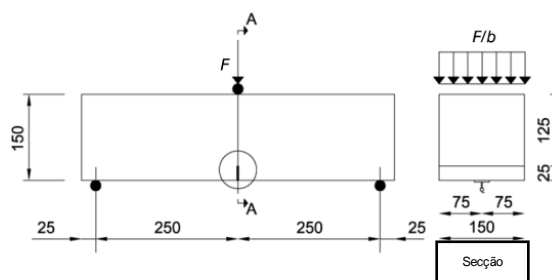


Figura 10 - Setup requerido pela EN 14651 (dimensões em mm)
(retirado do fib Model Code 2010).

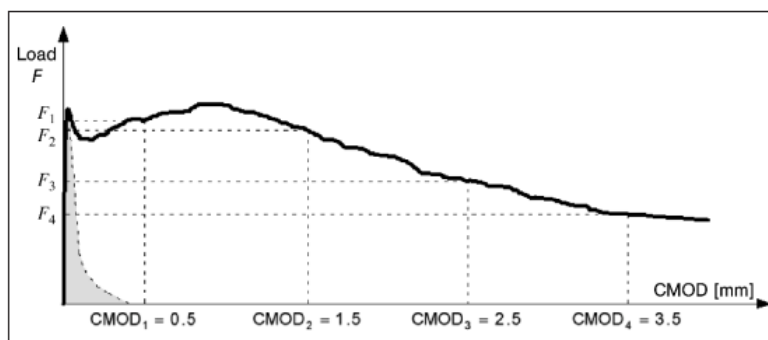


Figura 11 - Curva Força-CMOD para BS (diagrama a tracejado) e BRF (diagrama contínuo)
(retirado do fib Model Code 2010).

Para teores elevados de fibras, podem ser obtidos materiais com endurecimento por deformação. Para garantir o endurecimento em tração, o comportamento em tração deve ser identificado por meio de testes de tração uniaxial realizados em provetes sem entalhe.

2.2.3.3 Fatores de segurança parciais

Os valores de dimensionamento para o parâmetro de resistência pós-fissuração em Estado Limite Último (ELU) podem ser determinados como:

- $f_{F_{tsd}} = f_{F_{tsk}} / \gamma_F$;
- $f_{F_{tud}} = f_{F_{tuk}} / \gamma_F$.
 - $f_{F_{tsd}}$ é valor de dimensionamento da resistência pós-fissuração para a abertura de fendas típicas em condições de serviço;
 - $f_{F_{tud}}$ é o valor de dimensionamento da resistência pós-fissuração para a abertura de fendas típicas em ELU.

Tabela 2 - Fatores de segurança parciais (retirado do fib Model Code 2010).

Material	Fator de segurança parcial
BRF em compressão	Igual ao BS
BRF em tração (limite de linearidade)	Igual ao BS
BRF em tração (força residual)	$\gamma_F = 1,5$

Para Estado de Limite de Serviço (ELS) os fatores parciais deverão ser considerados unitários.

2.2.3.4 Verificação da segurança (ELU) para lajes

- Comportamento em flexão (sem armadura convencional)

Para elementos de laje sem armadura convencional com ações predominantemente de flexão, a verificação da resistência pode ser feita com referência ao momento resistente, m_{rd} , avaliado considerando uma relação plástica rígida.

$$m_{rd} = \frac{f_{Ftud} * t^2}{2} \quad (2.4)$$

A rotura por flexão é atingida quando uma das seguintes condições se verifica (Figura 12):

- Obtenção da tensão de rotura à compressão no BRF, ϵ_{cu} ;
- Obtenção da tensão de rotura à tração no aço, se presente, ϵ_{su} ;
- Obtenção da tensão de rotura à tração no BRF, ϵ_{Fu} .

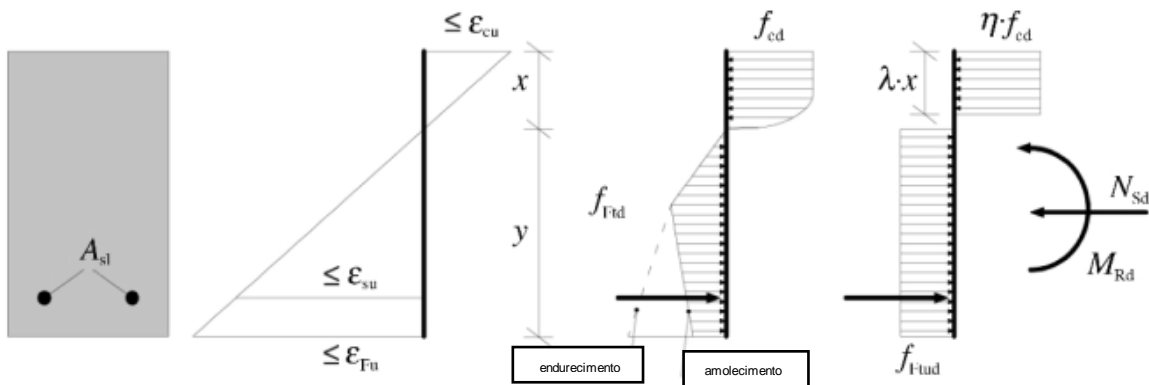


Figura 12 - ELU para o momento fletor e força axial: Utilização da relação simplificada entre tensão/deformação (retirado do fib Model Code 2010).

Em que na Figura 12 se considera:

- $\lambda = 0,8$ para $f_{ck} \leq 50$ MPa;
- $\lambda = 0,8 - \frac{f_{ck}-50}{400}$ para $50 < f_{ck} \leq 100$ MPa;
- $\eta = 1,0$ para $f_{ck} \leq 50$ MPa;
- $\eta = 1,0 - \frac{f_{ck}-50}{200}$ para $50 < f_{ck} \leq 100$ MPa.

- Resistência ao Esforço Transverso

Para estruturas de BRF, a resistência ao esforço transverso, V_{Rd} , é dada por:

$$V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{Rd,S} \quad (2.5)$$

Onde $V_{Rd,F}$ representa o contributo do BRF na resistência ao corte, e $V_{Rd,S}$ representa a resistência ao corte proveniente dos estribos (se existentes).

Quando se utiliza um BRF com um comportamento de endurecimento por tração e elementos sem armadura transversal e longitudinal, a tensão de tração principal, σ_1 , não deve ser superior à resistência à tração de projeto: $\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_F}$.

O contributo do BRF pode ser considerado como:

$$V_{Rd,F} = V_{Rd,f} + V_{Rd,c} \quad (2.6)$$

em que:

- $V_{Rd,f} = \frac{f_{F\text{tuk}}}{\gamma_F} b_0 d_v$
 - $f_{F\text{tuk}}$ [MPa] é o valor característico da resistência residual última à tração para betão reforçado com fibras, calculado tendo em consideração w_u (abertura máxima aceite) = 1,5 mm, determinado por um ensaio de tração axial;
 - b_0 [mm] é o perímetro de controlo da resistência ao corte;
 - d_v [mm] é a profundidade efetiva da resistência ao corte, ou seja, é a distância do centroide das camadas de armadura à zona suportada, como mostra a Figura 13;
 - γ_F é um fator de segurança parcial para BRF (Tabela 2).

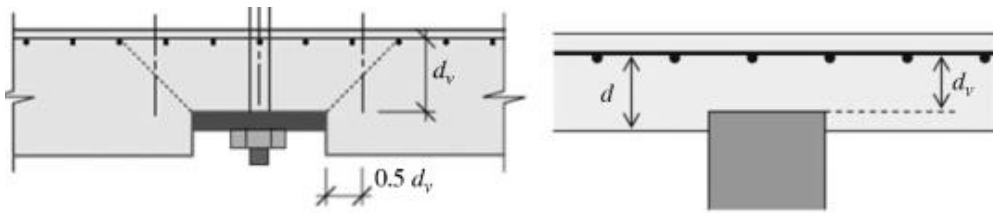


Figura 13 - Profundidade efetiva da laje considerando a penetração do apoio (d_v) e a profundidade efetiva para os cálculos de flexão (d) (retirado do fib Model Code 2010).

- $V_{Rd,c} = k_v \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_w z$, sendo a resistência ao corte atribuída ao betão.
 - f_{ck} [MPa] é o valor característico para a resistência à compressão do betão;
 - $k_v = \frac{180}{1000 + 125z}$, para $f_{yk} \leq 600 \text{ MPa}$, $f_{ck} \leq 70 \text{ MPa}$ e com uma dimensão máxima do agregado não inferior a 10 mm, onde $z = 0,9d$ (considerando o nível de aproximação I);
 - $k_v = \frac{0.4}{1 + 1500\varepsilon_x} * \frac{1300}{1000 + k_{dg}z}$, onde $\varepsilon_x \approx \frac{f_{yk}}{2E_s}$ e, como a dimensão máxima do agregado é não inferior a 16 mm, $k_{dg} = 1$, (considerando o nível de aproximação II);
 - γ_c é um fator de segurança parcial para propriedades dos materiais de betão.

Quando é necessária armadura específica de punçoamento, uma quantidade mínima de fibras é necessária para garantir capacidade de deformação suficiente na rotura, sendo, para tal, imposta a seguinte condição: (onde V_{Ed} é a força de corte de dimensionamento):

$$V_{Rd,f} + V_{Rd,s} \geq 0.5 V_{Ed} \quad (2.7)$$

2.2.3.5 Verificações de segurança em serviço (ELS) para lajes

Em elementos estruturais de BRF que apresentam um comportamento de amolecimento sob tração após a fissuração, a verificação da tensão de tração não é necessária se o elemento for verificado em estado limite último (ELU).

Em elementos estruturais de BRF que apresentam um comportamento de endurecimento sob tração após a fissuração, a verificação da tensão de tração deve ser feita impondo a limitação:

$$\sigma_t \leq 0.6 * f_{Ftsk} \quad (2.8)$$

Onde σ_t é a tensão de tração principal e f_{Ftsk} é o valor característico de $f_{Fts} = 0.45 * f_{R1}$ (resistência residual do BRF para condições de serviço).

- Abertura de fendas em estruturas de betão com fibras e armadura convencional em aço

A abertura de fendas (w_d) em betões reforçados com fibras e armadura convencional em aço pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$w_d = 2 * (k * c + \frac{1}{4} \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} * \frac{(f_{ctm} - f_{Ftsm})}{\tau_{bm}}) * \frac{1}{E_s} * (\sigma_s - \beta * \sigma_{sr} + \eta_r * \epsilon_{sh} * E_s) \quad (2.9)$$

Onde:

- k é um parâmetro empírico para ter em conta a influência do revestimento de betão; como simplificação, $k = 1$ pode ser assumido;
- c é o recobrimento do betão;
- ϕ_s é o diâmetro dos varões de aço;
- $\rho_{s,ef}$ é o rácio da armadura eficiente ($A_s/A_{c,ef}$), onde $A_{c,ef}$ é a área efetiva do betão sob tensão, como mostra a seguinte Figura:

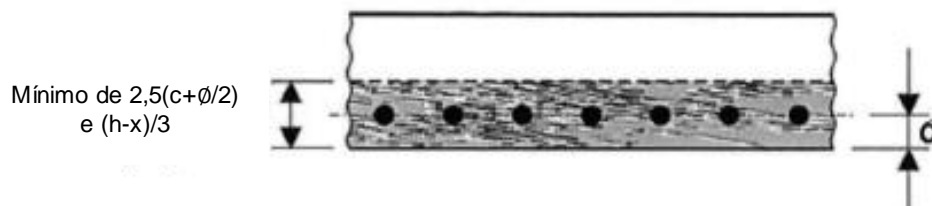


Figura 14 - Área de tensão efetiva do betão numa laje (retirado do fib Model Code 2010).

- f_{ctm} é o valor médio da resistência à tração do betão;
- τ_{bm} é a tensão de aderência dos varões de aço ao betão;
- E_s é o módulo de elasticidade do aço;
- σ_s é a tensão do aço;
- β é um coeficiente empírico para avaliar a deformação média ao longo de $l_{s,max}$ dependendo do tipo de carregamento;
- $l_{s,max} = k * c + \frac{1}{4} * \frac{f_{ctm}}{\tau_{bm}} * \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}}$, representa o comprimento ao longo do qual ocorre o deslizamento entre o betão e o aço, sendo ϕ_s o coeficiente de fluência;

- $\sigma_{sr} = (f_{ctm} - f_{Ftsm}) * (1 + \alpha_e * \rho_s) / \rho_{s,ef}$ é a tensão do aço na fissura sob a carga de fissuração, onde $\alpha_e = \frac{E_s}{E_c}$;
- η_r é um coeficiente para considerar a contribuição da retração;
- ε_{sh} é a deformação por retração.

Os valores de τ_{bm} e os coeficientes β e η_r podem ser consultados na seguinte Tabela:

Tabela 3 - Valores para τ_{bm} , β e η_r para varões de aço nervurados (retirado do fib Model Code 2010).

	Fase de formação de fissuras	Fase de estabilização de fissuras
Curto prazo, carregamento instantâneo	$\tau_{bm} = 1.8f_{ctm}$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{bm} = 1.8f_{ctm}$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$
Longo prazo, carregamento repetido	$\tau_{bm} = 1.35f_{ctm}$ $\beta = 0.6$ $\eta_r = 0$	$\tau_{bm} = 1.8f_{ctm}$ $\beta = 0.4$ $\eta_r = 1$

- Armadura mínima para o controlo da fissuração

Para o controlo da fissuração em elementos sobre flexão, se necessário, a área mínima de armadura convencional em aço é dada por:

$$A_{s,min} = k_c * k_1 * (f_{ctm} - f_{Ftsm}) \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad (2.10)$$

onde:

- f_{ctm} é o valor médio da tensão resistente do betão à tração;
- f_{Ftsm} é o valor médio para a força residual do BRF;
- A_{ct} é a área em tração da secção transversal do betão, avaliada considerando um campo de tensões no limite elástico;
- σ_s é a tensão máxima de tração da armadura no estado fissurado, que pode ser considerada igual à tensão de cedência do aço;
- k_c é um coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção transversal antes da fissuração e a alteração do braço de alavanca interno; para secções retangulares, $k_c = 1$;
- k_1 é um coeficiente que considera as tensões não uniformes de autoequilíbrio, levando a uma redução da força de fissuração:
 - $k_1 = 1,0$ para almas de $h \leq 300$ mm ou banzos com largura de ≤ 300 mm;
 - $k_1 = 0,65$ para almas de $h \leq 800$ mm ou banzos com largura de ≥ 800 mm;
 - Para valores intermédios deve ser usada a interpolação.

Quando $A_{s,min}$ é negativo, não é necessário adicionar armadura mínima convencional.

3. Campanha Experimental

3.1 Enquadramento - Caso de Estudo

A realização da presente campanha experimental surgiu na sequência da solicitação de uma empresa de construção que pretendia estudar/desenvolver uma solução construtiva alternativa para uma ponte rodoviária de 1330 metros de extensão, com vãos de 26 metros, e uma secção transversal constituída por vigas pré-fabricadas de betão armado (afastamento de 1 metro) e lajes (também em betão armado, espessura de 0,24 m) betonadas *in situ* (Figura 15). Em particular, e com o objetivo de reduzir o tempo de construção, a empresa pretendia avaliar a possibilidade de utilizar pré-lajes de betão como cofragens perdidas nas lajes do tabuleiro a betonar *in situ*. Relativamente aos requisitos para estas pré-lajes, pretendia-se que fossem de reduzida espessura (máximo de 5 cm), e com resistência suficiente para suportar as cargas impostas durante a fase de betonagem da laje do tabuleiro. Além disso, como a ponte será construída em ambiente marítimo, e face à limitação de espessura das pré-lajes, optou-se por não utilizar qualquer armadura metálica pelo risco de corrosão. Neste contexto, decidiu-se verificar a viabilidade de recorrer a pré-lajes de betão com adição de fibras sintéticas. A campanha experimental que se descreve nas secções seguintes teve como objetivo aferir o desempenho estrutural (resistência e capacidade de deformação) de pré-lajes de betão com adição de fibras para esta aplicação particular.

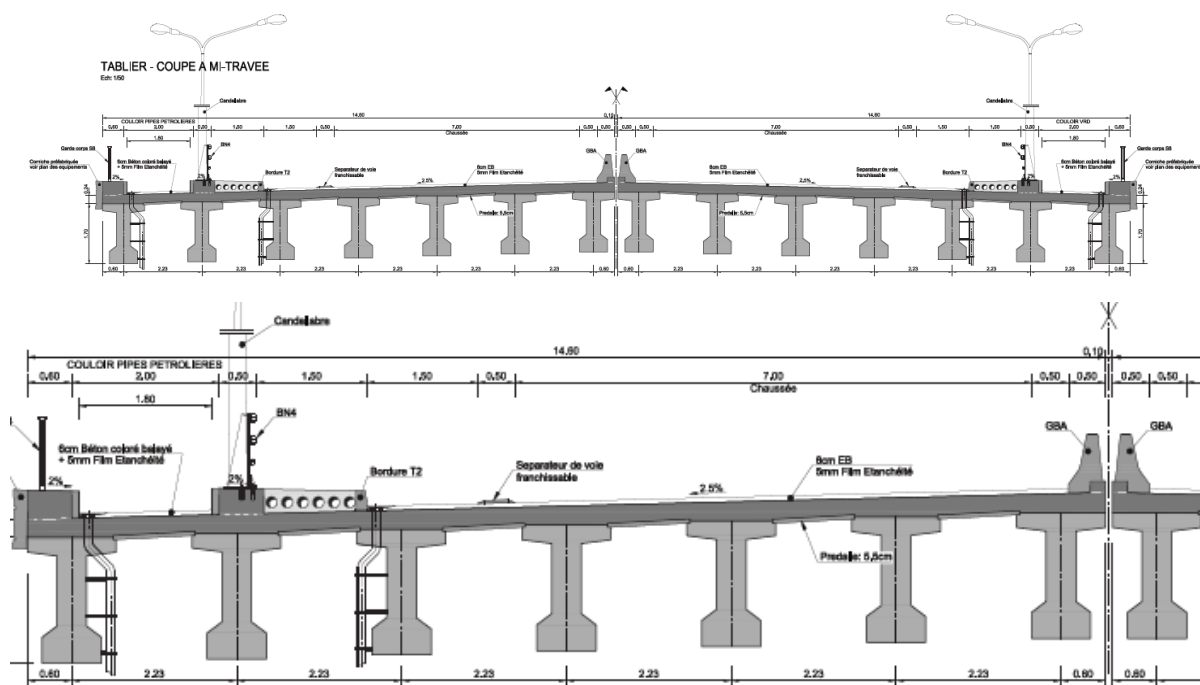


Figura 15 - Secção transversal da ponte marítima em estudo.

Relativamente a informações adicionais sobre esta ponte rodoviária, refira-se que cada sentido possui um corredor dedicado à passagem de tubos de abastecimento do porto de águas profundas e uma faixa de rodagem com duas vias, duas bermas, uma ciclovia e um passeio. Os pilares e os encontros são de betão armado e suportados por estacas tubulares metálicas.

