Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes em Betão de Elevada Resistência – Formulação do Betão de Elevada Resistência

Micael M. G. Inácio

Relatório 6

FLAT - Comportamento de Lajes Fungiformes Sujeitas a Ações Cíclicas e Sísmicas

(PTDC/ECM/114492/2009)

Janeiro de 2014

Índice de Matérias

1. Introdução 1

2. Estado da arte 1

2.1 Comportamento ao punçoamento de lajes em betão de elevada resistência 1

2.2 Desenvolvimento do betão de elevada resistência 3

3. Composição do betão de elevada resistência 4

3.1 Materiais constituintes 4

3.1.1 Cimento 5

3.1.2 Adições 5

3.1.3 Adjuvante 6

3.1.4 Agregados 6

3.2 Propostas de composição 9

3.2.1 Composição 1 9

3.2.2 Composição 2 10

3.3 Amassadura experimental 11

4. Conclusões e desenvolvimentos futuros 15

5. Agradecimentos 15

6. Referências bibliográficas 16

Índice de Figuras

Figura 1 – Curvas granulométricas dos agregados de basalto de Rio Maior. 7

Figura 2 - Curvas granulométricas dos agregados de seixo de Foros de Benfica. 7

Figura 3 - Curvas granulométricas dos agregados de granodiorito de Montemor-o-Novo..... 8

Figura 4 - Curvas granulométricas dos agregados de Basalto de Vialonga. 8

Figura 5 - Curvas granulométricas das areias selecionadas. 8

Figura 6 – Curva granulométrica da mistura da composição 1..... 10

Figura 7 – Curva granulométrica da mistura da composição 2..... 11

Figura 8 – Betoneira de eixo vertical utilizada (esq.) e betoneira já com os agregados (dir.). 12

Figura 9 – Mistura dos agregados (esq.) e introdução do cimento e da sílica de fumo (dir.). 12

Figura 10 – Mistura do cimento e da sílica de fumo com os agregados (esq.) e adição da água (dir.). 12

Figura 11 – Após adição da água (esq.) e adição do superplastificante (dir.)..... 13

Figura 12 – Após adição do superplastificante (esq.) e no final da amassadura (dir.)..... 13

Figura 13 – Descarga do betão para o carro de mão (esq.) e ensaio de abaixamento do betão (dir.). .. 13

Figura 14 – Enchimento dos moldes com betão. 14

Índice de Quadros

Quadro 1 – Caracterização dos agregados grossos utilizados. 6
Quadro 2 – Constituintes da pasta ligante da composição 1 9
Quadro 3 – Agregados da composição 1 9
Quadro 4 – Constituintes da pasta ligante da composição 2 10
Quadro 5 – Agregados da composição 2 10
Quadro 6 – Resultados dos provetes da amassadura da composição 1. 14
Quadro 7 – Resultados dos provetes da amassadura da composição 2. 14

1. Introdução

O presente relatório descreve as tarefas desenvolvidas com vista a estudar a resistência ao punçoamento de lajes fungiformes em betão de elevada resistência durante os primeiros 6 meses do projeto.

Numa fase inicial foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre eventuais trabalhos realizados por outros autores, sendo os resultados apresentados de forma resumida na secção 2 do presente documento.

Posteriormente procedeu-se ao estudo da composição do betão de elevada resistência a ser usado futuramente no fabrico dos modelos de laje fungiforme a ensaiar ao punçoamento. Os vários fatores a ter em conta na formulação de um betão de características resistentes melhoradas são apresentados e discutidos na secção 3. Por fim são apresentados os resultados obtidos nas amassaduras experimentais realizadas.

2. Estado da arte

2.1 Comportamento ao punçoamento de lajes em betão de elevada resistência

Nesta secção são apresentados resumidamente as características dos estudos do comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes em betão de elevada resistência.

Marzouk e Hussein (1991) [12] ensaiaram 17 modelos de laje fungiforme dos quais 2 foram fabricados com betão convencional e os restantes com betão de elevada resistência. As lajes ensaiadas eram quadradas com 1700mm de lado, com espessuras de 150, 220 ou 300mm e com percentagem de armadura longitudinal a variar entre 0,49 e 2,33. Os modelos foram levados à rotura por aplicação de uma carga vertical monotónica num pilar quadrado com 150mm de lado.

Tomaszewicz (1993) [16] estudou o comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes em betão de elevada resistência através do ensaio de 19 modelos de laje fungiforme. As dimensões em planta, a espessura, a percentagem de armadura e a área carregada foram características que variaram entre os vários modelos. O carregamento foi realizado no centro dos modelos aplicado de forma monotónica.

Ramdane (1996) [15] ensaiou 6 lajes circulares com 125mm de espessura e 1700 m de diâmetro fabricadas com betão de elevada resistência. As lajes tinham diferentes percentagens de armadura longitudinal e foram levadas à rotura com a aplicação de uma carga vertical no centro. O pilar simulado era circular com 150mm de diâmetro.

Hallgrenn (1996) [7] estudou o comportamento ao punçoamento de 11 lajes circulares com 2540mm de diâmetro, 240mm de espessura e um pilar centrado com 250mm de diâmetro. Todos os modelos

foram totalmente fabricados com betão de elevada resistência com a exceção de 1 em que se usou betão de elevada resistência na zona junto ao pilar e betão convencional na restante. O autor fez variar a percentagem de armadura longitudinal e em 3 modelos foi colocada armadura específica de punçoamento. Os modelos foram levados à rotura pela aplicação de uma carga centrada monotónica.