3.2 Objetivos e descrição das séries experimentais

A campanha experimental foi realizada no LERM (Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais) do IST (Instituto Superior Técnico), com o objetivo de estudar o comportamento estrutural de pré-lajes em betão pré-doseado com a adição de fibras sintéticas, que, tal como descrito na secção anterior, se pretendem utilizar como cofragens perdidas não colaborantes para o tabuleiro de uma ponte a construir em ambiente marítimo. Para tal, foram planeados ensaios de caracterização do comportamento mecânico de pré-lajes de dimensões $1,0 \times 0,5 \times 0,05 \text{ m}^3$ (comprimento \times largura \times espessura), definidas de acordo com os requisitos geométricos da utilização em causa. O programa experimental centrou-se principalmente em ensaios de flexão em pré-lajes constituídas por 3 tipos de betão: (i) betão simples (i.e. sem qualquer tipo de armadura ou fibras – BF0), (ii) betão com incorporação de 6 kg/m^3 de fibras sintéticas (BF6) e (iii) betão com incorporação de 10 kg/m^3 de fibras sintéticas (BF10). Além dos ensaios de flexão às pré-lajes, foram também realizados ensaios de caracterização da resistência dos três tipos de betão em compressão (em provetes cúbicos), em tração (por compressão diametral em provetes cilíndricos) e em flexão (em provetes prismáticos).

Os ensaios de flexão às pré-lajes foram realizados recorrendo a diferentes esquemas de ensaios (descritos em detalhe na secção 3.5) com o objetivo de obter a resposta “Carga-Deslocamento”, de forma a verificar e confirmar o efeito da adição de diferentes dosagens de fibras na fase fendilhada dessa resposta, em particular a resistência à flexão “residual” e a sua ductilidade. Para isso foram produzidas 9 pré-lajes, 3 de cada dosagem.

Na Tabela seguinte (Tabela 4) resumem-se as séries experimentais dos ensaios de flexão às pré-lajes, indicando-se para cada *Setup* (numerado de 0 a 3) as dosagens de fibras adotadas e a respetiva nomenclatura. Importa referir que para cada tipo de *Setup* e dosagem de fibras apenas foi ensaiada uma pré-laje (i.e. sem repetições) devido a limitações na quantidade de material disponível.

A adoção de diferentes *Setups* de ensaio teve como objetivo estudar o comportamento estrutural das pré-lajes quando sujeitos a diferentes combinações de esforços (momento fletor e esforço transversal). Apesar de nenhum dos *Setups* adotados simular perfeitamente a ação gravítica imposta às pré-lajes durante a ação de betonagem das lajes do tabuleiro da ponte referida acima (que se aproximará a carga uniformemente distribuída), considera-se que o *Setup* 2 (com 4 cargas lineares igualmente espaçadas ao longo do vão) será aquele que mais próximo estará de simular esse tipo de carregamento. Refira-se que as pré-lajes ensaiadas no *Setup* 0 (vão de 0,5 m, com uma carga linear a meio vão) resultaram das metades não fendilhadas obtidas após os ensaios das pré-lajes do *Setup* 3 (vão de 1,0 m) – o *Setup* 0 foi adotado pela sua simplicidade e permitir obter diretamente a resistência à flexão das pré-lajes. Relativamente ao *Setup* 3 (sistema hiperestático de pré-lajes contínuas com apoio linear central), embora não simule as condições de apoio das pré-lajes na estrutura real, foi incluído no presente programa experimental para permitir avaliar a capacidade de redistribuição de esforços das pré-lajes.

Relativamente à justificação das dosagens de fibras, optou-se por utilizar o valor de 10 kg/m^3 visto ser a dosagem máxima recomendada pela ficha técnica do fabricante das fibras (Anexo B), e uma dosagem intermédia de 6 kg/m^3 , que foi igualmente adotada num estudo preliminar (Anexo C) realizado pela empresa responsável pela construção da ponte descrita acima.

Tabela 4 - Nomenclatura adotada para as pré-lajes em função do Setup e quantidade de fibras adicionadas.

Esquema de ensaio	Dosagem de fibras (kg/m ³)	Nomenclatura
Setup 0 - 2 bordos apoiados, 1 carga linear, vão = 0,5 m	0	Setup 0 – BF0
	6	Setup 0 – BF6
	10	Setup 0 – BF10
Setup 1 - 2 bordos apoiados, 2 cargas lineares, vão = 1,0 m	0	Setup 1 – BF0
	6	Setup 1 – BF6
	10	Setup 1 – BF10
Setup 2 - 2 bordos apoiados, 4 cargas lineares, vão = 1,0 m	0	Setup 2 – BF0
	6	Setup 2 – BF6
	10	Setup 2 – BF10
Setup 3 - 2 bordos apoiados + apoio central, 1 carga linear em cada vão de 0,5 m	0	Setup 3 – BF0
	6	Setup 3 – BF6
	10	Setup 3 – BF10

3.3 Descrição dos materiais

Para a produção das pré-lajes foi utilizado betão pré-doseado (Figura 16), cuja preparação consistiu em adicionar a quantidade de água preconizada na ficha técnica do fabricante (Anexo A) para obter a classe de resistência pretendida (aproximadamente C30/37). Os principais dados sobre este betão são os seguintes:

- Agregados calcários e siliciosos de granulometria máxima de 10 mm;
- Relação água/cimento: $\leq 0,60$;
- Adicionar 2,3 litros de água por cada 25 kg da mistura (agregados + ligante) pré-doseada.



Figura 16 - Produção do betão.

As fibras utilizadas têm a designação comercial de *SikaFiber T-48* (Figura 17 e Anexo B), sendo macrofibras sintéticas com carácter estrutural, do tipo poliolefinas, que se destacam dos vários

tipos de fibras sintéticas comercialmente disponíveis por apresentarem boa resistência química, tanto em ambientes ácidos como alcalinos. Este tipo de fibras foi adotado por ser comercializado a nível internacional e ter sido utilizado com sucesso no estudo preliminar desenvolvido pela empresa responsável pela construção da ponte. Estas fibras possuem as seguintes principais características (de acordo com o fabricante):

- Diâmetro: Aproximadamente 0,9 mm;
- Comprimento: Aproximadamente 48 mm;
- Resistência à tração: > 500 MPa;
- Módulo de Elasticidade: > 9 GPa.



Figura 17 - SikaFiber T-48.

3.4 Fabrico das pré-lajes e provetes de caracterização do betão

Para as cofragens das pré-lajes e dos prismas (utilizados nos ensaios para caracterização da resistência à tração em flexão) foram utilizadas madeiras de contraplacado marítimo (Figura 18).



Figura 18 - Cofragens das pré-lajes e prismas.

As Figuras 19 e 20 mostram a operação de betonagem e o aspeto final das pré-lajes.



Figura 19 - Betonagem.



Figura 20 - Aspeto final das pré-lajes após descofragem.

Além das 9 pré-lajes, foram também produzidos (Figura 21):

- 15 provetes cúbicos ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$) para os ensaios à compressão, segundo a norma EN 12390-3, 2009;
- 15 provetes cilíndricos ($\text{Ø}150 \times 300 \text{ mm}^2$) para ensaios à compressão diametral, com o objetivo em obter o valor da resistência à tração, segundo a norma EN 12390-6, 2000;
- 15 provetes prismáticos ($50 \times 50 \times 200 \text{ mm}^3$), como já referido anteriormente, para ensaios à flexão, segundo a norma EN 12390-5, 2009.



Figura 21 - Betonagem e descofragem dos provetes cúbicos e cilíndricos e provetes prismáticos.

3.5 Ensaios de caracterização do betão

3.5.1 Ensaios de compressão

A norma NP EN 12390-3 especifica a metodologia para determinar a resistência à compressão de provetes de betão endurecido, podendo estes ter a forma cúbica ou cilíndrica. No presente estudo apenas foram utilizados provetes cúbicos para determinação da resistência à compressão.

Foram realizados dois conjuntos de ensaios:

- Ensaios preliminares em 3 provetes cúbicos de betão simples e 3 provetes de betão com 6 kg/m^3 de fibras, após serem submetidos a cura húmida durante 28 dias;
- Ensaios de 3 provetes de cada um dos três tipos de betão em análise (simples, com 6 e 10 kg/m^3 de fibras), após 58 dias de cura a temperatura e humidade do ambiente laboratorial, com o objetivo de replicar o tempo e condições de cura das pré-lajes.

Os provetes cúbicos de betão foram ensaiados numa máquina de compressão (Figura 22) a uma velocidade de carregamento de $13,5 \text{ kN/s}$, seguindo as recomendações da NP EN 12390-3 [56]. No final do ensaio registou-se o valor da força máxima de cada provete.



Figura 22 - Máquina usada para os ensaios à compressão.

A tensão resistente à compressão de cada provete é dada por:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.1)$$

Onde:

- f_c [MPa] é a resistência à compressão;
- F [N] é a carga máxima na rotura registada na máquina;
- A_c [mm²] é a área da secção transversal do provete (150x150 mm²).

A norma NP EN 12390-3 refere também o tipo de rotura que cada provete deve apresentar de modo que este seja considerado válido, como mostra a seguinte Figura:

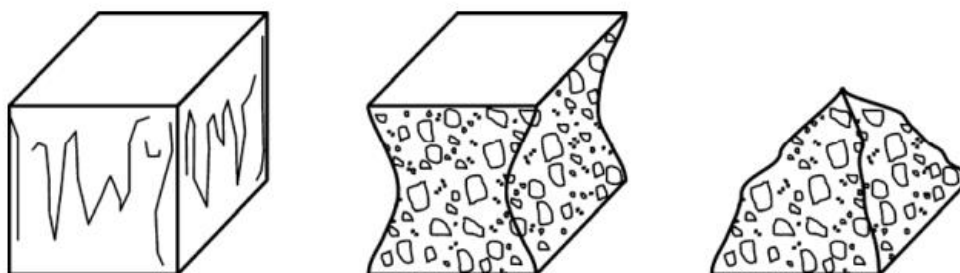


Figura 23 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (retirado da Norma NP EN 12390-3).

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores obtidos para cada conjunto de provetes relativamente à sua resistência à compressão:

Tabela 5 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão simples (28 dias, cura húmida).

BF0	Força (kN)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	836,3	37,2	37,8	2,8
Provete 2	795,0	35,3		
Provete 3	918,3	40,8		

Tabela 6 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão com 6 kg/m³ fibras (28 dias, cura húmida).

BF6	Força (kN)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	748,4	33,3	33,8	1,4
Provete 2	735,4	32,7		
Provete 3	795,3	35,3		

Tabela 7 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão simples (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).

BF0	Força (kN)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	941,7	41,9	41,6	2,5
Provete 2	874,7	38,9		
Provete 3	989,2	43,9		

Tabela 8 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão com 6 kg/m³ de fibras (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).

BF6	Força (kN)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	1115,2	49,6	46,4	4,5
Provete 2	1091,4	48,5		
Provete 3	926,4	41,2		

Tabela 9 - Resultados obtidos para a resistência à compressão, em cubos de betão com 10 kg/m³ de fibras (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).

BF10	Força (kN)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	979,0	43,5	46,8	2,9
Provete 2	1078,5	47,9		
Provete 3	1100,1	48,9		



Figura 24 - Provetes cúbicos de betão simples (esquerda), com 6 kg/m³ (centro) e 10kg/m³ de fibras (direita) após ensaios de compressão.

Como se pode verificar pelo resultados acima, e contrariamente ao esperado, a adição de 6 kg/m³ de fibras resultou numa redução de resistência à compressão do betão aos 28 dias (não existindo uma explicação para tal resultado não esperado). Contudo, nos provetes sujeitos a condições de cura do ambiente interior do laboratório e ensaiados aos 58 dias, observou-se um aumento de resistência (em relação ao betão simples) ao se adicionar 6 kg/m³ de fibras. No entanto, uma maior

quantidade de fibras (10 kg/m³), não resultou num aumento de resistência em relação a 6 kg/m³ de fibras.

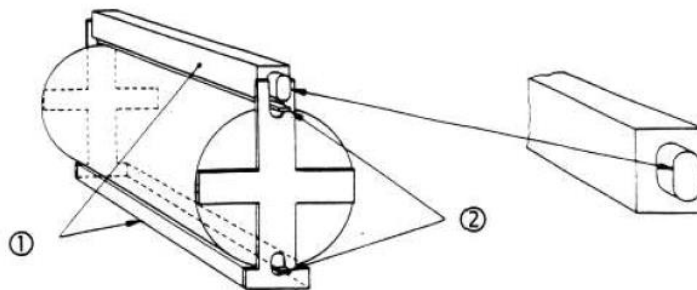
3.5.2 Ensaio à compressão diametral

Foram realizados ensaios à compressão diametral em provetes cilíndricos (Ø150x300 mm²) de acordo com a norma NP EN 12390-6. Os cilindros foram submetidos a uma carga diametral de compressão F , ao longo da sua altura (Figuras 25 e 26). A tensão resistente à tração pode ser calculada pela seguinte expressão [57]:

$$f_{ct} = \frac{2 * F}{\pi * L * d} \quad (3.2)$$

Onde:

- f_{ct} [MPa] é a resistência à rotura por tração;
- F [N] é a carga máxima na rotura registada na máquina;
- L [mm] é o comprimento do provete, sendo 300 mm;
- d [mm] é o diâmetro do provete, sendo 150 mm.



Chave

- 1 Peça de carregamento em aço
- 2 Tiras de embalagem de cartão duro

Figura 25 - Exemplo do ensaio em provetes cilíndricos (retirado da norma NP EN 12390-6).



Figura 26 - Máquina de ensaio à compressão diametral e exemplo de um provete durante um ensaio.

Tal como nos ensaios à compressão, foram realizados dois conjuntos de ensaios:

- Ensaio em 3 cilindros de betão simples e 3 de betão com 6 kg/m³ de fibras, após serem submetidos a cura húmida durante 28 dias;

- Ensaios de 3 cilindros de cada um dos três tipos de betão em análise (simples, com 6 e 10 kg/m³ de fibras), após 58 dias de cura a temperatura e humidade do ambiente laboratorial, com o objetivo de replicar o tempo e condições de cura das pré-lajes.

Nas Tabelas 10 a 14 resumem-se os resultados obtidos nestes ensaios.

Tabela 10 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão simples (28 dias, cura húmida).

BF0	Força (kN)	f_{ct} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	265,5	3,6	3,1	0,5
Provete 2	186,1	2,6		
Provete 3	215,3	3,1		

Tabela 11 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão com 6kg/m³ de fibras (28 dias, cura húmida).

BF6	Força (kN)	f_{ct} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	221,3	3,1	3,2	0,2
Provete 2	208,3	2,9		
Provete 3	233,0	3,3		

Tabela 12 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão simples (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).

BF0	Força (kN)	f_{ct} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	203,8	2,9	3,5	0,7
Provete 2	239,0	3,4		
Provete 3	297,5	4,2		

Tabela 13 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão com 6kg/m³ de fibras (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).

BF6	Força (kN)	f_{ct} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	244,8	3,5	3,6	0,2
Provete 2	268,1	3,8		
Provete 3	256,5	3,6		

Tabela 14 - Resultados obtidos para a resistência à tração, em cilindros de betão com 10kg/m³ de fibras (58 dias, cura em ambiente interior de laboratório).

BF10	Força (kN)	f_{ct} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	Desvio padrão
Provete 1	305,5	4,3	3,8	0,5
Provete 2	268,1	3,8		
Provete 3	241,2	3,4		

Na Figura 27 encontram-se os provetes cilíndricos após os ensaios, de todas as dosagens de fibras.



Figura 27 - Provetes cilíndricos de betão simples (esquerda), com 6 kg/m³ (centro) e 10kg/m³ de fibras (direita) após ensaios de compressão diametral.

Pela análise dos resultados das Tabelas 10 a 14 conclui-se que, de um modo geral, a resistência à tração aumenta ligeiramente com a dosagem de fibras. Além disso, nestes ensaios também foi perceptível que nos provetes com fibras, após se atingir a carga máxima, não ocorreu a separação total das duas metades dos cilindros (ao contrário do que se verificou nos cilindros de betão simples), o que indicia que as fibras podem contribuir para a resistência à tração (residual) na fase fendilhada do betão.

3.5.3 Ensaio de flexão

Foram realizados ensaios à flexão em provetes prismáticos (50 x 50 x 200 mm³), de acordo com a norma NP EN 12390-5. Neste ensaio foi utilizado um dispositivo equipado com dois roletes de apoio distanciados entre si 15 cm, e um rolete superior sustentado por uma estrutura articulada de forma a aplicar uma carga concentrada a meio vão (Figuras 28 e 29), com uma velocidade de 1 mm/s. A tensão resistente à tração em flexão foi determinada pela seguinte expressão [58]:

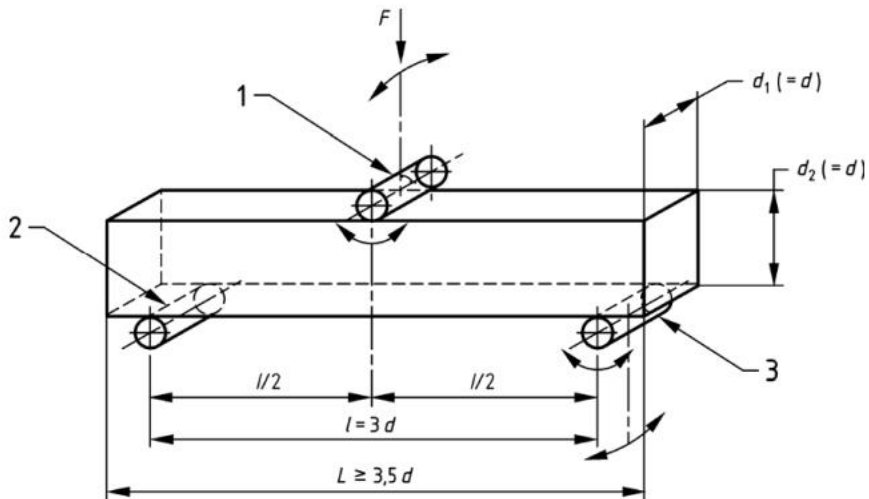
$$f_{cf} = \frac{F * l}{d_1 * d_2^2} \quad (3.3)$$

Onde:

- f_{cf} [MPa] é a tensão resistente à tração em flexão;

- F [N] é a carga máxima registada na máquina;
- l [mm] é a distância entre os roletes inferiores de apoio, neste caso, 150 mm;
- d_1 e d_2 [mm] são as dimensões da secção transversal do provete, neste caso, ambas 50 mm.

Foram ensaiados 12 provetes prismáticos, 4 de cada tipo de betão.



Legenda:

- 1 Rolete de aplicação da carga (susceptível de rotação e de inclinação)
- 2 Rolete de apoio
- 3 Rolete de apoio (susceptível de rotação e de inclinação)

Figura 28 - Exemplo do ensaio em provetes prismáticos (retirado da norma NP EN 12390-5).



Figura 29 - Máquina usada para os ensaios à flexão.

Nas Figuras 30 a 35 apresentam-se os diagramas carga vs. deslocamento obtidos, bem como imagens dos provetes após ensaios. A Tabela 15 resume os principais resultados obtidos.

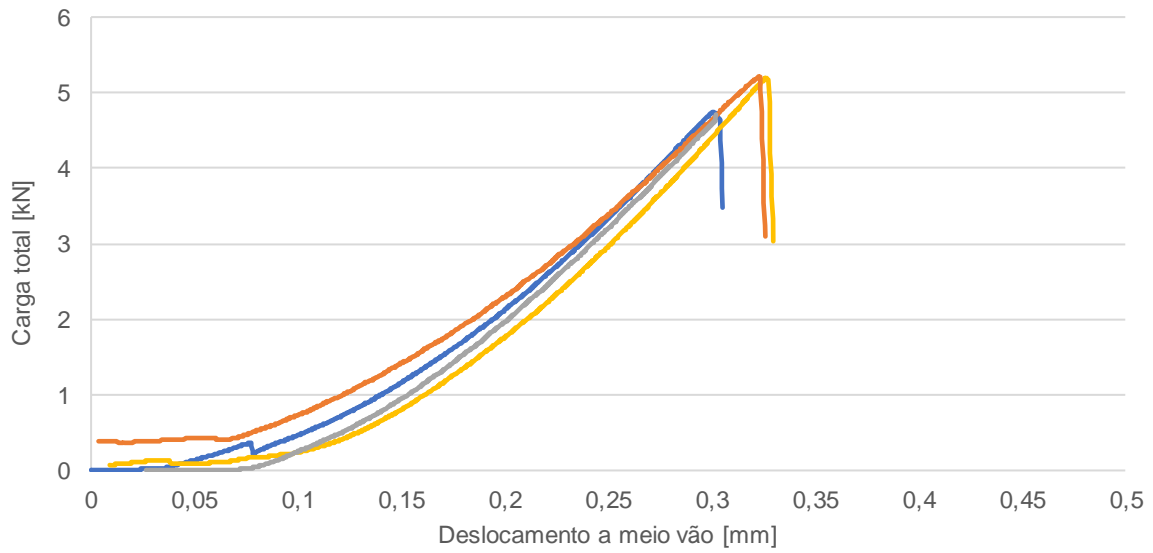


Figura 30 - Resultados para os prismas BF0.



Figura 31 - Pós-ensaio dos prismas BF0.

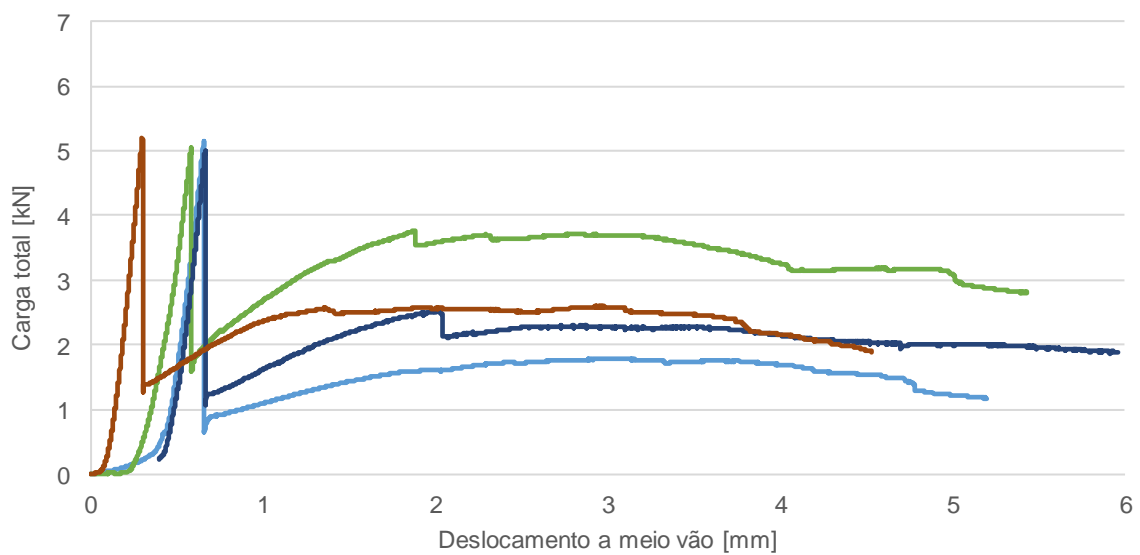


Figura 32 - Resultados para os prismas BF6.



Figura 33 - Pós-ensaio dos prismas BF6.

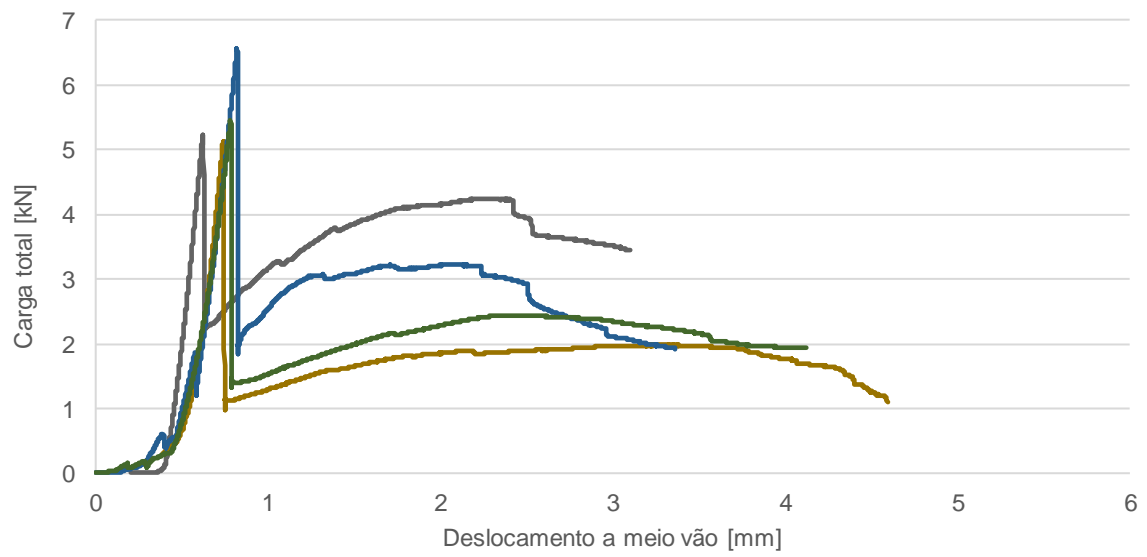


Figura 34 - Resultados para os prismas BF10.



Figura 35 - Pós-ensaio dos prismas BF10.

Tabela 15 - Resultados da resistência à flexão em prismas.

Prisma	BF0			BF6			BF10		
	f_{cf} (MPa)	f_{cfm} (MPa)	Desvio padrão	f_{cf} (MPa)	f_{cfm} (MPa)	Desvio padrão	f_{cf} (MPa)	f_{cfm} (MPa)	Desvio padrão
1	5,7	6,1	0,3	6,2	6,1	0,1	6,2	7,2	0,9
2	6,2			6,1			8,1		
3	6,2			6,0			7,8		
4	6,3			6,2			6,2		

Tal como se observa na Tabela 15, a adição de 6 kg/m³ de fibras (BF6) não resultou num aumento da tensão resistente à tração em flexão. Contudo, ao adicionar 10 kg/m³ de fibras (BF10), observou-se um aumento não negligenciável de resistência. De igual modo, como nos ensaios anteriores, também foi perceptível que nos provetes com fibras, após se atingir a carga máxima, não ocorreu a separação total das duas metades dos prismas. Tal como se observa nas Figuras 32 e 34, os betões com fibras apresentam uma resistência residual após fendilhação significativa, ao contrário do betão simples, que apresentou um comportamento frágil (Figura 30).

3.6 Ensaios de flexão em lajes

3.6.1 Esquema de ensaio, instrumentação e procedimento

Tal como referido na secção 3.2, foram montados 4 esquemas de ensaios de forma a comparar/analisar as respostas das pré-lajes a diferentes tipos de carregamento e condições de apoio. As Figuras seguintes mostram o aspeto geral da montagem dos apoios utilizados nos diferentes *Setups*; refira-se que entre os apoios e as pré-lajes e entre os perfis de aplicação de carga e as pré-lajes foram utilizadas tiras de neoprene para melhorar a uniformidade da distribuição de carga na largura.

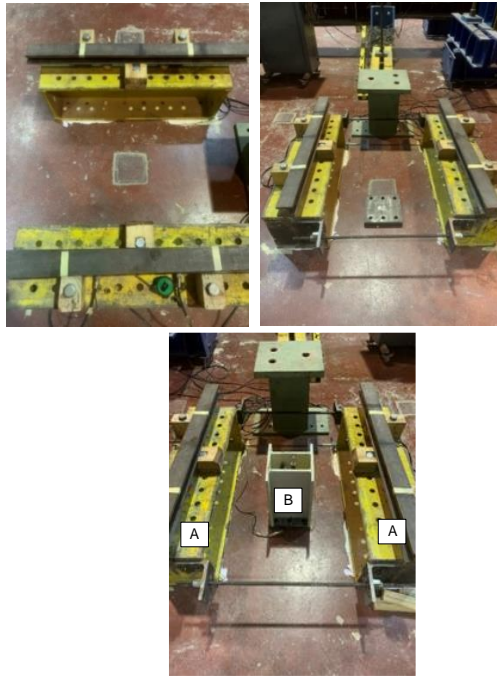


Figura 36 - Montagem do Setup dos ensaios. A – apoios; B – transdutor para medição de deslocamentos.

A instrumentação consistiu em células de carga (Figura 38) para medir a carga total aplicada e sobre os apoios (de forma a aferir a uniformidade e simetria da distribuição das cargas), e defletómetros para medir o deslocamento a meio vão de todas as pré-lajes.

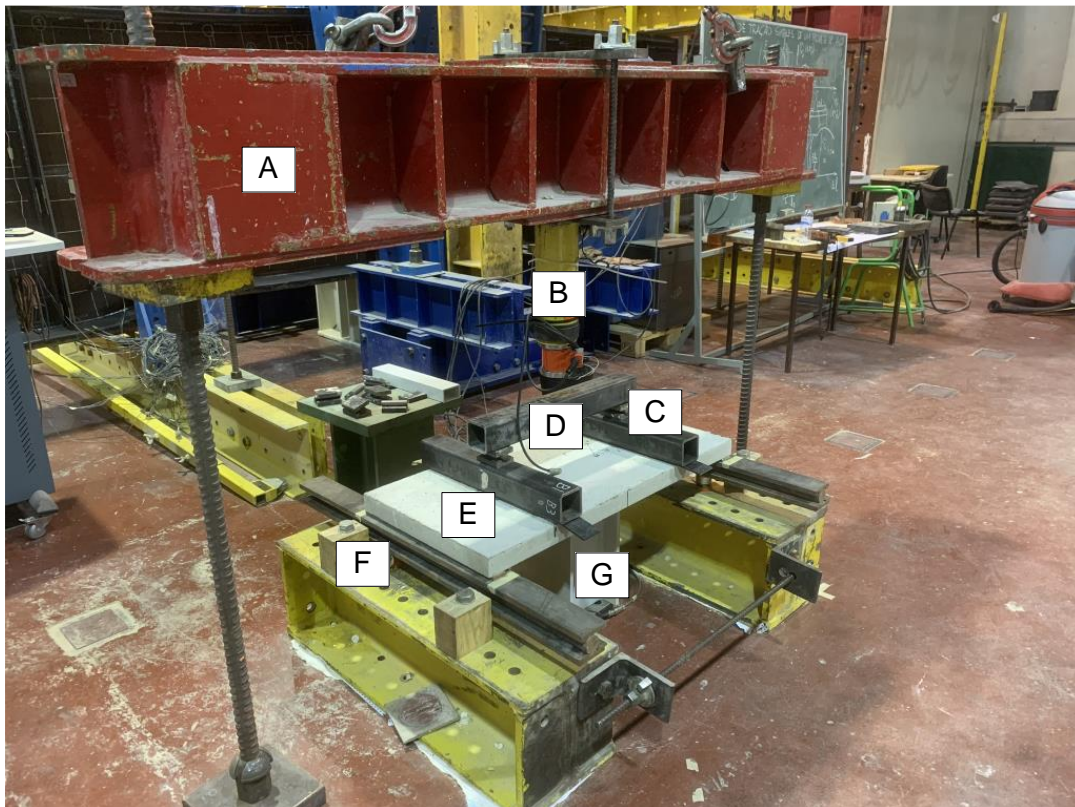


Figura 37 - Montagem do pórtico. A – pórtico; B – macaco hidráulico; C – rótula; D – perfil metálico; E – pré-laje; F – célula de carga; G - transdutor para medição de deslocamentos (defletómetro).



Figura 38 - Célula de carga e macaco hidráulico, respectivamente, usados nos ensaios.

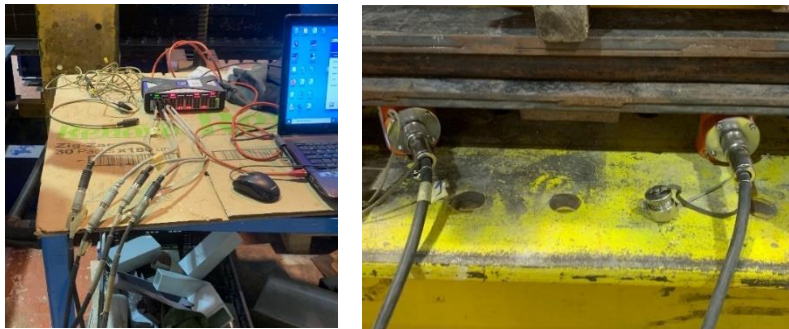


Figura 39 - Ligações das células de carga à datalogger e computador.



Figura 40 - Unidade de pressão hidráulica (para ligação ao macaco hidráulico).

- *Setup 0*

Para o *Setup 0* foi adotado um esquema de flexão em 3 pontos em que as pré-lajes foram simplesmente apoiadas ao longo dos bordos de menor dimensão, e sujeitas a uma carga linear a meio vão. Importa recordar que neste ensaio foram utilizadas as metades não fendilhadas das pré-lajes ensaiadas no *Setup 3*, descrito nas Figuras 41 e 42.

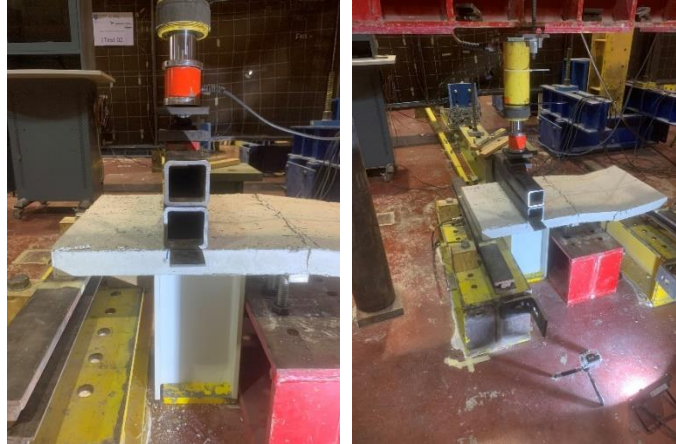


Figura 41 - Esquema de ensaio do *Setup 0*.

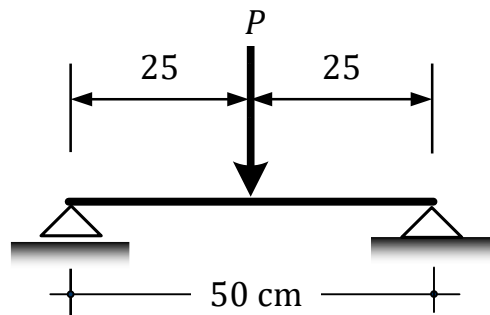


Figura 42 - Dimensões em centímetros do *Setup 0*.

- *Setup 1*

No *Setup 1* foi adotado um esquema de flexão em 4 pontos em que as pré-lajes foram simplesmente apoiadas ao longo dos bordos de menor dimensão, e sujeitas a duas cargas lineares aplicadas a uma distância dos apoios correspondente a 1/4 do vão (Figuras 43 e 44).

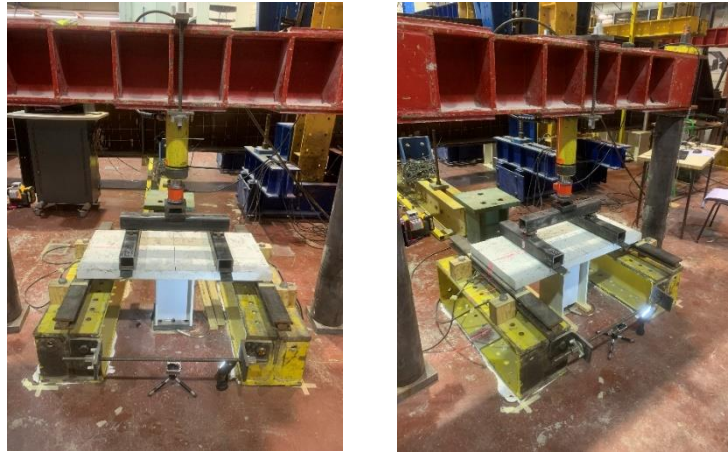


Figura 43 - Esquema de ensaio do Setup 1.

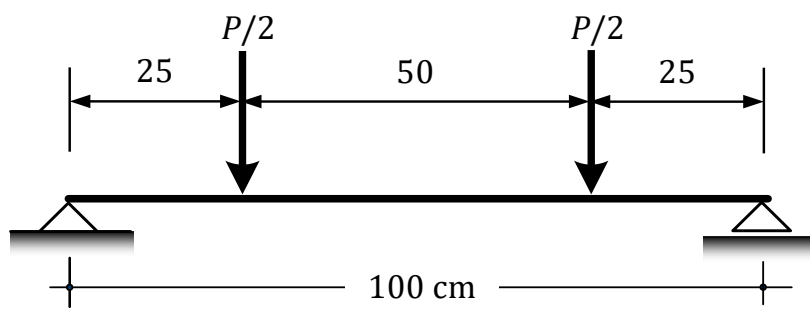


Figura 44 - Dimensões em centímetros do Setup 1.

- *Setup 2*

Para o *Setup 2* foi adotado um esquema de flexão em 6 pontos em que as pré-lajes foram simplesmente apoiadas ao longo dos bordos de menor dimensão, e sujeitas a quatro cargas lineares distanciadas igualmente entre si (e dos apoios) de um comprimento correspondente a 1/5 do vão (Figuras 45 e 46).



Figura 45 - Esquema de ensaio do Setup 2.

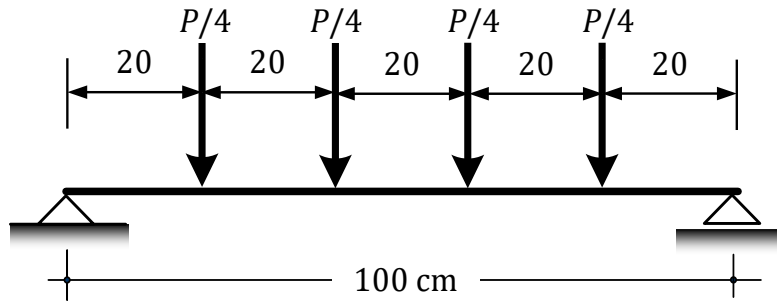


Figura 46 - Dimensões em centímetros do Setup 2.

- Setup 3

Finalmente, para o Setup 3 foi adotado um esquema hiperestático de flexão em 5 pontos em que as pré-lajes foram apoiadas em 3 apoios lineares, dois deles ao longo dos bordos de menor dimensão, um apoio a meio da pré-laje, e sujeitas a duas cargas lineares a meio dos vãos, tal como se observa nas Figuras 47 e 48.



Figura 47 - Esquema de ensaio do Setup 3.

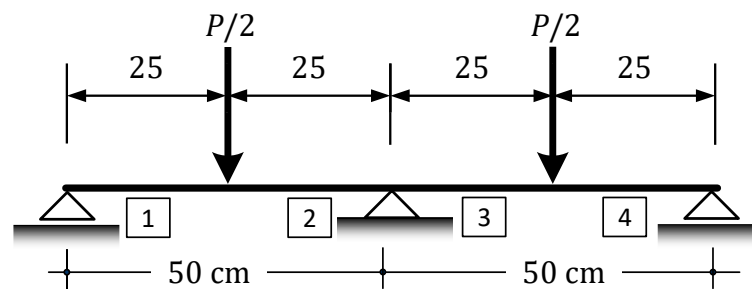


Figura 48 - Dimensões em centímetros do ensaio Setup 3 – identificação dos vãos (1-2 e 3-4).