Para estudar o comportamento ao punçoamento, Vargas (1997) [17] fabricou 12 modelos de laje fungiforme à escala 1/3. As lajes eram quadradas com 800mm de lado, 60mm espessura e tinham um pilar também quadrado de 100mm de lado atravessando a laje. Nos modelos foram usados betões convencionais e de elevada resistência, diferentes percentagens de armadura longitudinal e de fibras. Além disso, houve ainda alguns modelos com armadura específica de punçoamento.

Ghannoum (1998) [4] produziu uma campanha experimental de 6 modelos de laje fungiforme, tendo usado betões com resistências médias à compressão de 37, 57 e 67MPa. Além da resistência do betão fez variar a quantidade de armadura longitudinal. Os modelos eram quadrados com 2300mm de lado, com 150mm de espessura e foram carregados verticalmente através de um pilar centrado com secção de 225mm^2.

Marzouk et al (1998) [13] ensaiaram 6 modelos da ligação pilar-laje para estudar o seu comportamento ao punçoamento quando sujeitos a ações gravíticas e horizontais monotónicas. As lajes eram quadradas com 1900mm de lado, 150mm de espessura e foram construídas com betões com resistência à compressão em cilindros a variar entre 35 e 75MPa. Nos vários modelos, para além da resistência do betão fez-se variar a percentagem da armadura de flexão e a relação entre a relação entre momentos flectores e esforço de corte atuante.

Azevedo e Hanai (2003) [1] ensaiaram 12 modelos de laje fungiforme para estudar o seu comportamento ao punçoamento. Os modelos eram quadrados com 1160mm de lado, 100mm de espessura e foram submetidos a um carregamento aplicado no centro através de uma placa de aço quadrada com 80mm. Em metade dos modelos usou-se betão convencional e nos restantes betão de elevada resistência. As restantes características estudadas foram a percentagem de fibras de aço e a existência de armadura específica de punçoamento.

Ozden et al (2006) [14] usaram betão de elevada resistência para fabricar 14 modelos de laje fungiforme, com 1500mm de diâmetro, 120mm de espessura e um pilar centrado quadrado com 200mm de lado. A quantidade de fibras usada no betão foi de 0 e 1% e a percentagem de armadura longitudinal variou entre 0,73 e 2,25. A aplicação da carga foi feita de forma monotónica, em alguns modelos sem excentricidade e noutros com excentricidade de 100 e 200mm.

Num estudo realizado por Yasin e Smadi (2007) [18] foram ensaiados ao punçoamento 10 modelos de laje fungiforme com geometria quadrada com 1500mm de lado, 150mm de espessura e um pilar

quadrado centrado com 250mm de lado. Em 5 dos modelos foi usado betão de elevada resistência enquanto que nos restantes foi usado betão convencional. Os factores que variaram nos vários modelos foram o volume e tipo de fibras de aço usadas e ainda a relação entre momentos flectores e esforço de corte atuante.

Joh et al (2008) [10] levaram a cabo uma série de 6 ensaios de modelos de lajes fungiformes em Ultra High Performance Concrete (UHPC). Os modelos tinham dimensões em planta de 1200x1200mm2 e espessura de 40 ou 70mm. O carregamento vertical foi efectuado de forma centrada e monotónica, variando as dimensões da área carregada.

Harris et al (2008) [8, 9] ensaiaram 12 lajes fabricadas em UHPC com fibras de aço. As lajes eram quadradas e tinham 1140mm de lado e diferentes espessuras. No ensaio foi aplicada até à rotura a uma força vertical centrada monotónica.

2.2 Desenvolvimento do betão de elevada resistência

A data da aplicação de um material que se pode assumir como sendo um betão, não assume unanimidade entre as referências bibliográficas consultadas. De acordo com Malinowsky, citado por González-Isabel [5], a primeira aplicação de betão foi à 9000 anos em Israel. Sousa Coutinho [2] refere a primeira utilização de betão na Sérvia, na data de 5600 a.C. num pavimento de piso térreo, utilizando como ligante uma cal parda. Em 1819, Louis Vicat utilizou o ligante artificial que tinha inventado alguns anos atrás, na construção da ponte de Souillac sobre o rio Dordogne. No entanto, o grande impulso para a expansão deste novo material só é dado em 1848 quando Joseph-Louis Lambot inventa o betão armado quando introduz armaduras no betão. O arquiteto Auguste Perret em 1898, começa a tirar partido das propriedades deste novo material nos seus projetos [2].

O desenvolvimento do betão armado permitiu mudar as edificações, apresentando as vantagens de se moldar facilmente a qualquer forma para a estrutura, ter um custo relativamente baixo e não ter necessidade de manutenção. Apesar destas vantagens, a sua capacidade resistente era bastante inferior a outros materiais, verificando-se um grande esforço na investigação com o objectivo de conseguir aumentar a resistência do betão. Ao longo dos anos foram propostas expressões e teorias que permitiram fabricar betões com maior capacidade resistente.

Na década de 1970, o aparecimento de superplastificantes permitiu o obter betões com resistências mais elevadas através da diminuição da quantidade de água, baixando-se a relação água/cimento, mantendo boa trabalhabilidade. Desde então, a disponibilização por parte da indústria química de superplastificantes de 3ª geração e de adições de elevado efeito pozolânico levaram ao desenvolvimento de betões de elevado desempenho, caracterizando-se nomeadamente pela sua elevada resistência mecânica. A aplicação de betões com propriedades mecânicas e reológicas

melhoradas permite a execução de estruturas com secções menores e mais esbeltas, contribuindo para a redução das cargas permanentes da estrutura e da quantidade de matérias-primas necessárias, o que se traduz num menor impacto ambiental e económico. Este material propicia ainda o aumento da produtividade conseguida pela obtenção de resistências elevadas em idades jovens e a maior resistência aos agentes agressivos aumentando a durabilidade e diminuindo a manutenção das estruturas.