Relativamente ao procedimento de ensaios, a carga foi aplicada monotonicamente em controlo do deslocamento (embora o equipamento não permita definir uma taxa de aplicação constante) até à rotura das pré-lajes (no caso das séries com betão BF0) ou até se atingirem deslocamentos a meio vão muito elevados (no caso das séries com betões BF6 e BF10), de forma a se caracterizar adequadamente a resposta “pós-pico” (tal como se discute na subsecção seguinte).

3.6.2 Resultados e discussão

3.6.2.1 Comportamento carga-deslocamento

Na presente subsecção analisam-se as respostas carga total vs. deslocamento a meio vão obtidas nas várias séries experimentais. Importa referir que o critério de paragem dos ensaios às pré-lajes de betão com fibras (BF6 e BF10) foi definido durante cada ensaio e após se atingir a fase descendente da resposta “pós-pico” e para deformações muito elevadas (muito superiores às que seriam expectáveis num caso real). Na análise que se apresenta em seguida, o valor máximo da carga atingida durante o ensaio foi denominado por “carga máxima” (correspondente ao primeiro pico de carga), enquanto o máximo local após se atingir o primeiro pico de carga foi denominado por “carga última”. A capacidade de recuperação de carga das pré-lajes com fibras após estas atingirem a carga máxima será analisada na secção seguinte – esta capacidade de recuperação será quantificada através do rácio entre a carga última e a carga máxima. Finalmente, importa referir que nos resultados e análises que em seguida se apresentam optou-se por desprezar a influência do peso próprio das pré-lajes, pois tem reduzida importância para este tipo de pré-lajes finas (para todos os *Setups*, inferior a 8% da carga de fendilhação).

- *Setup 0*

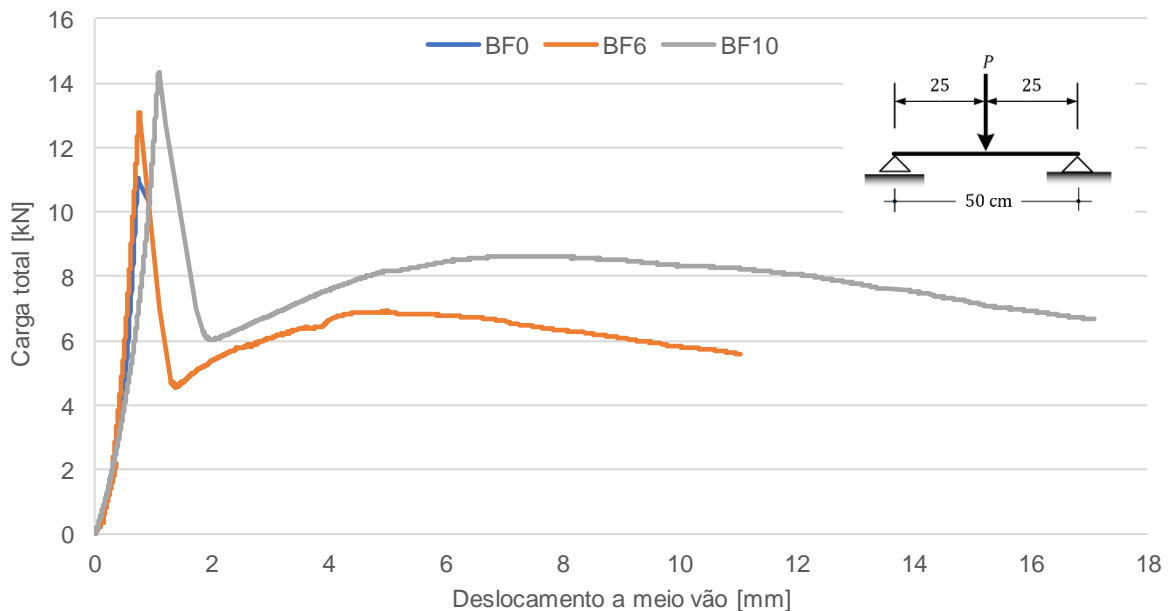


Figura 49 - Comparação entre pré-lajes com quantidades de fibras diferentes para o *Setup 0*.

Relativamente ao andamento geral das curvas da Figura 49 (*Setup 0*), é visível que todas as pré-lajes apresentam um primeiro troço aproximadamente linear até ser atingida a carga máxima, correspondente à abertura de uma fenda, seguida de uma diminuição abrupta de carga, que no caso da pré-laje com betão simples correspondeu à sua rotura. No caso das pré-lajes constituídas por betão com fibras (BF6 e BF10), verifica-se uma recuperação e estabilização da carga até ser atingida a carga última (máximo local na fase pós-pico da resposta), à qual se segue uma diminuição de carga (até se ter decidido terminar o ensaio).

Tabela 16 - Resultados do Setup 0.

Laje	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	P_{ult} (kN)	$\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ (mm)	δ_{ult} (mm)
BF0	11,03	-	0,74	-
BF6	13,01	6,90	0,76	5,01
BF10	14,33	8,63	1,10	7,22

Relativamente aos dados da Tabela 16, $P_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima, ou seja, o pico da curva no gráfico carga vs. deslocamento, o P_{ult} é a carga última (correspondente à carga máxima local da fase pós-fissuração), $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ é o deslocamento para a carga máxima e δ_{ult} é o deslocamento último para a carga última.

Para este Setup, a pré-laje com betão BF10 atingiu valores de carga máxima, última e deslocamentos correspondentes superiores em relação aos da pré-laje BF6. Tal como esperado, a pré-laje BF0 exibiu uma carga máxima ligeiramente inferior e um comportamento frágil.

- Setup 1

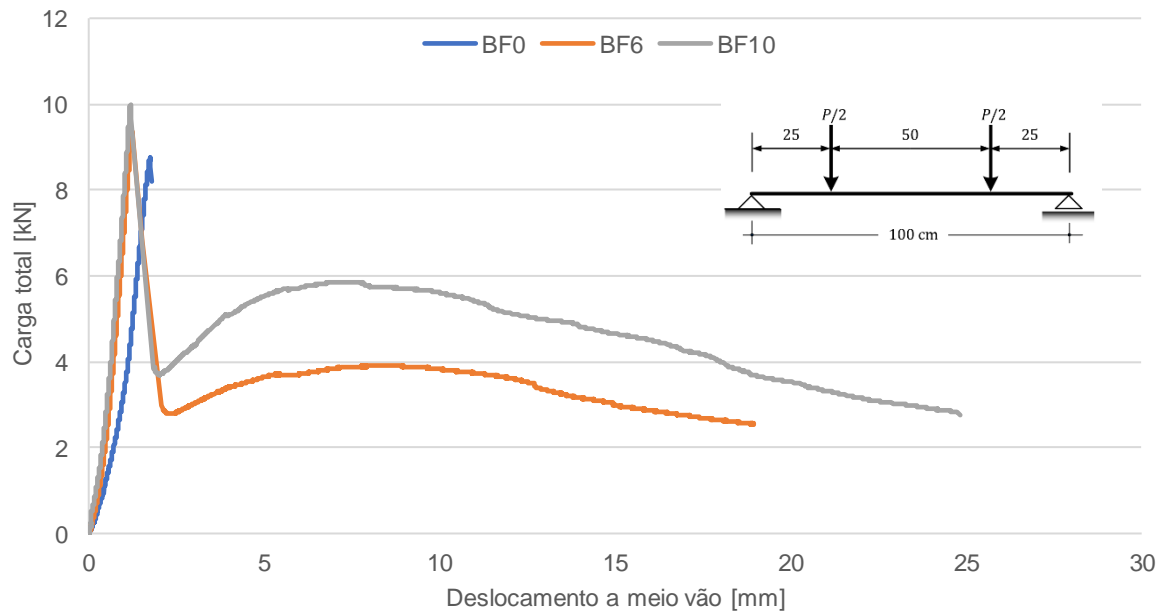


Figura 50 - Comparação entre as lajes com quantidades de fibras diferentes para o Setup 1.

Tabela 17 - Resultados no Setup 1.

Laje	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	P_{ult} (kN)	$\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ (mm)	δ_{ult} (mm)
BF0	8,75	-	1,76	-
BF6	9,34	3,90	1,24	8,34
BF10	10,00	5,86	1,18	7,36

Para este *Setup*, e de acordo com os resultados da Tabela 17 e Figura 50, observou-se que a pré-laje com betão BF10 obteve uma carga máxima superior às restantes. Tal como no *Setup* anterior, a laje com betão BF0 registou a menor carga máxima. Refira-se que a laje com betão BF0 obteve uma menor rigidez e um deslocamento na carga máxima superior às restantes; este resultado não esperado pode ter sido causado por um defeito na instalação de um dos apoios (que se comportou como um apoio com deformação elástica).

- *Setup 2*

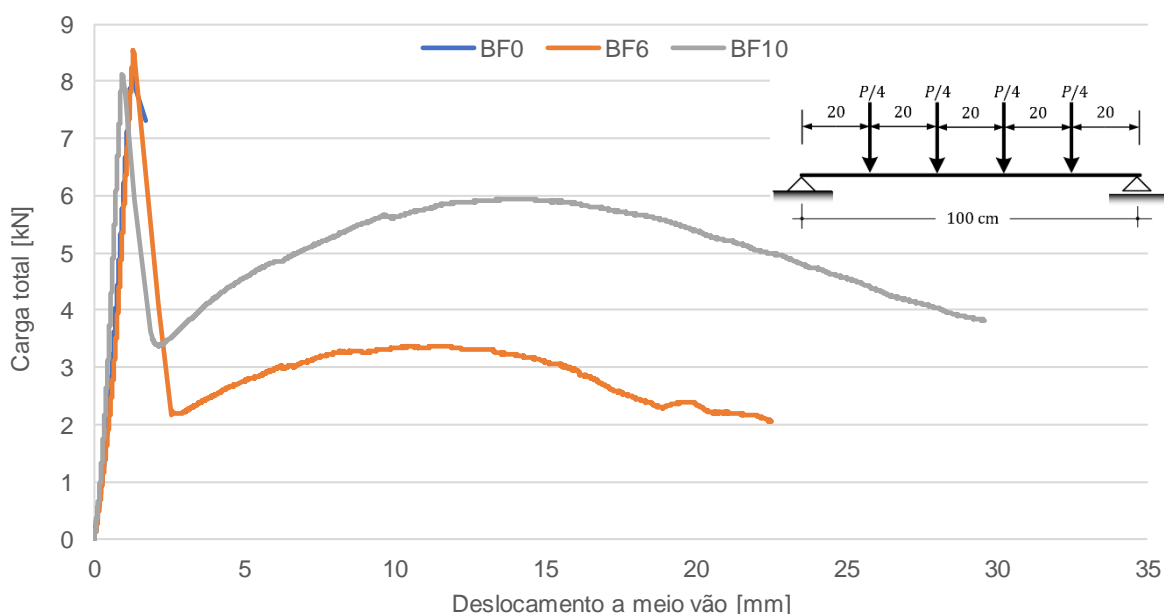


Figura 51 - Comparação entre as lajes com quantidades de fibras diferentes para o *Setup 2*.

Tabela 18 - Resultados no *Setup 2*.

Laje	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	P_{ult} (kN)	$\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ (mm)	δ_{ult} (mm)
BF0	8,05	-	1,26	-
BF6	8,54	3,36	1,30	11,26
BF10	8,12	5,94	0,92	14,29

Relativamente à Tabela 18 e Figura 51, para este *Setup* a pré-laje com betão BF6 atingiu uma carga máxima ligeiramente superior à obtida com o betão BF10 – este resultado não era esperado mas admite-se que se deva à variabilidade experimental (em particular da própria variabilidade das propriedades dos materiais). Contudo, a carga última e o deslocamento último foram superiores na pré-laje com betão BF10. Refira-se ainda que o deslocamento correspondente à carga máxima da pré-laje com BF10 foi ligeiramente inferior aos restantes (resultado não esperado e possivelmente também relacionado com a variabilidade experimental).

- **Setup 3**

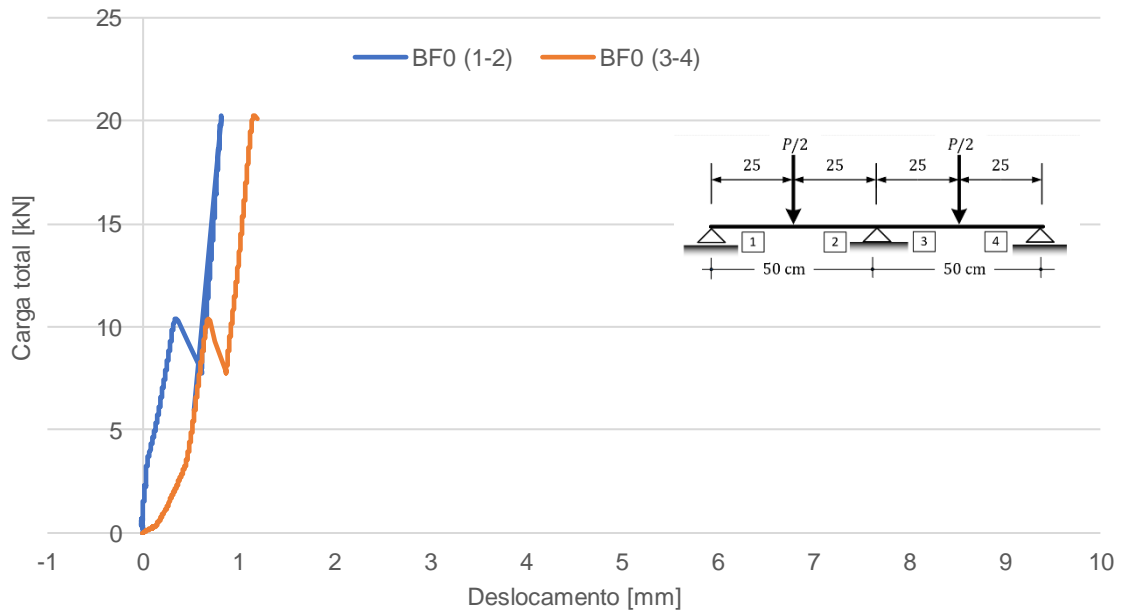


Figura 52 - Comparação do BF0 nos diferentes vãos (1-2 e 3-4) para o Setup 3.

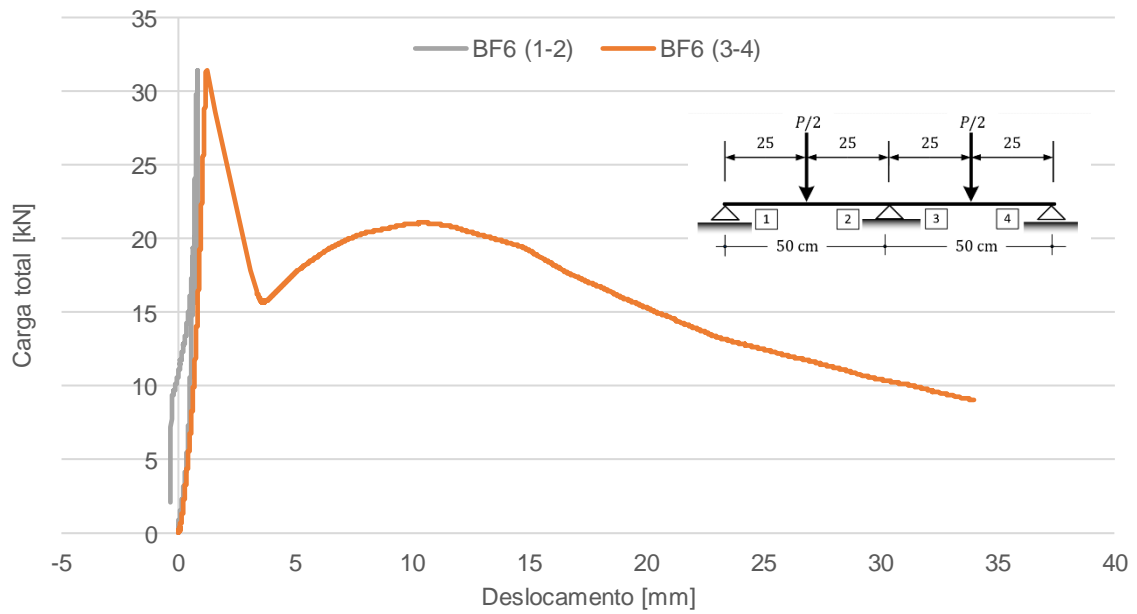


Figura 53 - Comparação do BF6 nos diferentes vãos (1-2 e 3-4) para o Setup 3.

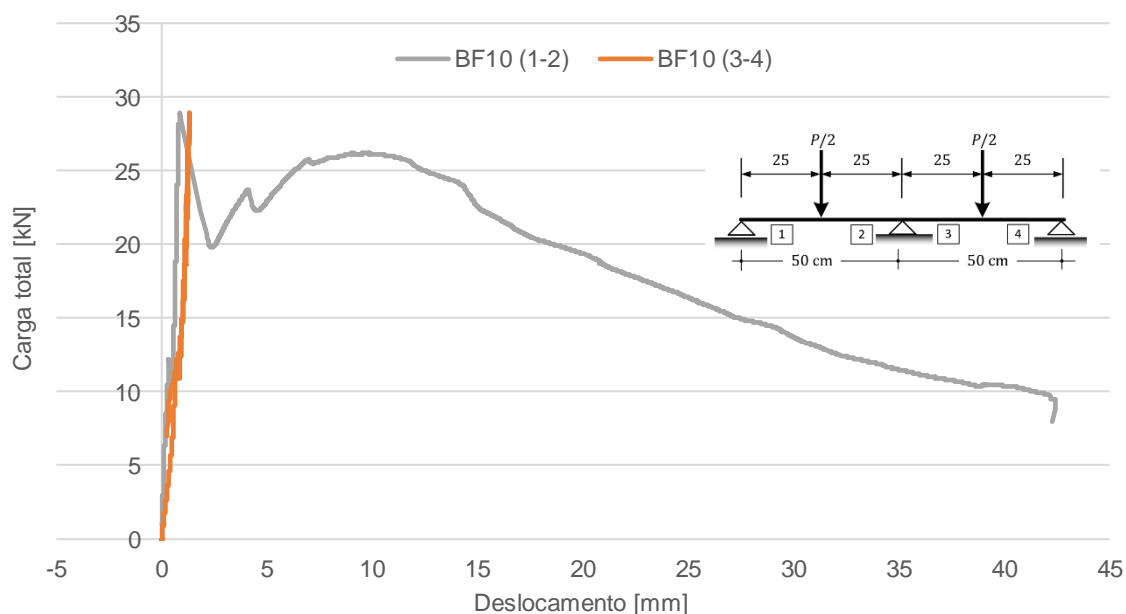


Figura 54 - Comparação do BF10 nos diferentes vãos (1-2 e 3-4) para o Setup 3.

Tabela 19 - Resultados no Setup 3.

Laje	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	P_{ult} (kN)	$\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ (mm)	δ_{ult} (mm)
BF0	20,25	-	0,81	-
BF6	31,48	21,08	0,81	10,43
BF10	28,93	26,22	0,86	9,74

De acordo com os resultados da Tabela 19 e das Figuras 52-54, para este Setup importa referir que ao se atingir a carga máxima observou-se a abertura praticamente simultânea de fendas sobre o apoio central e em um dos vãos (1-2 ou 3-4). No caso da pré-laje BF0 este fenómeno coincidiu com o seu colapso; contudo, nas pré-lajes BF6 e BF10 observou-se que o aumento do deslocamento no vão fendilhado coincidiu com a diminuição do deslocamento no vão oposto, razão que explica o facto de a resposta pós-pico das Figuras 53 e 54 só ter sido captada na curva “carga-deslocamento” num dos vãos (i.e. no vão em que o betão fendilhou). Relativamente à resistência, verificou-se um aumento da carga de rotura da BF0 para a BF6, e uma diminuição ligeira da BF6 para a BF10; contudo, o índice de recuperação da BF10 foi superior (tal como será analisado na secção seguinte). O deslocamento na carga máxima foi idêntico em todas as pré-lajes e o deslocamento último foi maior na BF6.

Na generalidade dos ensaios de flexão realizados às pré-lajes com os 4 Setups descritos acima, a capacidade de carga não aumentou significativamente com a adição de fibras. O principal benefício observado pela adição de fibras revela-se no comportamento pós-pico, dado que, em geral, verificou-se um aumento da deformação com a quantidade de fibras.

3.6.2.2 Modos e cargas de rotura

Para todos os *Setups*, com base nas curvas carga vs. deslocamento apresentadas na secção anterior, foi calculado o momento correspondente à carga máxima ($M_{m\acute{a}x}$) (através da carga de fendilhação experimental e do diagrama de esforços elásticos do *Setup* correspondente). Para o caso das pré-lajes de betão com fibras, foi calculada a percentagem/índice de recuperação de carga após fendilhação e um índice de ductilidade (explicado em baixo). Com o momento correspondente à carga máxima ($M_{m\acute{a}x}$) foi ainda calculada a tensão resistente à tração do betão em flexão através da seguinte expressão.

$$f_{ct} = \frac{M_{m\acute{a}x} * 6}{b * t^2} \text{ (MPa)} \quad (3.4)$$

Sendo b e t a largura e espessura da pré-laje, respetivamente.

O índice de recuperação foi calculado da seguinte forma

$$\text{índice de recupera\c{c}\~{a}o} = \frac{P_{ult}}{P_{m\acute{a}x}} * 100 \text{ (\%)} \quad (3.5)$$

O índice de recuperação indica a capacidade de recuperar carga após a ocorrência da fendilhação.

O índice de ductilidade foi determinado através da expressão:

$$\text{índice de ductilidade} = \frac{\delta_{ult} - \delta_{P_{m\acute{a}x}}}{\delta_{P_{m\acute{a}x}}} \quad (3.6)$$

Este parâmetro foi assumido neste estudo como um indicador da capacidade das pré-lajes apresentarem deformações inelásticas (i.e. em estado fendilhado); em particular, este índice depende da relação entre o deslocamento último (δ_{ult} , correspondente ao máximo local na fase pós-pico) e o deslocamento correspondente à carga máxima ($\delta_{P_{m\acute{a}x}}$).

- *Setup* 0

Relativamente ao *Setup* 0, para a pré-laje BF0 observou-se uma rotura por flexão debaixo do ponto de aplicação de carga (Figura 55). Quanto à pré-laje BF6, de igual modo, observou-se o modo de rotura por flexão, no entanto, a fenda crítica, tal como se observa na Figura 55 (central), surgiu ligeiramente ao lado do ponto de aplicação de carga. Na pré-laje BF10 observou-se igualmente o modo de rotura por flexão mas com o ponto de rotura debaixo do ponto de aplicação de carga.

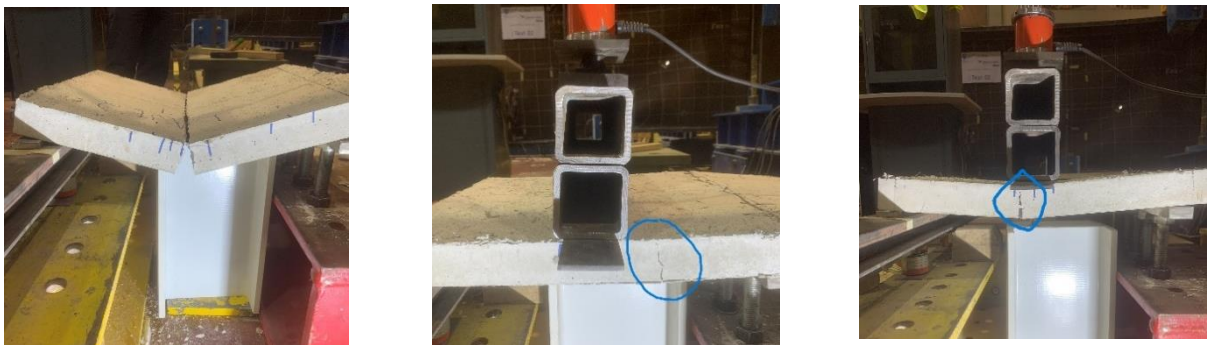


Figura 55 - Rotura das pré-lajes de BF0 (esquerda), BF6 (centro) e BF10 (direita), respetivamente (*Setup* 0).

O momento correspondente à carga máxima para o *Setup 0* foi calculado da seguinte forma (Figura 56):

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{P * L}{4} \text{ (kN.m)} \quad (3.7)$$

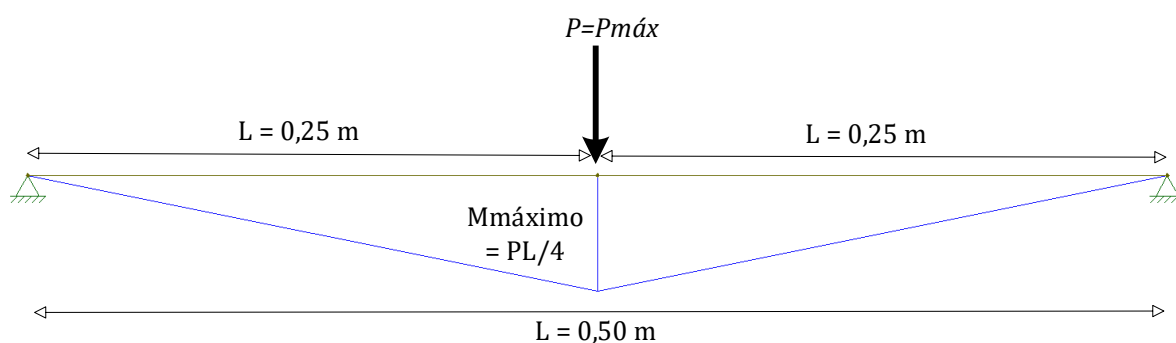


Figura 56 - Momentos no *Setup 0*.

Tabela 20 - Resumo dos resultados obtidos no *Setup 0*.

Laje	$M_{m\acute{a}x}$ (kN.m)	f_{ct} (MPa)	Recuperação (%)	Ductilidade
BF0	1,27	6,10	-	-
BF6	1,50	7,23	52,67	5,60
BF10	1,65	7,91	60,22	5,60

Segundo a Tabela 20, no *Setup 0*, a pré-laje BF10 como apresentou uma carga máxima superior, possui um momento de correspondente à carga máxima e uma resistência à tração igualmente superiores às das pré-lajes BF0 e BF6; o índice de recuperação foi superior na pré-laje com maior quantidade de fibras (BF10); o índice de ductilidade das duas pré-lajes de betão com fibras (BF6 e BF10) foi igual.

- *Setup 1*

Relativamente ao *Setup 1*, para a pré-laje BF0 observou-se a iniciação da rotura por flexão debaixo do ponto de aplicação de carga, apesar desta fenda ter evoluído em diagonal (Figura 57, esquerda). Quanto à pré-laje BF6, o modo de rotura foi igualmente por flexão, com a fenda crítica a surgir sob o ponto de aplicação de carga, tal como se observa na Figura 57 (central). Na pré-laje BF10 observou-se um modo de rotura semelhante à BF6 (Figura 57, direita).



Figura 57 - Rotura das pré-lajes de BF0 (esquerda), BF6 (centro) e BF10 (direita) no Setup 1.

O momento correspondente à carga máxima deste Setup é calculado da seguinte forma (Figura 58):

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{P * L}{8} \text{ (kN.m)} \quad (3.8)$$

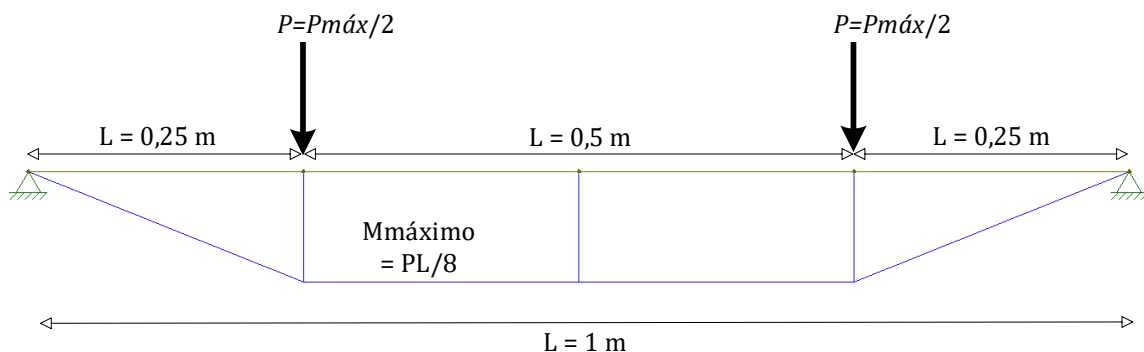


Figura 58 - Momentos no Setup 1.

Tabela 21 - Resumo dos resultados obtidos no Setup 1.

Laje	$M_{m\acute{a}x}$ (kN.m)	f_{ct} (MPa)	Recuperação (%)	Ductilidade
BF0	1,09	5,23	-	-
BF6	1,17	5,62	41,75	5,62
BF10	1,25	6,00	58,60	5,24

De acordo com a Tabela 21, no Setup 1 a pré-laje de BF10 como apresentou uma carga máxima maior, possui um momento correspondente à carga máxima e uma resistência à tração igualmente maior, tal como o índice de recuperação. O índice de ductilidade da pré-laje BF10 foi ligeiramente inferior ao da BF6.

- *Setup 2*

Quanto ao *Setup 2*, para a pré-laje BF0 observou-se uma rotura por flexão debaixo do ponto de aplicação de carga (Figura 59, esquerda). No BF6, de igual modo, houve um modo de rotura por flexão com a fenda crítica a surgir sob o ponto de aplicação de carga (Figura 59, centro). Na pré-laje BF10 observou-se igualmente o modo de rotura por flexão, com a fenda crítica a surgir ligeiramente ao lado do ponto de aplicação de carga (no vão de momento fletor máximo), tal como se observa na Figura 59 (direita).



Figura 59 - Rotura das pré-lajes de BF0 (esquerda), BF6 (centro) e BF10 (direita) no *Setup 2*.

O momento correspondente à carga máxima deste *Setup* é calculado da seguinte forma (Figura 60):

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{6 * P * L}{40} \text{ (kN.m)} \quad (3.9)$$

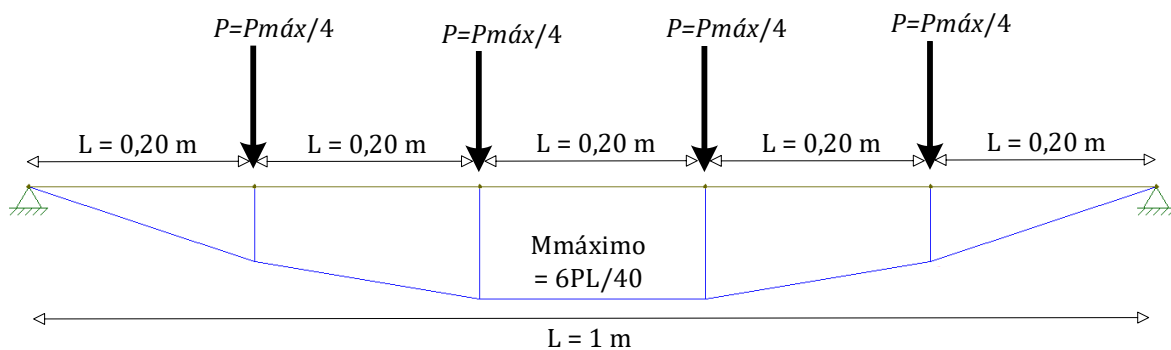


Figura 60 - Momentos no *Setup 2*.

Tabela 22 - Resumo dos resultados obtidos no *Setup 2*.

Laje	$M_{m\acute{a}x}$ (kN.m)	f_{ct} (MPa)	Recupera\c{c}\~ao (%)	Ductilidade
BF0	1,21	5,80	0	0
BF6	1,28	6,14	39,34	7,66
BF10	1,22	5,86	73,15	14,53

Para o *Setup 2*, de acordo com a Tabela 22, a pré-laje BF6 como apresentou uma carga máxima superior, possui um momento correspondente à carga máxima e uma resistência à tra\c{c}\~ao

igualmente superiores às restantes. Contudo, na pré-laje BF10 obteve-se os maiores índices de recuperação e de ductilidade, confirmando o efeito benéfico do aumento da quantidade de fibras.

- *Setup 3*

Quanto ao *Setup 3*, a rotura da pré-laje BF0 ocorreu pelo aparecimento praticamente simultâneo de fendas de flexão no apoio central e debaixo de um dos pontos de aplicação de carga. De igual modo, nas pré-lajes BF6 e BF10 o modo de rotura foi por flexão com as fendas críticas a surgirem no apoio central e num dos pontos de aplicação de carga, tal como se observa na Figura 61.



Figura 61 - Rotura das pré-lajes de BF0 (esquerda), BF6 (centro) e BF10 (direita) no Setup 3.

O momento correspondente à carga máxima deste Setup sob o apoio central foi calculado com auxílio do diagrama de esforços elásticos (obtido no programa *Ftool*), colocando as cargas máximas nos pontos indicados na Figura 62.

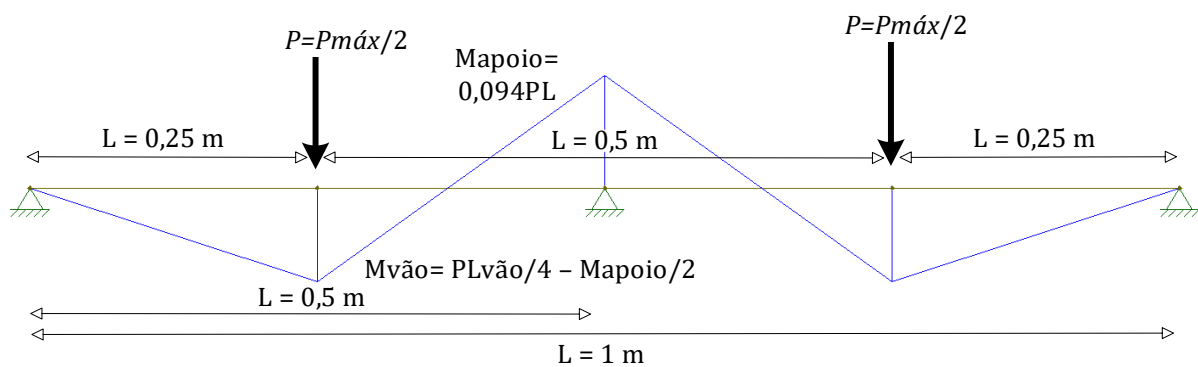


Figura 62 - Momentos no Setup 3.

Tabela 23 - Resumo dos resultados obtidos no Setup 3.

Laje	$M_{máx}$ (kN.m)	f_{ct} (Mpa)	Recuperação (%)	Ductilidade
BF0	0,95	4,56	0	0
BF6	1,48	7,10	66,96	11,88
BF10	1,36	6,53	90,63	10,33

Por último, de acordo com a Tabela 23, a pré-laje BF6 como apresentou uma carga máxima maior, possui um momento correspondente à carga máxima e uma resistência à tração igualmente maior. Para a pré-laje BF10 obteve-se um índice de recuperação superior, contudo, o índice de ductilidade foi ligeiramente inferior à pré-laje BF6.

De uma forma geral, para todos os *Setups*, observou-se que o índice de recuperação aumenta com a quantidade de fibras (Tabela 24). Relativamente ao índice de ductilidade (Tabela 25), com exceção dos resultados do *Setup 2* em que o da pré-laje BF10 foi significativamente superior à BF6, não parece haver uma relação clara entre o valor deste índice e a dosagem de fibras.

Tabela 24 - Comparação da percentagem de recuperação de todos os *Setups*.

Recuperação (%)	BF0	BF6	BF10
Setup 0	0	52,67	60,22
Setup 1	0	41,75	58,60
Setup 2	0	39,34	73,15
Setup 3	0	66,96	90,63

Tabela 25 - Comparação da ductilidade de todos os *Setups*.

Ductilidade	BF0	BF6	BF10
Setup 0	0	5,60	5,60
Setup 1	0	5,62	5,24
Setup 2	0	7,66	14,53
Setup 3	0	11,88	10,33

3.6.2.3 Comparação com estimativas de resistência

Nesta subsecção comparam-se os resultados obtidos experimentalmente nas pré-lajes com as estimativas de resistência obtidas a partir das propriedades dos materiais determinadas nos ensaios de flexão aos provetes prismáticos e de compressão diametral (tração) em cilindros; além disso, também se recorreu às tensões resistentes à tração em flexão determinadas no *Setup 0* para estimar as cargas de rotura das pré-lajes ensaiadas nos outros *Setups*.

- *Setup 0*

As previsões das cargas máximas das pré-lajes obtidas com base nas propriedades dos betões em tração (determinadas através de provetes cilíndricos e prismáticos) listam-se na Tabela 26, onde também se inclui as cargas máximas experimentais obtidas nos ensaios de flexão às pré-lajes ($P_{máx}$). Tal como era esperado, as estimativas de carga de rotura das pré-lajes obtidas através das propriedades dos betões determinadas nos ensaios de flexão dos prismas (" $P_{máx}$ propriedades dos prismas") são as que mais se aproximam das cargas de rotura experimentais das pré-lajes (" $P_{máx}$ experimental").

Tabela 26 - Previsões da carga máxima obtida através das propriedades do betão dos cilindros e prismas para o Setup 0.

Setup 0	$P_{m\acute{a}x}$ Propriedades dos Cilindros (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ Propriedades dos Prismas (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ Experimental (kN)
BF0	5,84	10,20	11,03
BF6	6,08	10,20	13,00
BF10	6,40	11,92	14,30

- Setup 1

Na Tabela 27 resumem-se as previsões das cargas máximas das pré-lajes obtidas com base nas propriedades dos betões em tração determinadas através de (i) provetes cilíndricos, (ii) prismáticos e (iii) dos valores de f_{ct} obtidos dos ensaios às pré-lajes do Setup 0 (valores da Tabela 20). De acordo com a Tabela 27, as estimativas de carga de rotura das pré-lajes obtidas através das propriedades dos betões determinadas nos ensaios de flexão dos prismas (" $P_{m\acute{a}x}$ propriedades dos prismas") são as que mais se aproximam das cargas de rotura experimentais das pré-lajes (" $P_{m\acute{a}x}$ experimental").

Tabela 27 - Previsão da carga máxima obtida através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0 para o Setup 1.

Setup 1	$P_{m\acute{a}x}$ Propriedades dos Cilindros (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ Propriedades dos Prismas (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ Setup 0 (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ Experimental (kN)
BF0	5,84	10,20	11,04	8,75
BF6	6,05	10,20	13,04	9,34
BF10	6,40	11,93	14,32	10,00

- Setup 2

Para o Setup 2, e analogamente ao apresentado para o Setup 1, a Tabela 28 compara as diferentes estimativas das cargas máximas com as obtidas experimentalmente. Tal como esperado, confirma-se que as estimativas de carga de rotura obtidas através das propriedades dos betões determinadas nos ensaios de flexão dos prismas (" $P_{m\acute{a}x}$ propriedades dos prismas") são as que mais se aproximam das cargas de rotura experimentais das pré-lajes (" $P_{m\acute{a}x}$ experimental").