3. Composição do betão de elevada resistência

Os betões de elevada resistência têm particularidades que os distinguem claramente dos betões convencionais normalmente utilizados nas edificações. Nesse sentido, a formulação e produção de betões de elevada resistência exige cuidados especiais. Segundo Fernandes [3], aspetos correntes no fabrico de betões convencionais, como a utilização de agregados por lavar, o seu armazenamento ao ar livre e expostos às condições atmosféricas ambientais, a fabricação de betões com equipamento de medição em volume dos constituintes, a incorporação de adições para reduzir a quantidade de cimento e outros, devem ser procedimentos proibidos quando se deseja obter um produto de qualidade superior, tanto no que concerne às suas propriedades mecânicas quanto a outras como a consistência e durabilidade.

Existem alguns estudos e referências bibliográficas sobre a formulação de betões de elevada resistência, no entanto não existe um método direto para formular um betão de elevada resistência. Nos estudos realizados são apresentadas regras de boa prática que devem ser consideradas no estudo destes betões, tais como a escolha criteriosa dos constituintes, a necessidade do estudo cuidadoso do arranjo granulométrico das partículas, a redução da água de amassadura ao mínimo possível, as características exigidas aos ligantes e a necessidade de adoção de superplastificantes adequados e em dosagens ótimas.

3.1 Materiais constituintes

A importância da seleção dos materiais depende da resistência que se pretende. Para betões com resistências até um limite de cerca de 80 MPa podem empregar-se os agregados usados correntemente nos betões convencionais, sendo contudo necessário uma seleção mais criteriosa na sua qualidade. Neste caso a utilização de relações água/ligante inferiores a 0.40 e a incorporação de uma adjuvante redutor de água são exigências para obter um betão com a resistência pretendida e com a consistência exigida às suas condições de aplicação [3].

Quando se pretendem betões com resistências superiores a 80 MPa torna-se necessário a adopção de agregados com características mecânicas mais elevadas que as dos agregados correntes, a utilização de adições com propriedades pozolânicas e a utilização de adjuvantes mais evoluídos, que são

normalmente designados de superplastificantes de 3ª geração, o que permite obter uma mistura com uma relação água/ligante da ordem dos 0.30 [3].

3.1.1 Cimento

Segundo Fernandes [3], os cimentos com a classificação CEM I 42.5R e CEM I 52.5R são os mais adequados, pois contêm maior percentagem de clínquer (≥95%), o que permite o uso de adições de qualidade conhecida e na quantidade desejada.

Gutiérrez e Cánovas [6] indicam que o cimento tipo CEM I 52.5R tem maior módulo de finura, o que permite um incremente de resistência na ordem de 10 a 15 % quando comparado com a utilização de um cimento tipo CEM I 42.5R. No entanto, a utilização de cimento tipo CEM I 52.5R exige maiores dosagens de adjuvante para obter consistência idêntica do betão.

No caso do presente estudo o cimento utilizado é o cimento do tipo CEM I 52.5R fabricado no Centro de Produção de Alhandra da CIMPOR – Cimentos de Portugal, S.A.

3.1.2 Adições

A utilização e seleção de adições é um facto importante quando se pretendem obter betões com resistências mais elevadas e/ou resistências elevadas associadas a boa trabalhabilidade.

Segundo Fernandes [3], a sílica de fumo ou microsílica é a mais utilizada e resulta do processo de fabrico de silício de ferro e silício metálico em fornos de arco elétrico a temperaturas elevadas. A sílica de fumo apresenta características pozolânicas, combinando-se com a cal livre do cimento e formando silicato de cálcio hidratado adicional. As suas partículas muito finas e esféricas que se dispersam entre as partículas do cimento, permitem aumentar a homogeneidade dos produtos de hidratação do cimento e contribuem para a obtenção de resistências superiores.

A dosagem de sílica de fumo deve ser definida em função das propriedades que se pretender melhorar e da trabalhabilidade. Contudo os fabricantes destes produtos comerciais disponíveis no mercado recomendam dosagens compreendidas entre 5% e 15% sobre o peso do cimento.

A adição utilizada neste estudo foi um produto com a designação comercial “Sikacrete HD”, à base de sílica de fumo em estado muito puro, comercializado pela Sika Portugal – Produtos Construção e Industria, S.A..

3.1.3 Adjuvante

A obrigatoriedade da utilização de adjuvantes é um conceito facilmente aceite pela comunidade científica. No entanto, a determinação da dosagem ótima e a seleção do adjuvante não é expedita e deve ser determinado em função da relação água/ligante que se pretende usar.

Em 2005, Fernandes [3] realizou um estudo para avaliar a compatibilidade entre os ligantes e superplastificantes de terceira geração, estabelecendo o adjuvante e a dosagem mais adequada à formulação de determinado betão de elevada resistência.

Com base no referido estudo, selecionou-se um superplastificante de terceira geração que é uma solução aquosa de polímeros acrílicos modificados, cuja denominação comercial é "Sika ViscoCrete 20 HE" comercializado pela Sika Portugal – Produtos Construção e Industria, S.A..

3.1.4 Agregados

Os agregados representam entre 60 a 80% do volume total dos betões e por isso as suas características exercem grande influência no seu desempenho. No caso dos betões de elevada resistência as características mais importantes são a configuração geométrica e estado da superfície, a granulometria, as propriedades mecânicas e a estabilidade química.

Para este trabalho foram recolhidas e caracterizadas amostras de agregados grossos britados de diferentes rochas originárias, que se apresentam no Quadro 1. No Quadro 2 são apresentadas as características dos agregados finos utilizados. Nas Figuras 1 a 5 são apresentadas as curvas granulométricas dos vários agregados usados neste estudo.