Tabela 28 - Previsão da carga máxima obtida através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0 para o Setup 2.

Setup 2	$P_{m\acute{a}x}$ Propriedades dos Cilindros (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ Propriedades dos Prismas (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ Setup 0 (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ Experimental (kN)
BF0	4,87	8,5	9,2	8,05
BF6	5,1	8,5	10,87	8,54
BF10	5,33	9,93	11,93	8,12

- *Setup 3*

Para estimar as cargas de rotura das pré-lajes do *Setup 3* é importante referir que foram consideradas duas hipóteses distintas. A primeira assume a formação de uma rótula “plástica” no apoio central após a formação da primeira fissura, existindo uma quebra no gráfico até atingir o $P_{m\acute{a}x}$, sendo esse valor considerado P_1 e $P_{m\acute{a}x} = P_1 + \Delta P$ (Figuras 63 e 64). Na pré-laje de BF6 a ocorrência dessa primeira fissuração não foi perceptível nas curvas carga vs. deslocamento.

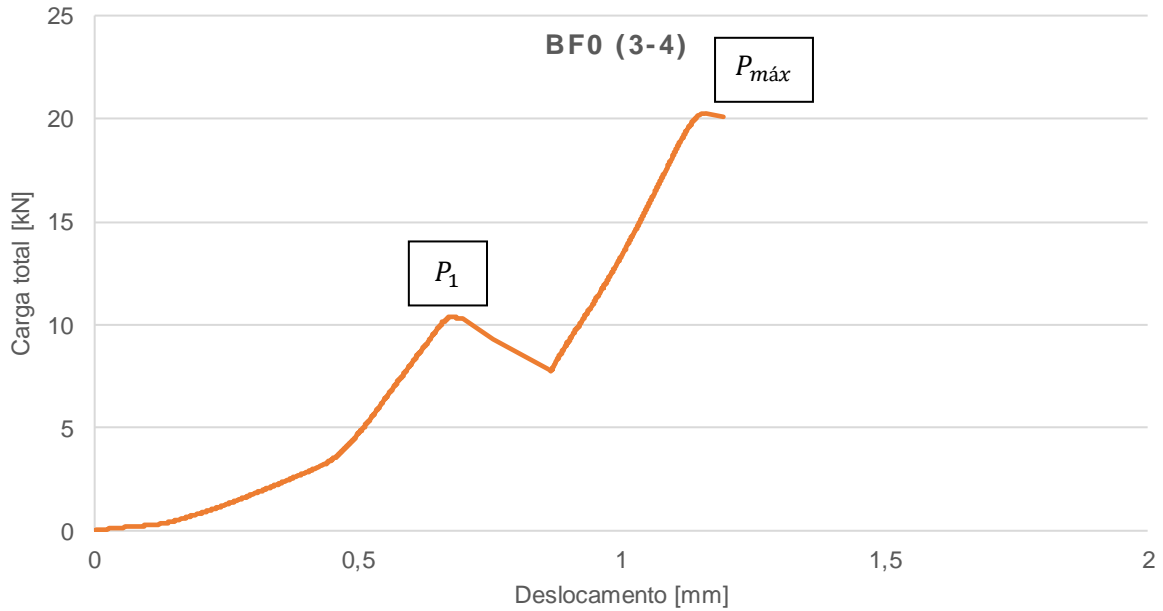


Figura 63 - Identificação do P_1 experimental na pré-laje BF0 do Setup 3.

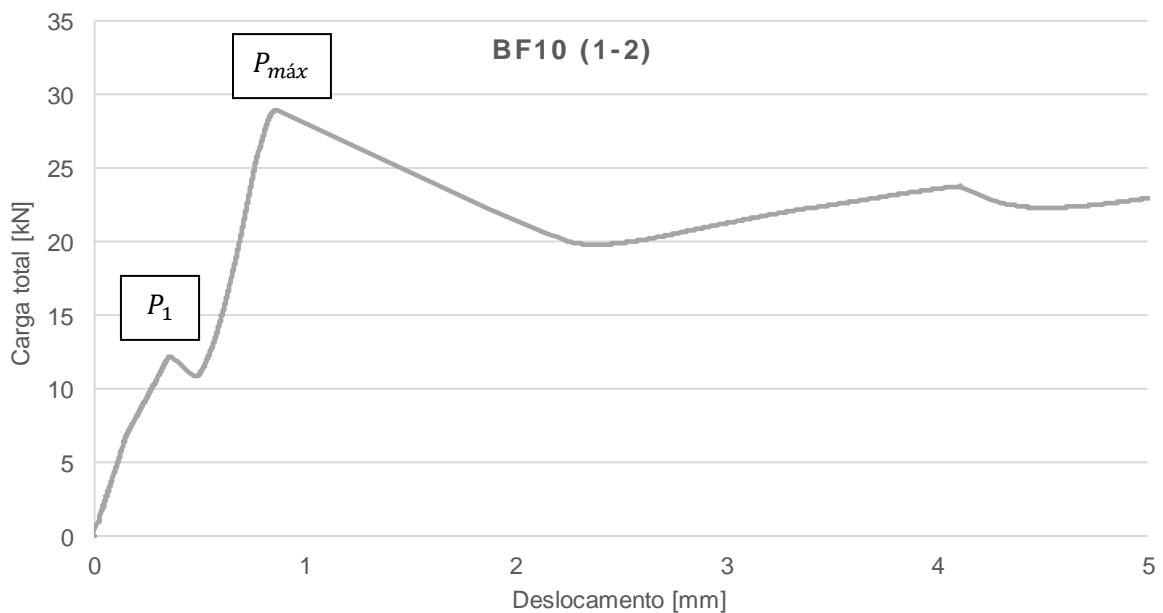


Figura 64 - Identificação do P_1 experimental na pré-laje BF10 do Setup 3.

Para o cálculo da carga P_1 (Tabela 29) que provoca um momento no apoio central igual ao momento de fendilhação (M_{cr}), calculado através das propriedades de betão dos cilindros, prismas e Setup 0, recorreu-se ao diagrama de esforços elásticos determinado no programa *Ftool* (Figura 65).

$$M_{cr} = P * 0,094 * L \text{ (kN.m)} \quad (3.10)$$

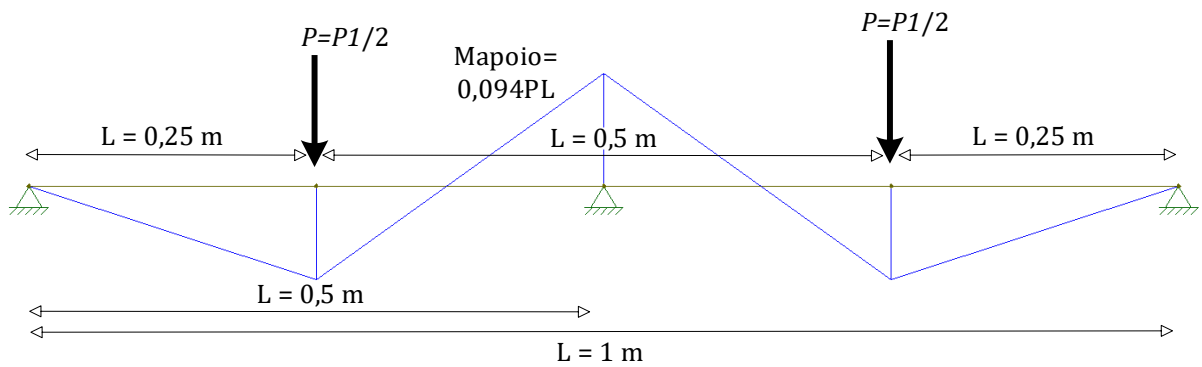


Figura 65 - Cálculo do M_{cr} com a carga P_1 .

Tabela 29 – Valores de P_1 através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.

Setup 3	Propriedades dos Cilindros P_1 (kN)	Propriedades dos Prismas P_1 (kN)	Setup 0 P_1 (kN)
BF0	15,53	27,65	29,36
BF6	16,17	27,65	34,68
BF10	17,02	31,70	38,08

Associado ao valor de P_1 foi calculado o momento fletor a meio vão $M_{vão, fase 1}$ (Fase 1 – elástica), através da seguinte forma:

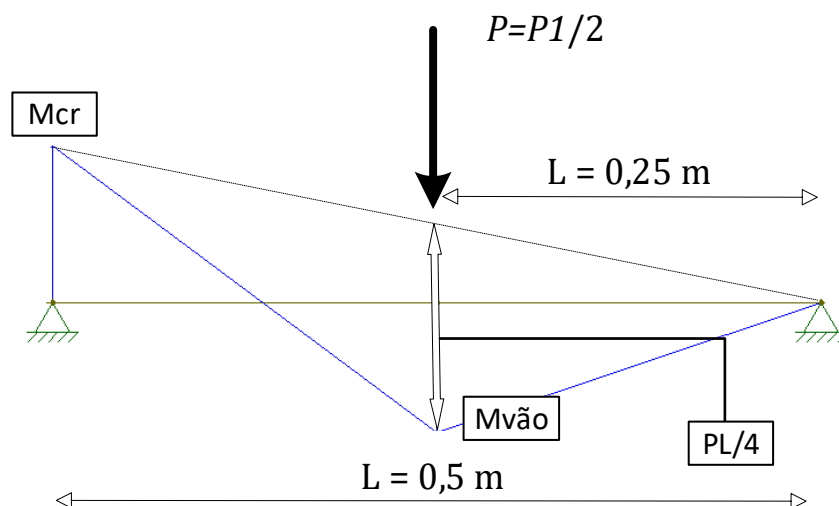


Figura 66 - Cálculo do $M_{vão}$.

$$M_{v\tilde{a}o, fase 1} = \frac{P * L}{4} - \frac{M_{cr}}{2} \text{ (kN.m)} \quad (3.11)$$

Tabela 30 - Cálculo do $M_{v\tilde{a}o, fase 1}$ através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.

Setup 3	Propriedades dos Cilindros $M_{v\tilde{a}o, fase 1}$ (kN.m)	Propriedades dos Prismas $M_{v\tilde{a}o, fase 1}$ (kN.m)	Setup 0 $M_{v\tilde{a}o, fase 1}$ (kN.m)
BF0	0,60	1,08	1,15
BF6	0,63	1,08	1,35
BF10	0,66	1,24	1,49

De uma forma geral, os valores calculados para o P_1 e $M_{v\tilde{a}o}$, mostrados nas Tabelas 29 e 30, foram maiores para o Setup 0.

Numa segunda fase, após a formação da rótula sob o apoio central, assumiu-se que o acréscimo de carga ΔP (Figura 67 – fase 2) provocava o seguinte diagrama de esforços:

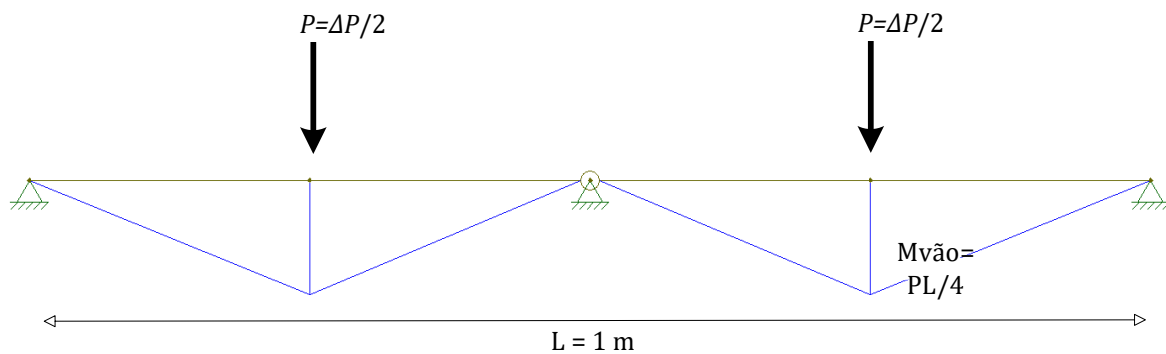


Figura 67 - Determinação do $M_{v\tilde{a}o, fase 2}$ (Fase 2) para ΔP .

Assumindo a sobreposição de efeitos dos diagramas das Figuras 65 e 67, e para a situação em que o momento de fendilhação é atingido simultaneamente no apoio central e nos vãos, tem-se o seguinte diagrama de esforços (Figura 68):

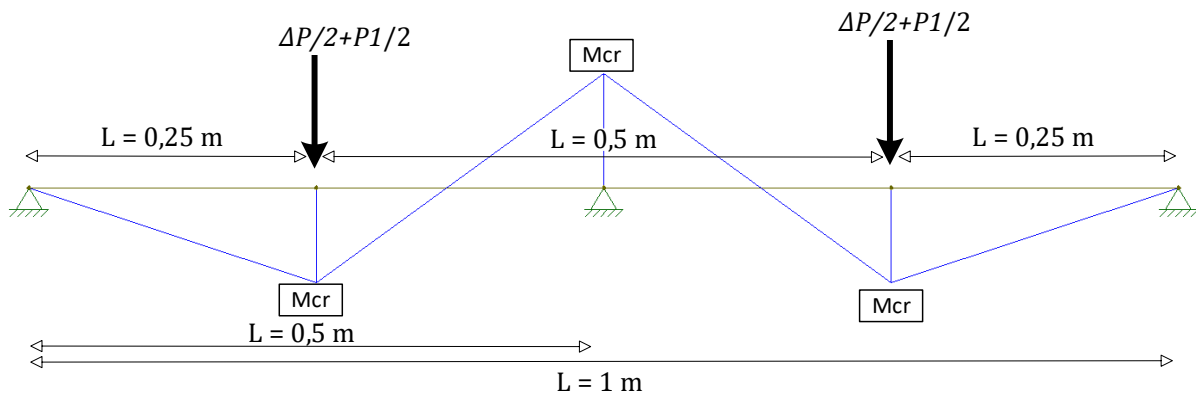


Figura 68 - Sobreposição de efeitos para a primeira hipótese no Setup 3.

Para este diagrama final (Figura 68), o momento de fendilhação a meio vão pode ser calculado da seguinte forma:

$$M_{cr} = M_{vão}^{Fase1} + M_{vão}^{Fase2} \quad (\Rightarrow) \quad M_{cr} = \frac{\Delta P / 2 * L}{4} + M_{vão}^{Fase1} \quad (kN.m) \quad (3.12)$$

Tabela 31 - Cálculo do ΔP através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.

Setup 3	Propriedades dos Cilindros ΔP (kN)	Propriedades dos Prismas ΔP (kN)	Setup 0 ΔP (kN)
BF0	2,08	3,52	3,68
BF6	2,08	3,52	4,48
BF10	2,24	4,00	4,80

Tal como aconteceu nos valores calculados para o P_1 e $M_{vão}$, o ΔP calculado (Tabela 31) foi maior no Setup 0.

Portanto os valores de P_{total} ($= P_1 + \Delta P$) são os seguintes (Tabela 32):

Tabela 32 - P_{total} obtido através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.

Setup 3	Propriedades dos Cilindros P_{Total} (kN)	Propriedades dos Prismas P_{Total} (kN)	Setup 0 P_{Total} (kN)	$P_{máx}$ Experimental (kN)
BF0	17,61	31,17	33,04	20,23
BF6	18,25	31,17	39,16	31,48
BF10	19,26	35,70	42,88	28,93

O modelo que assume a formação de rótula sobrestima a resistência experimental das pré-lajes, com exceção quando são utilizadas as propriedades do betão obtidas através dos ensaios dos cilindros.

A segunda hipótese de cálculo para estimar as cargas máximas das pré-lajes assume uma distribuição de esforços elástica com redistribuição, e, por isso, apenas é aplicada às pré-lajes de betão com fibras (BF6 e BF10). Assume-se que após a primeira fissura sobre o apoio, o momento residual que fica instalado ($M_{patamar}$) é o corresponde ao que foi calculado através do P_{ult} do Setup 0 (Figura 69 e Tabela 33). O $M_{patamar}$ veio da observação dos diagramas carga vs. deslocamento onde conclui que após a fissuração das pré-lajes BF6 e BF10 a capacidade de deformação e a recuperação de carga são significativas.

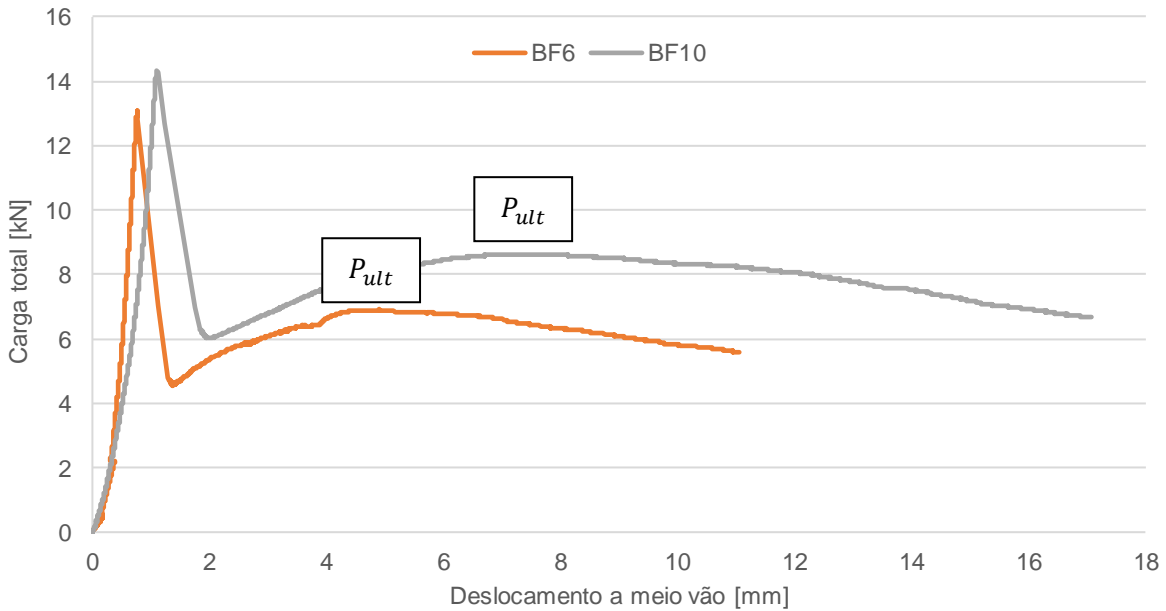


Figura 69 - Determinação do P_{ult} no Setup 0.

Tabela 33 - Cálculo do $M_{patamar}$.

Setup 3 (2ª hipótese)	$M_{patamar}$ (kN.m)
BF0	-
BF6	0,86
BF10	1,08

O $P_{máx}$ é calculado através da equação seguinte, compatível com a distribuição de esforços elásticos com uma distribuição ilustrada na Figura 70; refira-se que o valor de M_{cr} foi o calculado através das propriedades de betão dos cilindros, prismas e Setup 0, tal como nas análises anteriores.

$$-\frac{M_{patamar}}{2} + \frac{P_{máx} * L}{4} = M_{cr} \quad (=) \quad P_{máx} = \left(M_{cr} + \frac{M_{patamar}}{2} \right) * \frac{8}{L} \quad (kN) \quad (3.13)$$

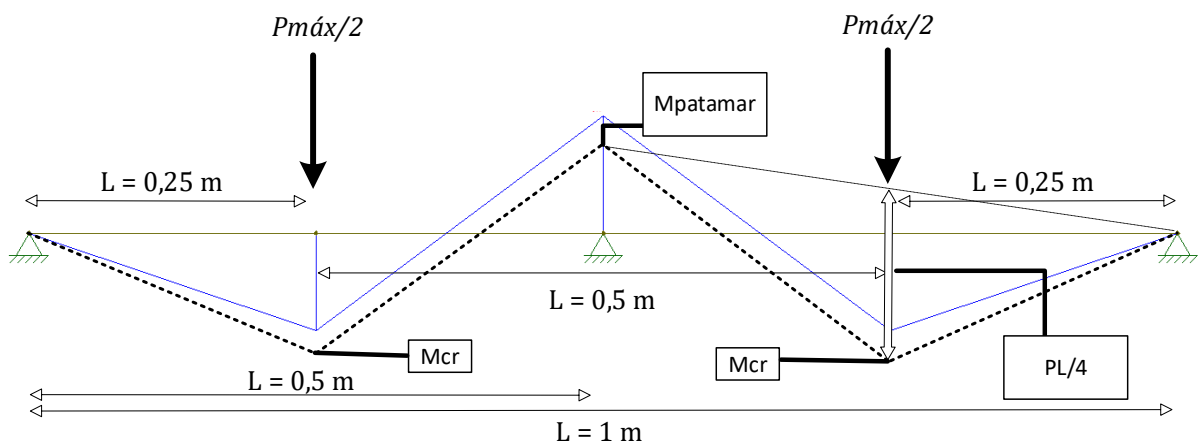


Figura 70 - Relação do M_{cr} com o $M_{patamar}$ (Diagrama azul – distribuição elástica de esforços; Diagrama preto a tracejado – distribuição elástica com redistribuição de esforços do apoio para o vão).

Tabela 34 - $P_{m\acute{a}x}$ obtido através das propriedades do betão dos cilindros, prismas e Setup 0.

Setup 3 (2ª hipótese)	Propriedades dos Cilindros $P_{m\acute{a}x}$ (kN)	Propriedades dos Prismas $P_{m\acute{a}x}$ (kN)	Setup 0 $P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$P_{m\acute{a}x}$ experimental (kN)
BF0	-	-	-	20,23
BF6	18,98	27,28	32,96	31,48
BF10	21,44	32,48	37,12	28,93

Tal como tinha sido observado nas estimativas dos *Setups* anteriores e de acordo com a Tabela 34, conclui-se que as cargas de rotura estimadas a partir das propriedades dos provetes cilíndricos foram menores do que os valores experimentais, enquanto as obtidas através do *Setup 0* foram superiores. As estimativas de carga de rotura das pré-lajes obtidas através das propriedades dos betões determinadas nos ensaios de flexão dos prismas (" $P_{m\acute{a}x}$ propriedades dos prismas") são as que mais se aproximam das cargas de rotura experimentais das pré-lajes (" $P_{m\acute{a}x}$ experimental").

Este modelo de cálculo que assumiu um momento residual no apoio permitiu obter melhores estimativas da carga de rotura do que a hipótese anterior em que se assumiu a formação de rótula sobre o apoio central.

3.7 Espessura máxima da laje a betonar sobre as pré-lajes

Nesta secção pretende-se verificar qual a espessura máxima da laje de betão armado da ponte marítima (ver secção 3.1) que pode ser betonada sobre as pré-lajes. Para tal, como as estimativas de resistência das pré-lajes obtidas através das propriedades do betão dos prismas foram as que se aproximaram mais das resistências experimentais, optou-se por usar os valores de resistência à tração do betão obtidas dessa forma nos cálculos da presente secção. Refira-se que o efeito dinâmico da operação de betonagem não foi considerado nos cálculos que se seguem.

Calculou-se o momento de fissuração da pré-laje (Figura 71), usando o f_{cfm} dos prismas e o vão $L = 1,0$ m, da seguinte forma:

$$M_{cr} = \frac{b * t^2}{6} * f_{cfm} = \frac{0,5 * 0,05^2}{6} f_{cfm} \text{ (kN.m)} \quad (3.14)$$

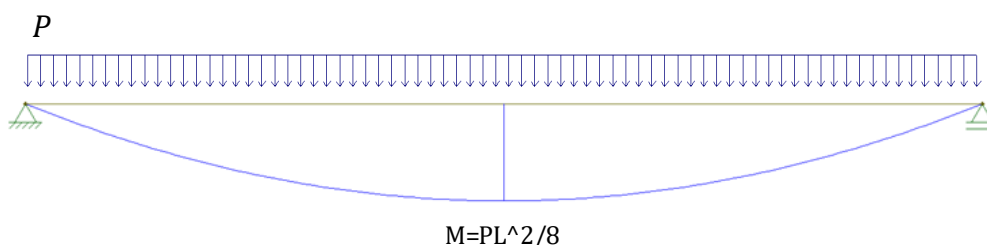


Figura 71 - Momento máximo numa estrutura simplesmente apoiada com uma carga uniformemente distribuída..

Foi simulada uma laje de betão armada com elevada taxa de armadura ($\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$) colocada por cima da pré-laje, de forma a aplicar uma carga uniformemente distribuída e relacionar o momento de fissuração com o momento máximo da pré-laje, foi ainda considerada uma sobrecarga adicional de $1,5 \text{ kN/m}^2$ equivalente à ação dos equipamentos e trabalhadores durante a operação de

betonagem e o peso próprio da pré-laje ($\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$) obtendo-se assim a espessura máxima da laje a betonar.

$$P = 26 \times t \times 0,5 + 1,5 \times 0,5 + 24 \times 0,05 \times 0,5 \text{ (kN/m)} \quad (3.15)$$

Sendo t a espessura da laje de betão, 0,5 metros a largura da laje e 0,05 a espessura da pré-laje.

Substituindo P no momento máximo da pré-laje e igualando-se ao momento de fendilhação estimado para os diferentes tipos de betão, obtêm-se as seguintes espessuras máximas da laje a betonar:

Tabela 35 - Determinação das espessuras máximas da laje a betonar.

	M_{cr} (kN.m)	P (kN/m)	t (m)
BF0	1,28	10,19	0,68
BF6	1,28	10,19	0,68
BF10	1,50	12,01	0,82

De acordo com os resultados da Tabela 35, conclui-se que quanto maior for a dosagem de fibras, maior é a espessura admissível da laje a betonar. Como a espessura objetivo da laje do tabuleiro da ponte descrita na secção 3.1 possui um valor de 0,24 metros, conclui-se que todas as pré-lajes testadas no presente estudo apresentam uma resistência suficiente para suportar as cargas impostas durante a fase de betonagem da laje do tabuleiro. Contudo, importa salientar que esta conclusão foi obtida utilizando valores médios das propriedades dos materiais e valores das ações não majoradas – numa situação de projeto real, seria necessário afetar as ações e propriedades dos materiais dos respetivos coeficientes parciais de segurança.

4. Conclusões e desenvolvimentos futuros

4.1 Conclusões do trabalho realizado

O trabalho desenvolvido na presente dissertação enquadra-se no contexto do crescente desenvolvimento e procura da tecnologia de betão com incorporação de fibras sintéticas para aplicações (estruturais e não estruturais) em Engenharia Civil. O estudo experimental pretendeu explorar uma possível aplicação prática deste material e foi enquadrado num caso de estudo real em que se pretendia avaliar a possibilidade de utilizar pré-lajes de betão com fibras, com uma espessura máxima de 5 cm e sem armadura ordinária, como cofragens perdidas na betonagem da laje de tabuleiro de uma ponte a construir em ambiente marítimo. Neste enquadramento, optou-se por caracterizar em ambiente laboratorial controlado o comportamento de pré-lajes constituídas por betão pré-doseado com adição de fibras sintéticas de poliolefinas, por constituírem um produto comercialmente disponível para este fim e, em particular, por apresentarem boa resistência química em ambientes agressivos.

Na primeira fase foram realizados ensaios de caracterização das propriedades mecânicas à compressão, tração e flexão de provetes de BS (como referência) e de BRFS com duas dosagens de fibras sintéticas (6 kg/m³ e 10 kg/m³). Nestes ensaios de caracterização do material, de uma forma geral, verificou-se um aumento da resistência com a dosagem de fibras. Também foi perceptível que nos provetes com fibras, após atingir a carga máxima, não ocorreu a separação total das duas metades dos provetes. De facto, os ensaios de flexão em prismas permitiram confirmar o efeito benéfico da adição de fibras na capacidade de deformação pós-fissuração, o que é apontado na literatura como uma das principais vantagens deste material.

Seguidamente, foram realizados ensaios de flexão em pré-lajes constituídas pelos 3 tipos de betão mencionados e com dimensões definidas de acordo os requisitos geométricos do projeto que originou o presente estudo (100 x 50 x 5 cm³, comprimento x largura x espessura), sujeitas a diferentes tipos de carregamento e condições de apoio, que, além de procurarem simular aproximadamente as ações a que serão sujeitas no caso de estudo real, pretenderam simular outras possíveis aplicações destas pré-lajes. Os resultados obtidos mostraram um aumento da carga máxima e da carga última para o caso e da resistência residual pós-fissuração com a dosagem de fibras, consequência do aumento da tensão resistente à tração em flexão do betão com maior quantidade de fibras. Refira-se ainda que em ambas as dosagens de fibras foi possível atingir níveis de ductilidade consideráveis; este parâmetro não se mostrou sensível ao aumento da quantidade de fibras.

As cargas máximas obtidas nos ensaios de flexão das várias pré-lajes foram comparadas com as estimativas de resistência obtidas considerando diferentes propriedades do betão (obtidas através de compressão diametral de cilindros, flexão de prismas, ou ensaios de flexão em 3 pontos de pré-lajes – *Setup 0*). Na generalidade, as estimativas de resistência das pré-lajes obtidas com recurso às propriedades dos prismas foram as que mais se aproximaram dos valores experimentais, enquanto as estimativas obtidas pelas propriedades dos cilindros foram as que mais se afastaram das cargas experimentais. Na parte final do trabalho, como forma de verificar a adequabilidade da utilização das pré-lajes estudadas à utilização pretendida no âmbito do caso de estudo, estimou-se qual a espessura máxima da laje a betonar sobre estas, considerando as ações impostas durante a fase construtivas e

a resistência do betão obtida através dos ensaios de flexão aos prismas. Conclui-se que todas as pré-lajes estudadas apresentam uma resistência suficiente para suportar a carga gravítica imposta durante a fase de betonagem da laje do tabuleiro com 0,24 m de espessura, incluindo as pré-lajes de betão simples sem fibras (BF0). No entanto, pela ductilidade da resposta das pré-lajes de betão com fibras (BF6 e BF10), consideram-se uma melhor solução que as pré-lajes constituídas por betão simples de comportamento puramente frágil.

4.2 Desenvolvimentos futuros

No seguimento do presente trabalho identificam-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Comparação técnica e económica entre as soluções de pré-laje estudadas no presente estudo com diferentes soluções: (i) tradicionais de cofragens reutilizáveis em madeira/metal; (ii) pré-lajes de betão com e sem fibras, mas com armaduras convencionais; (iii) pré-lajes de betão com armaduras em FRP;
- Realização de um ensaio de resistência ao corte em prismas de betão com e sem fibras, com o objetivo de obter as propriedades necessárias para estimar a resistência das pré-lajes ao esforço transversal;
- Estudar o comportamento a longo prazo (durabilidade) de betão com fibras de poliolefinas;
- Estudar a capilaridade (absorção de água) com a realização de ensaios, de forma a avaliar a permeabilidade do betão reforçado com fibras;
- Estudar pré-lajes com maiores percentagens de fibras e realização dos mesmos ensaios para determinação da sua resistência.

No planeamento de futuros projetos, é fundamental considerar as recentes inovações tecnológicas relacionadas com novos tipos de fibras constituídas por materiais inovadores, com geometrias alternativas (formas de ancoragem e/ou aderência ao betão melhorada), que permitam maiores acréscimos de resistência à compressão e à tração, e confiram às estruturas de betão melhor comportamento em estado fissurado (melhorando a resposta em situações de serviço) e maior capacidade de deformação/ductilidade (benéfico para o comportamento em estado limite último).

Referências Bibliográficas

- [1] J.B. Aguiar, "Reabilitação de Estruturas de Betão Armado", *Jornal do Seminário de Construção Sustentável*, Guimarães: Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, pp. 23-38, 2002.
- [2] V. Li, "Large volume, high-performance applications of Fibres in civil engineering", *Journal of Applied Polymer Sciences*, John Wiley & Sons, Inc., vol. 83, pp. 660-686, 2002.
- [3] E. Ulrix, N. Ferreira, "State of The Art - Betões com Fibras em Aplicações Subterrâneas", 1^{as} jornadas de materiais da construção, Porto, Faculdade de Engenharia do Porto, pp. 15-43, 2011.
- [4] A.V. Gysel, "Study of the pull-out behavior of steel Fibres embedded in a cementitious matrix with application to steel Fibre concrete subjected to flexural" PhD Thesis, Gent University, 2000.
- [5] A. Laning, "Synthetic Fibres", *Concrete Construction*, The Aberdeen Group, Publication #C920525, 1992.
- [6] V. Corinaldesi, G. Moriconi, "Use of synthetic fibres in self-compacting lightweight aggregate concretes", *Journal of Building Engineering*, vol. 4, pp. 247-254 2015.
- [7] C.R.P. Soares, "Ensaio não-destrutivos para a caracterização de betões de elevado desempenho reforçado com fibras", Porto: Departamento de Engenharia Civil, FEUP, p. 208, 2013.
- [8] J.C.A. Júnior, L.C.F.M. Silva, G. Weber, "Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades do concreto", *Revista Matéria*, vol.22, no.01, p. 9, 2017.
- [9] L.A.P. Lourenço, "Betão Reforçado com Fibras: aplicações e técnicas de inspeção e reforço de elementos estruturais afetados pela ação de um fogo", Guimarães: Tese de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, p. 267, 2012.
- [10] A. Naaman, "Engineered steel Fibres with optimal properties for reinforcement of cement composites", *Japan Concrete Institute, Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 241-252, 2003.
- [11] L. Won, D. Lim, C. Park, "Bond behavior and flexural performance of structural synthetic Fibre-reinforced concrete", *Thomas Telford Ltd, Magazine of Concrete Research*, vol. 58, pp. 401-410, 2006.
- [12] ASTM International, "Standard Terminology for Composite Materials", ASTM D3878-20b, West Conshohocken, 2020. <https://doi.org/10.1520/D3878-20B>
- [13] A.D. Figueiredo, "Concreto com Fibras de Aço", *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil*, 2000.
- [14] F.J.T. Ribeiro, "Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras", Porto: Tese de Mestrado, Engenharia Civil, FEUP, p. 174, 2012.
- [15] I.S.C. Moreira, "Comportamento Mecânico do Betão Reforçado com Fibras" Porto: Tese de Mestrado, Engenharia Civil, ISEP, p. 17, 2018.
- [16] J.A.O. Barros, "Betão reforçado com fibras de aço - Conceitos fundamentais", *Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto*, 2000.
- [17] L. Hannant, "Fibre-reinforced cements and concretes", In: J. M. Illston. *Construction Materials*, 2ed, London, 1994.
- [18] P.S.L. Mateus, "Betão Reforçado por Nanotubos de Carbono", Guimarães: Tese de Mestrado, Universidade do Minho, p. 91, 2013.

- [19] D.R.S.M. Ferreira, "Pilares de Betão Armado Reforçados com Laminados de Fibras de Carbono" Guimarães : Tese de Mestrado, Universidade do Minho, p.226, 2000.
- [20] S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese, "Design and Control of Concrete Mixtures", Portland Cement Association, vol. 14, no. 7, pp. 121-128, 2002.
- [21] T. Tanaka, N. Hideaki, S. Akiyoshi, H. Noriyo, "Estimation of tensile strength distribution for carbon Fibre with diameter variation along Fibre", In: Materials Science Research International, vol. 5, no. 2, pp. 90-97, 1999.
- [22] M. Yakhlaf, M. Safiuddin, K.A. Soudki, "Properties of freshly mixed carbon fibre reinforced self-consolidating concrete", Construction and Building Materials, vol.46, pp. 224-231, 2013.
- [23] Z. Deng, "The fracture and fatigue performance in flexure of carbon fibre reinforced concrete", Cement and Concrete Composites, vol. 27, no. 1, pp. 131-140, 2005.
- [24] E.B. Jeon, S.K. Ahn, I.G. Lee, "Investigation of mechanical/dynamic properties of carbon fibre reinforced polymer concrete for low noise railway slab", Composite Structures, vol. 134, pp. 27-35, 2015.
- [25] J.C.A. Júnior, L.C.F.M. Silva, G. Weber, "Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades do concreto", Revista Matéria, vol. 22, no. 1, p. 9, 2017.
- [26] S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, M. Combe, T. Collister, N. Sivakugan, "Use of macro plastic Fibres in concrete: A review", Construction and Building Materials, vol. 93, p. 180-188, 2015.
- [27] G. Khoury, "Passive fire protection of concrete structures", Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings, vol. 161, pp. 135-145, 2008.
- [28] Y.S. Heo, J.G. Sanjayan, C.G. Han, M.C. Han, "Critical parameters of nylon and other Fibres for spalling protection of high strength concrete in fire", Materials and Structures, vol. 44, pp. 599– 610, 2011.
- [29] R. P. A. F. P. Lima, "Utilização de fibras metálicas com funções estruturais em estruturas de betão", Porto: Tese de Mestrado, Engenharia Civil, FEUP, pp. 12-18, 2012.
- [30] J.A.O. Barros, "Estado-da-arte dos betões reforçados com fibras", Revista Engenharia Civil, vol. 3, pp. 29-47, 1996.
- [31] R. Narayanan, A.S.K. Palangian, "Steel Fibre reinforced concrete beams in torsion", International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, vol. 5, no. 4, pp. 235-246, 1986.
- [32] D. Otter, A.E. Naaman, "Properties of steel Fibre reinforced concrete under cyclic loading", Journal of American Concrete Institute, vol. 85, no. 4, pp 254-261, 1988.
- [33] P. N. Balaguru, S.P. Shah, "Fibre-Reinforced Cement Composites", New York: McGraw-Hill, 1992. [Online]. Disponível: <http://worldcat.org/isbn/0070564000>. Acedido em: Maio, 15, 2023.
- [34] J. Homrich, A. Naaman, "Stress-strain properties of SIFCON in compression", Fibre Reinforced Concrete Properties and Applications, American Concrete Institute, vol. 105, pp. 283-304, 1987.
- [35] J. Bijen, "Improved mechanical properties of glass Fibre reinforced cement by polymer modification", Cement & Concrete Composites, vol. 12, pp. 95-101, 1990.
- [36] A. J. Majumdar, R.W. Nurse, "Glass fibre reinforced cement" Materials Science and Engineering, vol. 15, no. 2-3, pp. 107-127, 1974.