Quadro 1 – Caracterização dos agregados grossos utilizados.

Designação	Rocha originária	Local	$D_{máx}$ (mm)	Massa Vol. (kg/m^3)
BAS.1,0.L.RM	Basalto	Rio Maior	11.2	2941.1
BAS.1,5.L.RM	Basalto	Rio Maior	14.2	3016.5
SEI.1,0.L.FB	Seixo	Foros de Benfica	10.9	2688.0
SEI.1,5.L.FB	Seixo	Foros de Benfica	13.9	2728.0
GRA.0,5.L.MN	Granodiorito	Montemor-o-Novo	5.2	2824.9
GRA.1,0.L.MN	Granodiorito	Montemor-o-Novo	13.3	2786.6
BAS.2-6.L.V	Basalto	Vialonga	5.1	2986.3
BAS.4-12.L.V	Basalto	Vialonga	12.9	3024.5

Quadro 2 – Caracterização dos agregados finos utilizados.

Designação	Local	Massa Vol. (kg/m^3)
ARE.F.L.VM	Vale de Milhaços	2638.0
ARE.G.L.VM	Vale de Milhaços	2617.5

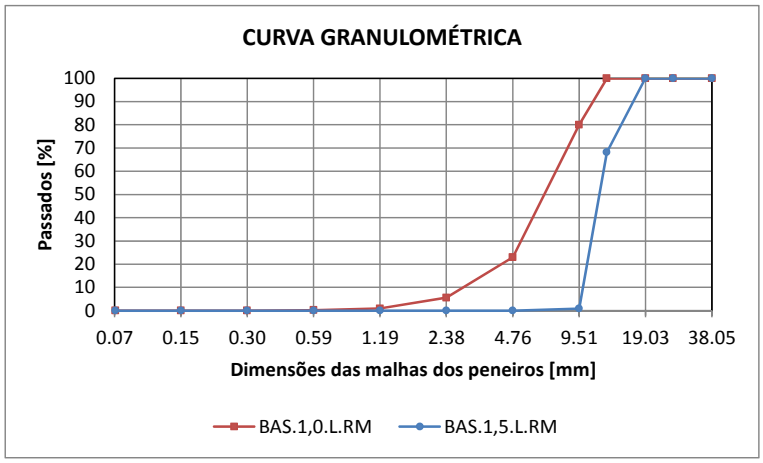

Figura 1 – Curvas granulométricas dos agregados de basalto de Rio Maior.

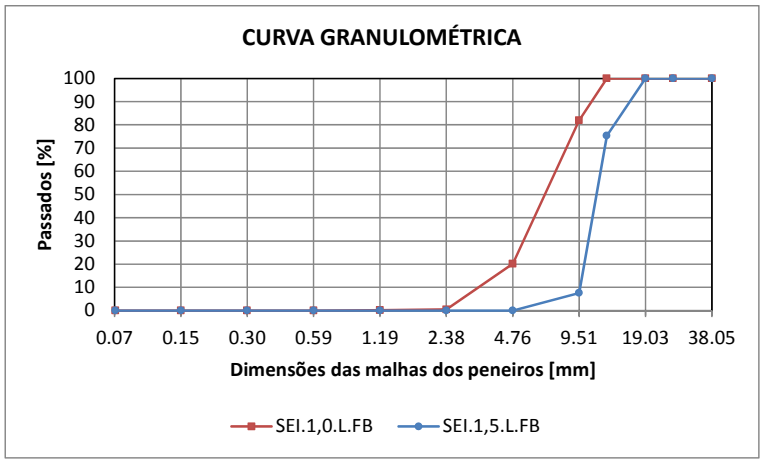

Figura 2 - Curvas granulométricas dos agregados de seixo de Foros de Benfica.

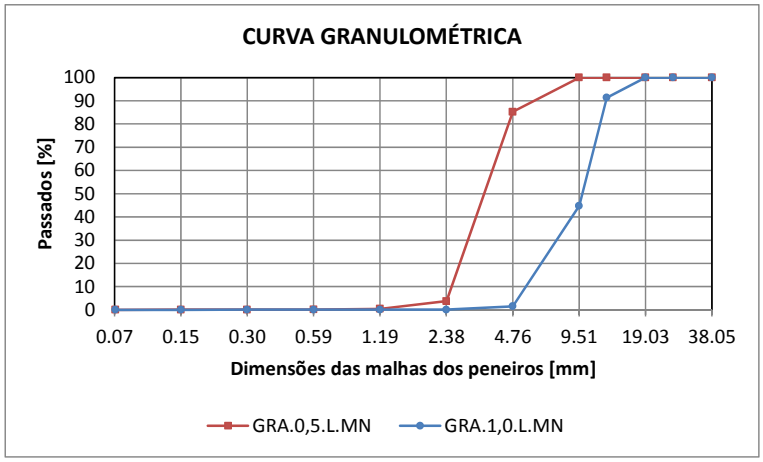

Figura 3 - Curvas granulométricas dos agregados de granodiorito de Montemor-o-Novo.

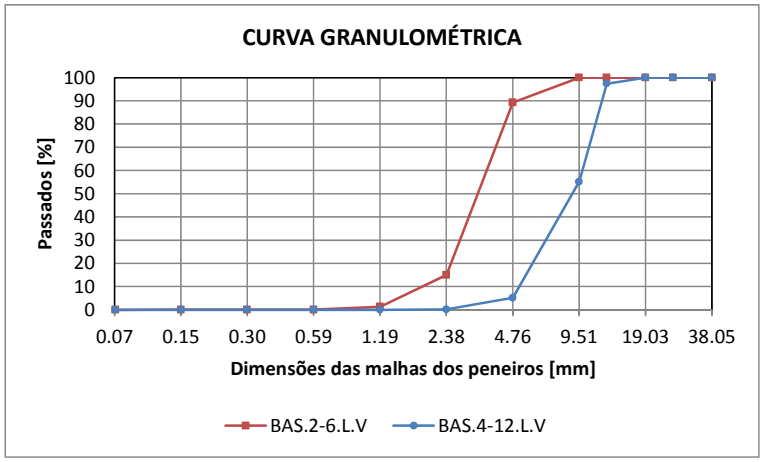

Figura 4 - Curvas granulométricas dos agregados de Basalto de Vialonga.

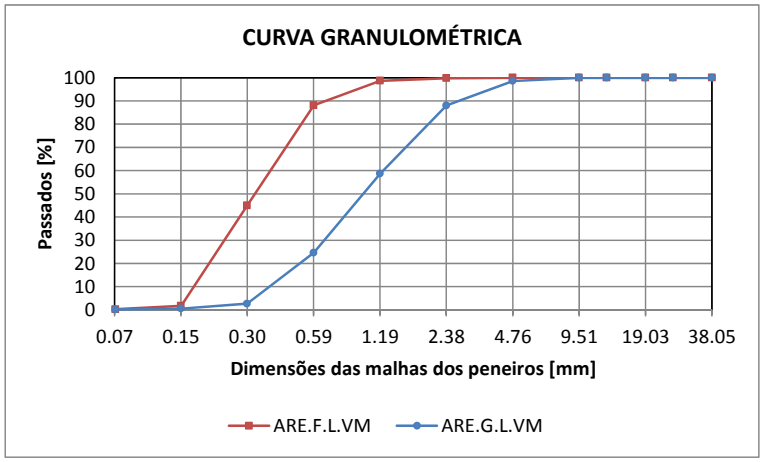

Figura 5 - Curvas granulométricas das areias selecionadas.

3.2 Propostas de composição

Com os agregados selecionados e utilizando o método de Faury estudaram-se duas composições para o betão de elevada resistência pretendido. As alterações que foram introduzidas foi a utilização de agregados de basalto de diferentes origens. De seguida são apresentadas as composições estudadas que foram testadas experimentalmente.

3.2.1 Composição 1

Quadro 2 – Constituintes da pasta ligante da composição 1

Constituintes da pasta	**Cimento**	**Adição**	**Adjuvante**	**Água**
Designação	CEM I 52.5R Alhandra	Sikacrete HD	Sika ViscoCrete 20 HE	
Massa Volúmica	3130 kg/m^3	2200 kg/m^3	1.08 kg/l	1 kg/l
Massa	500 kg	50 kg	11.02 kg	146 kg
Volume	0.160 m^3	0.023 m^3	10.20 l	146 l

Quadro 3 – Agregados da composição 1

Agregados	**Origem**	**Massa Volúmica [kg/m^3]**	**Proporção**	**Massa [kg]**
BAS.1,5.L.RM	Rio Maior	3016.5	0.167	322
BAS.1,0.L.RM	Rio Maior	2941.1	0.462	873
ARE.G.VM	Vale de Milhaços	2617.5	0.319	536
ARE.F.VM	Vale de Milhaços	2638.0	0.052	88

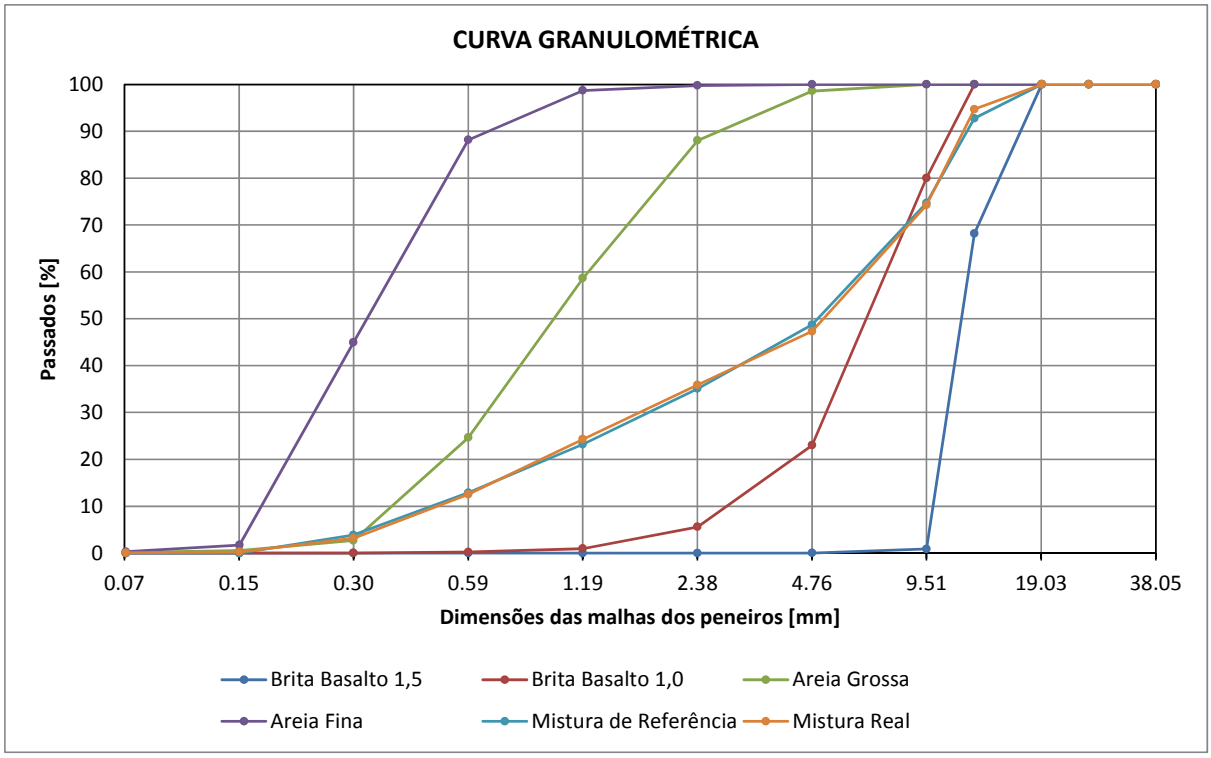

Figura 6 – Curva granulométrica da mistura da composição 1.