- [37] H.W. Reinhardt, H.A.W. Cornelissen, D.A. Hordijk, "Tensile tests and failure analysis of concrete", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 112, no. 11, pp. 2462-2477, 1986.
- [38] V.S. Gopalaratnam, S.P. Shah, "Tensile failure of steel Fibre-reinforced mortar", *Journal of Engineering Mechanical*, ASCE, vol. 113, no. 5, pp. 635-653, 1987.
- [39] J.Y. Wang, K.S. Chia, J.Y.R. Liew, M.H. Zhang, "Flexural performance of fibre-reinforced ultra lightweight cement composites with low fibre content", *Cement and Concrete Composites*, vol. 43, pp. 39-47, 2013.
- [40] P. Balaguru, H. Najm, "High-performance fibre-reinforced concrete mixture proportions with high fibre volume fractions", *American Concrete Institute, Materials Journal*, vol. 101, no. 4, pp. 281-286, 2004.
- [41] "Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fibre Reinforced Concrete", *American Concrete Institute 544, ACI Collection of Concrete Codes, Specifications and Practices*, 2017.
- [42] V. Ramakrishnan, W.V. Coyle, L.F. Dahl, E.K. Shrader, "A comparative evaluation of Fibre shotcrete", *Concrete International: Design and Construction*, vol. 3, no. 1, pp. 56-69, 1981.
- [43] P.S. Mangat, M.M. Azari, "Compression creep behavior of steel Fibre reinforced cement composite", *Materials and Structures, RILEM*, vol. 19, pp. 361-370, 1986.
- [44] J.C. Chern, C.H. Young, "Compressive creep and shrinkage of steel Fibre reinforced concrete", *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 11, no. 4, pp. 205-214, 1989.
- [45] J.A.O. Barros, "Behaviour of Glass Fibre Reinforced Concrete systems", *Technical Report, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Porto*, 1992.
- [46] Y. Wang, "Mechanics of Fibre reinforced cementitious composites", *Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, 1989.
- [47] J.A.O. Barros, J.S. Cruz, E. Ulrix, "Avaliação da capacidade de absorção de energia de betões reforçados com fibras de aço", *Revista Mecânica Experimental, Universidade do Minho*, 1999.
- [48] D. Burgun, B. Guillebon, "Béton projeté renforcé de Fibres de fonte. Application à la réhabilitation d'un collecteur d'assainissement à Nancy", *Extrait de Techniques Sciences Méthods*, vol. 82, no. 1, Janvier, 1987.
- [49] P.S. Mangat, B.T. Molloy, K. Gurusamy, "Marine durability of steel Fibre reinforced concrete of high water-cement ratio", *Fibre Reinforced Cements and Concretes-Recent Developments*, Elsevier, pp. 553-562, 1989.
- [50] P.S. Mangat, K. Gurusamy, "Permissible crack widths in steel Fibre reinforced marine concrete", *Materials and Structures, RILEM*, vol. 20, pp. 338-347, 1987.
- [51] P.N. Balaguru, V. Ramakrishnan, "Freeze-thaw durability of Fibre reinforced concrete" *American Concrete Institute Journal*, pp. 374-382, 1986.
- [52] A. Bentur, "Aging process of glass Fibre reinforced cements with different cementitious matrices", *RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, vol. 2, paper 7.3, 1986.

- [53] K. Fyles, K.L. Litherland, B.A. Proctor, "The effect of glass Fibre compositions on the strength retention of GFC", RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, vol. 2, paper 7.5, 1986.
- [54] Y. Ruishan, "Mechanical characteristics of AR glass Fibre reinforced low alkalinity sulphoaluminate cement composite", RILEM Symposium FRC 86, Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete, vol. 1, paper 4.2, 1986.
- [55] Z. Li, B. Mobasher, S.P. Shah, "Evaluation of interfacial properties in Fibre reinforced cementitious composites", Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics, RILEM, Published by E. & F.N. Spon, pp. 317-326, 1991.
- [56] Ensaios do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes, NP EN 12390-3, 2009.
- [57] Ensaios de Betão Endurecido - Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes, NP EN 12390-6, 2000.
- [58] Ensaios de Betão Endurecido - Parte 5: Resistência à flexão de provetes, NP EN 12390-5, 2009.

Anexos

Anexo A – Betão-S Estrutural Cinza



1. DESCRIÇÃO

O **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA** é um betão cinzento pré-doseado seco, formulado a partir de ligantes hidráulicos, cimento cinzento, agregados calcários e siliciosos de granulometria máxima de 10 mm e adjuvantes que contribuem para uma correta reologia do betão fresco, facilitando a sua aplicação e proporcionando um excelente desempenho ao nível da sua durabilidade.

O **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA** está classificado segundo a norma EN 206-1 e a especificação LNEC E 464, ver ponto 3.

2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

O **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA**, é especialmente indicado na execução para trabalhos de construções correntes, enchimentos de pavimento, paredes peças pré-fabricadas ou betonagens in situ de elementos estruturais, entre outros. É um betão seco, bastando adicionar-se água para a sua utilização.

O **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA** é sobretudo aconselhável em obra com betonagens pequenas, nas quais não se torna vantajosa a utilização de uma autobetoneira, em condições de difícil acesso ou de distâncias inoportáveis à central.

3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Produto em pó	Valor		Norma
	Slump S3 (140 ± 10) mm	Slump S4 (190 ± 10) mm	
Granulometria máxima	10 mm	10 mm	-
Produto em pasta	Valor		Norma
	Slump S3 (140 ± 10) mm	Slump S4 (190 ± 10) mm	
Água de amassadura	10 ± 0,5 %	11,0 ± 0,5 %	-
Razão A/L	≤ 0,60	≤ 0,65	-
Massa Volúmica	2300 ± 100 kg/m ³	2300 ± 100 kg/m ³	EN 12350-6
Produto endurecido	Valor		Norma
	Slump S3 (140 ± 10) mm	Slump S4 (190 ± 10) mm	
Resistência à compressão (28 dias)	C30/37	C25/30	EN 12390-3
Aplicável a classes de exposição ambiental	XC1, XC2, XC3 e XC4	XC1 e XC2	NP EN 206-1 LNEC E464
Cloretos solúveis em água / Classe de cloretos	0,1% / Cl0.1		EN 1015-17

SECIL MARTINGANÇA, SA.
Apartado 2 - 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal
Tel.: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial.seciltek@secil.pt



seciltek.com

4. APLICAÇÃO

a) Preparação de suportes

Antes da aplicação do **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA** deve garantir-se que o suporte, cofragem ou molde se encontram estanques, limpos.

b) Preparação da mistura

O **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA** deve ser amassado com recurso a um misturador tipo betoneira, adicionando a quantidade de água adequada à consistência pretendida.

Para se obter uma consistência fluida, tipo S3 (slump 140 ± 10 mm) adicionar de 2,3 a 2,6 litros de água limpa por cada saco de 25 kg.

Caso se pretenda obter uma consistência muito fluida, tipo S4 (slump 190 ± 10 mm) adicionar de 2,6 a 2,8 litros de água limpa por cada saco de 25 kg.

Amassar até obter uma mistura homogénea, pelo menos durante 3 minutos.

c) Aplicação

O **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA**, uma vez misturado deve ser aplicado de imediato, não devendo ser adicionada mais água após a amassadura, sob pena de prejudicar seriamente o seu desempenho.

A aplicação do **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA** é realizada segundo as técnicas correntes e obedecendo às boas práticas de colocação de betão.

A aplicação do **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA** deverá ter uma cadência contínua, devendo o período decorrido entre aplicação de camadas, de espessuras inferiores a 50 cm, ser controlado, em função da reologia do betão, de modo a evitar a formação de juntas de betonagem não previstas.

Deve-se evitar a queda do betão de grandes alturas (máx. aconselhável: 1,5 m). As descargas não poderão estar afastadas mais de 4 m, sendo o betão introduzido no molde ao nível da camada a aplicar, com auxílio de mangas de descarga ou tubo tremi, para evitar a segregação e um deficiente efeito de parede, por fixação de resíduos de betão seco junto às paredes do painel de cofragem.

A vibração deverá ser efetuada por camadas, com os vibradores continuamente posicionados no interior do betão, de modo a homogeneizar toda a massa por camadas sucessivas. O tempo de vibração deverá ser o suficiente para permitir a saída de bolhas de ar, devendo-se desligar os vibradores (mantendo-se embebidos no betão), assim que o aspecto superficial do betão se apresente vidrado, sem segregação e sem exsudação.

Os vibradores deverão penetrar alguns centímetros nas camadas imediatamente adjacentes de forma a garantir a correta homogeneização das mesmas.

Não se deve revibrar as camadas colocadas anteriormente, nem deixar os vibradores contactarem a parede dos painéis de cofragem e as armaduras, evitando assim, o revibrar das camadas inferiores do betão que já iniciou o processo de presa.

Para os demais requisitos associados à aplicação do betão, deverá ser consultada a NP EN 13670.

d) Desmoldagem

O tempo de descofragem deverá ser rigorosamente controlado, em função da maturidade do betão aplicado. Não deve existir nem descofragem antecipada, nem prolongada. No primeiro caso, para evitar problemas de fissuração por retração ou quebra de arestas e cantos. No segundo caso, para evitar manchas devido à alteração do fenol na presença de condensações.

As peças após descofragem deverão ser curadas com água ou recurso a membranas de cura durante pelo menos 7 dias e de acordo com os requisitos de cura da NP EN 13670.

e) Proteção superficial

O **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA** poderá ser protegido superficialmente com o **B-REPARA PROTEÇÃO AD 40**. Esta proteção deverá apenas ser aplicada após cura completa perfazendo as peças 28 dias desde a sua execução.

f) Restrições

O **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA** não deve ser aplicado com temperaturas ambientes e de suporte inferiores a 5 °C e superiores a 30°C. Não deve ser aplicado em superfícies geladas, e devem ser evitados exposição a ventos fortes e exposição do sol intenso.

g) Conselhos Complementares

- A água de amassadura deve ser isenta de quaisquer impurezas (argila, matérias orgânicas), devendo, de preferência, ser potável;
- As utilizações de dosagens de água superiores às recomendadas alteram as características do produto declaradas nesta ficha, podendo comprometer o desempenho final previsto;
- Não deve ser aplicada qualquer betão que tenha iniciado o seu processo de presa. Não adicionar água ao betão após a sua amassadura;
- Não adicionar quaisquer produtos à argamassa, devendo o **BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA**, ser aplicado tal qual é apresentado na sua embalagem de origem.

5. EMBALAGEM E VALIDADE**Embalagem**

SECIL MARTINGANÇA, SA.
Apartado 2 - 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal
Tel.: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial.seciltek@secil.pt



seciltek.com

FICHA TÉCNICA

BETÃO-S ESTRUTURAL CINZA

BETÃO CINZENTO ESTRUTURAL E ARQUITETÓNICO PRÉ-DOSEADO

SECIL TEK
DÁ FORMA ÀS IDEIAS

Sacos de papel de 25 kg em paletes plastificadas de 60 sacos.

Validade

12 meses desde que permaneçam inalteradas as condições da embalagem original e em condições de armazenagem ao abrigo de temperaturas extremas e da humidade.

6. PRODUTOS ASSOCIADOS

- **B-REPARA PROTEÇÃO AD 40** (Protetor de superfícies à base de silanos e siloxanos)

7. HIGIENE E SEGURANÇA

(NÃO DISPENSA A CONSULTA DA FICHA DE SEGURANÇA DO PRODUTO)

- Irritante para os olhos, vias respiratórias e pele;
- Pode causar sensibilização em contato com a pele;
- Não respirar as poeiras;
- Evitar o contato com a pele e os olhos;
- Em caso de contato com os olhos, lavar imediatamente e abundantemente com água e consultar um especialista;
- Usar vestuário de proteção e luvas adequadas;
- Conservar fora do alcance das crianças.

Estando as condições de aplicação dos nossos produtos fora do nosso alcance não nos responsabilizamos pela sua incorreta utilização. É dever do cliente verificar a idoneidade do produto para o fim previsto. Em qualquer caso a nossa responsabilidade está limitada ao valor da mercadoria por nós fornecida. A informação constante da presente ficha pode ser alterada sem aviso prévio. Em caso de dúvida, e se pretender esclarecimentos complementares solicitamos o contacto com os nossos serviços técnicos.

Revisão de outubro 2021
FT 06001.03

SECIL MARTINGANÇA, SA.

Apartado 2 - 2406 - 909 - Maceira - LRA - Portugal

Tel.: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial.seciltek@secil.pt



seciltek.com

Anexo B – SikaFibre T-48

A CONSTRUIR CONFIANÇA



FICHA DE DADOS DO PRODUTO

SikaFiber® T-48

MACROFIBRAS SINTÉTICAS PARA BETÃO

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Macrofibras sintéticas com carácter estrutural, para o reforço de betões.

UTILIZAÇÕES

SikaFiber® T-48 é adequado para a utilização em betão cofrado em obra e betão projetado. SikaFiber® T-48 pode ser utilizado nas seguintes aplicações:

- Aplicação de lajes térreas com betão
- Pavimentos industriais térreos
- Fundações com betão armado com fibras
- Produção de superfícies de betão com aumento da resistência à abrasão

Com a adição de SikaFiber® T-48, são melhoradas as seguintes características:

- Aumento da capacidade de resistência à fissuração
- Aumento da ductilidade estrutural (absorção de energia)
- Aumento da durabilidade
- Superfícies sem ferrugem

CARACTERÍSTICAS / VANTAGENS

- Geometria otimizada para melhor dispersão e desempenho
- Estrutura avançada da superfície para optimização da ligação ao cimento
- Bombável
- Menos desgaste no equipamento de mistura, transporte e manuseamento de betão do que com fibras de aço
- Boa resistência química (resistente a ácidos e alcalis)
- Menor ressalto de fibras em betão projetado
- Não tem requisitos mínimos de cobertura do betão
- As fibras salientes são removíveis através de fogo

CERTIFICADOS / NORMAS

Fibras para betão de acordo com a EN 14889-2 e fornecido com marcação CE.

DADOS DO PRODUTO

Base química	Polioléfinas
Fornecimento	SikaFiber® T-48 está disponível em sacos de película hidrossolúvel (pucks) ou fibras soltas. Fibras soltas: embalagens de 4 kg ou bigbags de 200 kg. Pucks: embalagens de 10 kg ou 375 kg.
Tempo de armazenamento	24 meses após a data de fabrico
Armazenagem e conservação	Armazenado nas embalagens originais não encetadas e não deterioradas em ambiente seco e a temperatura entre +5 °C e +30 °C. Proteger da luz solar direta, geada, água e contaminação.
Massa volúmica	0,91 kg/l

Ficha de Dados do Produto
SikaFiber® T-48
Julho 2019, Versão 01.01
021408021000000008

Dimensões	Comprimento: Aprox. 48 mm Diâmetro: Aprox. 0,9 mm
Ponto de fusão	Aprox. 170 °C
Guia de betonagem	SikaFiber® T-48 permite o fabrico de betão de qualidade, daí que devam ser cumpridas as regras de boa prática para o fabrico, a betonagem e a cura do betão.
Tempo de mistura de betão	A fim de garantir uma distribuição homogénea das fibras na mistura de betão, pode ser útil estender o tempo de mistura, especialmente em elevadas doses de fibras (> 6 kg/m³).
Dosagem recomendada	2 - 10 kg/m³
Distribuição	SikaFiber® T-48 é colocado diretamente na betoneira com os agregados. SikaFiber® T-48 também pode ser colocado na autobetoneira. Nesse caso, é necessário um tempo de mistura adicional de pelo menos 1 minuto por m³.

VALOR BASE

Todos os dados técnicos referidos nesta Ficha de Produto são baseados em ensaios laboratoriais. Resultados obtidos noutras condições podem divergir dos apresentados, devido a circunstâncias que não podemos controlar.

RESTRIÇÕES LOCAIS

Por favor, ter em atenção que o desempenho deste produto poderá variar ligeiramente de país para país, em função dos parâmetros regulamentares específicos de cada local. Por favor, consultar a Ficha de Produto para a descrição completa dos campos de aplicação.

ECOLOGIA, SAÚDE E SEGURANÇA

REGULAMENTO REACH - O REGULAMENTO (CE) N.º 1907/2006

De acordo com o artigo 3º do REACH este produto é um artigo. Este produto não contém substâncias que sejam intencionalmente libertadas em condições normais ou razoavelmente previsíveis de utilização. De acordo com o artigo 31º do mesmo regulamento, não é necessária ficha de dados de segurança para colocação no mercado, transporte ou utilização. Para uma utilização segura siga as instruções dadas através da ficha de produto. Como base no nosso conhecimento actual, o produto não contém nenhuma Substância de Elevada Preocupação (SVHC) listada no Anexo XIV do Regulamento REACH, nem nenhuma substância da Lista Candidata publicada pela European Chemicals Agency (ECHA) em concentrações superiores a 0.1% (m/m).

NOTA LEGAL

A informação, e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas de boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, e de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente e específica da nossa Ficha de Produto a que diz respeito, e que será entregue sempre que solicitada.

Sika Portugal, SA
Rua de Santarém, 113
4400-292 V. N. de Gaia
Tel.: +351 223 776 900
prt.sika.com




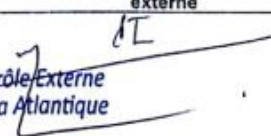
Ficha de Dados do Produto
SikaFiber® T-48
Julho 2019, Versão 01.01
021408021000000008

2 / 2

SikaFiberT-48-pt-PT-07-2019-1-1.pdf

A CONSTRUIR CONFIANÇA



LABORATOIRE PUBLIC D'ESSAIS ET D'ETUDES CTR LAÏYOUNE-DAKHLA Laboratoire de contrôle externe Travaux de construction du Nouveau Port de Dakhla Atlantique										
ESSAIS D'INFORMATION SUR MORTIER										
ESSAIS MECANQUES SUR MORTIER					DATE NR: M8 N° PV:					
Date prélevement: 02/12/2022					Type béton: Mortier					
Lieu prélevement:					CAB ELB 130 D1 N° 188					
COMPRESSION NM EN 12390-3					TRACTION PAR FENDAGE NM EN 12390-6					
COMPOSITION DU BETON					EPROUVETTES					
composition pondérale en (Kg/m ³)					Référence: M8 /1 à 09					
Classe			Théorique (KG)		Dimensions éprouvettes: 4X4X16 cm					
Granulat 1	GII				Mode confection: <input checked="" type="checkbox"/> Vibration <input type="checkbox"/> Piquage					
Granulat 2	GI				Mode conservation:					
Granulat 3	Sable concasse		776		- chantier					
Granulat 5	Sable de dune		712		- laboratoire		20°C et >95% Hg			
Ciment	CPJ 45		560		Air occlus:					
Eau Total			228		Affaissement au cône (mm):					
Adjuvant 1	T 25M		10,38		à la CAB		80,0			
Fibre			6,00		Au pied d'œuvre					
Mortier avec fibre SikaFiber T-45					Température (°C):					
					- ambiante		22			
					- du mortier frais		24,0			
Réf.	Date		Age	Compression		Traction par flexion				
	Febr.	Essai	(j)	Charge rupture (KN)	Compres. en MPa	Moyenne	Charge rupture (KN)	Traction en MPa	Moyenne	
22/200/M8										
22/200/M8/1	02/12/2022	05/12/2022	3	49,24	30,8	30,8	2,581	6,04	5,7	
22/200/M8/2				50,28	31,4					
22/200/M8/3				47,91	29,9					
22/200/M8/4			09/12/2022	7	48,36	30,2	36,8	2,413	5,65	6,7
22/200/M8/5		58,73			36,7					
22/200/M8/6		58,40			36,5					
22/200/M8/7			30/12/2022	28	59,73	37,3	46,9	2,71	6,34	8,2
22/200/M8/8		58,57			36,6					
22/200/M8/9		58,9			36,6					
				58,7	36,7		2,976	6,96		
				75,8	47,4		3,451	8,1		
				75,0	46,9		3,500	8,2		
				74,5	46,6		3,475	8,1		
				73,1	45,7					
				74,9	46,8					
				77,0	48,1					
Commentaires:										
Réception client			Coordinateur des essais			Responsable de laboratoire de contrôle externe				
										
			LPEE Laboratoire de Contrôle Externe Nouveau Port Dakhla Atlantique NPDA							