3.2.2 Composição 2

Quadro 4 – Constituintes da pasta ligante da composição 2

Constituintes da pasta	Cimento	Adição	Adjuvante	Água
Designação	CEM I 52.5R Alhandra	Sikacrete HD	Sika ViscoCrete 20 HE	
Massa Volúmica	3130 kg/m^3	2200 kg/m^3	1.08 kg/l	1 kg/l
Massa	500 kg	50 kg	11.02 kg	146 kg
Volume	0.160 m^3	0.023 m^3	10.20 l	146 l

Quadro 5 – Agregados da composição 2

Agregados	Origem	Massa Volúmica [kg/m^3]	Proporção	Massa [kg]
BAS.4-12.L.V	Vialonga	3024.5	0.486	937
BAS.2-6.L.V	Vialonga	2986.3	0.144	274
ARE.G.VM	Vale de Milhaços	2617.5	0.299	500
ARE.F.VM	Vale de Milhaços	2638.0	0.071	119

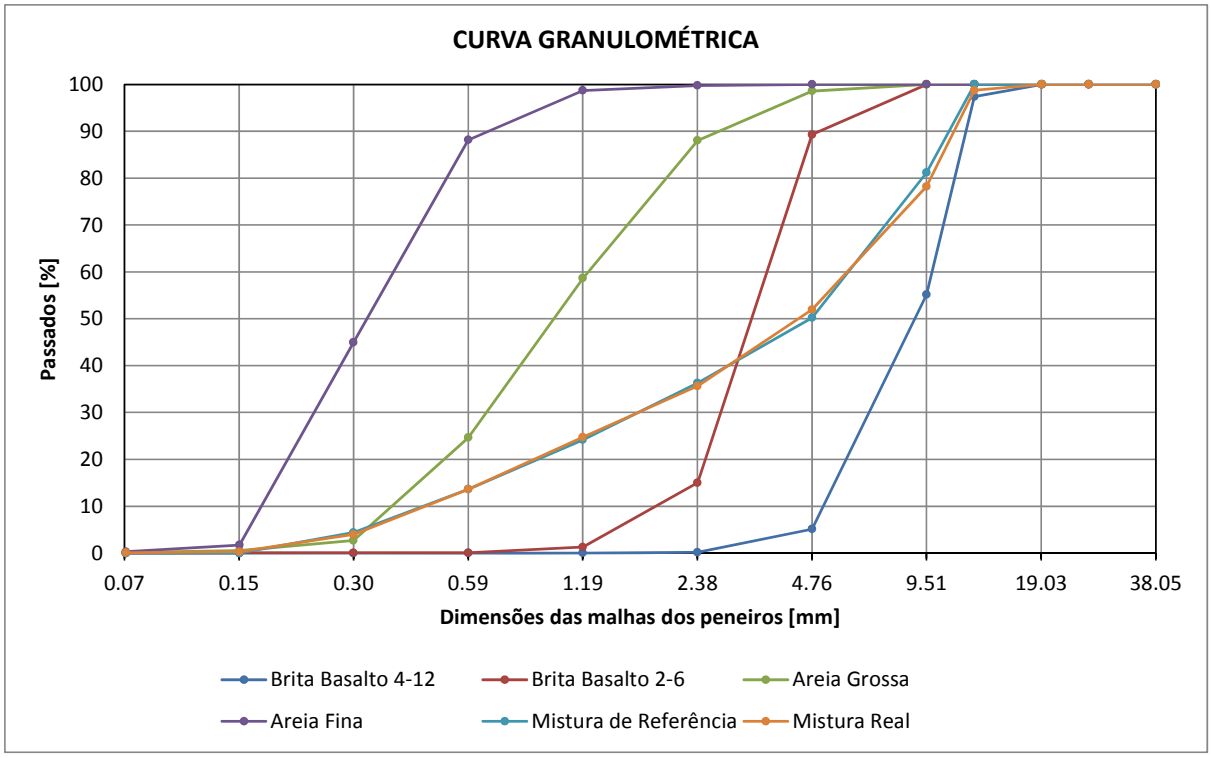

Figura 7 – Curva granulométrica da mistura da composição 2.

3.3 Amassadura experimental

Com as composições estudadas foram realizadas amassaduras experimentais das quais se fizeram provetes para determinação da resistência à compressão do betão. Da amassadura da composição 1 foram elaborados provetes cúbicos com 150 mm de lado e da amassadura da composição 2 foram elaborados provetes cúbicos de 100 mm^3 e 150 mm^3 e provetes cilíndricos de 150x300 mm^3.

Na amassadura da composição 1 foi realizada manualmente através de um misturador elétrico. Na amassadura da composição 2 usou-se uma betoneira de eixo vertical com capacidade máxima de 250 litros. O procedimento durante a amassadura foi o seguinte:

1. Introdução dos agregados grossos e finos;
2. Mistura dos agregados grossos e finos;
3. Introdução do cimento e da sílica de fumo;
4. Mistura dos componentes já introduzidos;
5. Introdução da água;
6. Mistura durante 1 minuto;
7. Introdução do superplastificante de 3ª geração;
8. Mistura até a apresentar a pasta se apresentar homogénea.

Figura 8 – Betoneira de eixo vertical utilizada (esq.) e betoneira já com os agregados (dir.).

Figura 9 – Mistura dos agregados (esq.) e introdução do cimento e da sílica de fumo (dir.).

Figura 10 – Mistura do cimento e da sílica de fumo com os agregados (esq.) e adição da água (dir.).

Figura 11 – Após adição da água (esq.) e adição do superplastificante (dir.).

Figura 12 – Após adição do superplastificante (esq.) e no final da amassadura (dir.).

Figura 13 – Descarga do betão para o carro de mão (esq.) e ensaio de abaixamento do betão (dir.).

Figura 14 – Enchimento dos moldes com betão.

Os resultados obtidos no ensaio à compressão aos 7 dias de idade são apresentados nos Quadros 6 e 7.

Quadro 6 – Resultados dos provetes da amassadura da composição 1.

	Amassadura 2		
Provetes	P1	P2	P3
Molde	Cubo 150x150x150		
Massa provete (g)	8974	8841	8870
Força rotura (kN)	2278.6	2490.4	2468.7
Tensão rotura (MPa)	101.3	110.7	109.7
Tensão média (MPa)	107.2		
Desvio padrão (MPa)	3.97		

Quadro 7 – Resultados dos provetes da amassadura da composição 2.

	Amassadura da composição 2								
Provetes	P7	P8	P12	P1-2	P3-1	P4-2	C4	C5	C6
Molde	Cubo 150x150x150			Cubo 100x100x100			Cilindro 150x300		
Massa provete (g)	9083	8940	8950	2644	2620	2626	13859	13721	13658
Força rotura (kN)	2244.3	2097.2	2193.7	976.0	973.8	1009.2	1204.6	1358.1	1368.2
Tensão rotura (MPa)	99.7	93.2	97.5	97.6	97.4	100.9	68.2	76.9	77.4
Tensão média (MPa)	96.8			98.6			74.1		
Desvio padrão (MPa)	2.41			1.52			3.99		

4. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Os ensaios existentes são maioritariamente de modelos sujeitos a carregamentos verticais monotónicos. O comportamento deste tipo de estruturas quando sujeitas a ações cíclicas e sísmicas, não têm sido suficientemente abordado pela comunidade tecno científica, levando à dificuldade da sua aplicação em zonas em que exista risco sísmico.

Os resultados obtidos nos ensaios à compressão dos provetes das amassaduras experimentais realizadas, revelaram que a composição estudada apresenta valores de resistência à compressão da ordem dos que se pretendem para o fabrico das lajes que serão posteriormente ensaiadas ao punçoamento. No entanto, para concluir este estudo, deverão ser ainda realizados os seguintes estudos:

1. Resistência à compressão do betão com agregados de granodiorito;
2. Resistência à compressão do betão com agregados de seixo;
3. Estudo da consistência e resistência à compressão para relações de A/L inferiores;
4. Estudo da consistência e resistência à compressão para menor percentagem de adjuvante;
5. Estudo da compatibilidade química entre os agregados e a pasta ligante.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi elaborado no âmbito do projeto FLAT - Comportamento de Lajes Fungiformes Sujeitas a Ações Cíclicas e Sísmicas (PTDC/ECM/114492/2009), com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia - Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior.

Este projeto sobre o comportamento de lajes fungiformes sob a ação de cargas gravíticas e sísmicas deu já origem a várias publicações [19-42], servindo estas de meio de divulgação da investigação realizada.

Este trabalho recebeu o apoio da CIMPOR-Alhandra com o fornecimento de cimento CEM I 52.5R e da SIKA com o fornecimento de Viscocrete 20HE e Sikacrete HD.

6. Referências bibliográficas

[1] Azevedo, A. P.; Hanai, J.B.: "Resistência e Ductilidade das Ligações Laje-Pilar em Lajes-Cogumelo de Concreto de Alta Resistência Armado com Fibras de Aço e Armadura Transversal de Pinos", Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 21, 2003, pp. 131-166.

[2] Coutinho, A. S.: *"Fabrico e Propriedades do Betão"*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 3ª edição Vol. 1 e 2, Lisboa, 1997.

[3] Fernandes, P. A. L.: *"Vigas de Grande Vão Préfabricadas em Betão de Alta Resistência Pré-Esforçado"*, Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 2005, 255 pp.

[4] Ghannoum, C. M.: "Effect of High-Strength Concrete on the Performance of Slab-Column Specimens." Doctoral Thesis, McGill University, Montréal, 1998, 103 pp.

[5] González-Isabel, G.: *"Hormigón de Alta Resistencia"*, INTEMAC – Instituto Tecnico de Materiales y Construcciones, Madrid, 2001.

[6] Gutiérrez, P. A.; Cánovas, M. F.: *"High Performance Concrete: Requirements for constituint materials and mix porportioning."* ACI Materials Journal, American Concrete Institute, 1996.

[7] Hallgren, M.: "Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs", Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1996, 206 pp.

[8] Harris, D. K.: *"Characterization of Punching Shear Capacity of Thin Ultra-High Performance Concrete Slabs"*, Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Vol. 10, No. 10, March 2008.

[9] Harris, D. K.; Roberts-Wollmann, C. L.: *"Characterization of Punching Shear Capacity of Thin UHPC Plates"*, M. Eng. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, December 2004.

[10] Joh, C.; Hwang, H.; Choi, E.; Park, J.; Kim, B.: *"Punching Shear Strength Estimation of UHPC Slabs"*, Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Vol. 10, No. 10, March 2008.

[11] Lee, H. K. et al: "Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete", Cement and Concrete Research, Pergamon, Elsevier Science, Ltd, 2004.

[12] Marzouk, H. and Hussein, A.: *"Experimental Investigation on the Behaviour of High-Strength Concrete Slabs."* ACI Structural Journal, Nov.-Dec., V. 88, No. 6, 1991, pp. 701-713.

[13] Marzouk, H.; Emam, M.; Hilial, M. S.: *"Effect of High-Strength Concrete Slab on the Behavior of Slab-Column Connections"*, ACI Structural Journal, May.-Jun., V. 95, No. 3, 1998, pp. 227-236.

[14] Ozden, S.; Ersoy, U.; Ozturan, T.: *"Punching Shear Tests of Normal and High-Strength Concrete Flat Plates"*, Canadian Journal of Civil Engineering, Volume 33, Number 11, 2006, pp. 1389-1400.

[15] Ramdane, K.E.: *"Punching Shear of High Performance Concrete Slabs."* 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance Concrete. Paris, 1996, pp. 1015-1026.

[16] Tomaszewicz, A.: High-strength Concrete SP2 - Plates and Shells. Report 2.3, *"Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs."* Report No. STF70A93082, SINTEF, Trondheim, 1993, 36 pp.

[17] Vargas, E. N. Z.: "Punção em Lajes-Cogumelo de Concreto de Alta Resistência Reforçado com Fibras de Aço", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 1997, 244 pp.

[18] Yasin, I. S. B.; Smadi, M. M.: *"Behavior of high-strength fibrous concrete slab-column connections under gravity and lateral loads"*, Construction and Building Materials 22, 2008, pp. 1863–1873.

[19] Mamede, N.; Ramos, A., Faria, D. – *Experimental and parametric 3D nonlinear finite elemento analysis on punching of flat slabs with orthogonal reinforcement*. Engineering and Structures, Volume 48, Março 2013, p. 442-457.

[20] Ramos, A. M. P. e Lúcio, V. - *Post-Punching Behaviour of Prestressed Concrete Flat Slabs*. Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, 60, no. 4, Maio, 2008.

[21] Ramos, A. P., Lúcio, V. e Regan, P.E. - *Punching of flat slabs with in-plane forces*, Engineering Structures, Volume 33, Issue 3 , Março, 2011.

[22] Faria, D.; Lúcio, V.; Ramos, A. – *Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding.* Engineering and Structures, Volume 33, Junho 2011, págs. 2025-2043.

[23] Inácio, M.; Ramos, A.; Faria, D. – *Strengthening of flat slabs with transverse reinforcement by introduction of steel bolts using different anchorage approaches.* Engineering and Structures, Volume 44, Novembro 2012, págs. 63-77.

[24] Faria, D., Biscaia, H., Lúcio, V. e Ramos, A – *Punching of reinforced concrete slabs and experimental analysis and comparison with codes.* Proceedings of IABSE-Fib Codes in Structural Engineering – Developments and Needs for International Practice, Cavtat, Dubrovnik, Croácia, Maio 2010.

[25] Gomes, J. e Ramos, A. - *Estudo Experimental do Punçoamento em Lajes Reforçadas com Armadura Transversal Aderente Pós-Instalada*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2010, Lisboa, Novembro, 2010.

[26] Paias, J. e Ramos, A. - *Estudo Experimental do Punçoamento em Lajes de Betão Reforçado com Fibras de Aço*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2010, Lisboa, Novembro, 2010.

[27] Faria, D., Biscaia, H., Lúcio, V. e Ramos, A. - *Material and geometrical parameters affecting punching of reinforced concrete flat slabs with orthogonal reinforcement.* Short Paper, fib Symposium PRAGUE 2011 – Concrete Engineering for Excellence and Efficiency, Praga, República Checa, Junho 2011.

[28] Ramos, A., Lúcio, V., Faria, D. e Inácio, M. - *Punching Research at Universidade Nova de Lisboa.* Design Of Concrete Structures and Bridges Using Eurocodes, Bratislava, Eslováquia, Setembro 2011.

[29] Faria, D., Lúcio, V., e Ramos, A. - *Pull-out and push-in tests of bonded steel strands.* Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, Volume 63, Issue 9, Setembro, 2011, pp. 689-705.

[30] Faria, D., Inácio, M., Lúcio, V. e Ramos, A. - *Punching of Strengthened Concrete Slabs – Experimental Analysis and Comparison with Codes,* IABSE, Structural Engineering International, No. 2 – "Codes of Practice in Structural Engineering", Maio 2012.

[31] Gomes, J. e Ramos, A. P. - *Punçoamento em Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais Aderentes (Parte 1).* Revista Internacional Construlink, Nº 30, Junho de 2012, Vol. 10, 23-33.

[32] Gomes, J. e Ramos, A. P. - *Punçoamento em Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos Transversais Aderentes (Parte 2).* Revista Internacional Construlink, Nº 30, Junho de 2012, Vol. 10, 34-43.

[33] Faria, D., Lúcio, V., e Ramos, A., *Post-Punching Behaviour of Flat Slabs Strengthened with a New Technique using Post-Tensioning*, Engineering Structures, Volume 40, Julho 2012, pp 382-397.

[34] Mamede, N., Ramos, A. e Faria, D. - *Análise do efeito de características mecânicas e geométricas que afetam o comportamento ao Punçoamento de lajes fungiformes*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 2012.

[35] Faria, D.; Lúcio, V. e Ramos, A. - *Reforço de lajes com recurso a pós-tensão com ancoragens por aderência*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 2012.

[36] Inácio, M.; Ramos, A.; Lúcio, V. e Faria, D. - *Punçoamento de lajes fungiformes reforçadas com parafusos – efeito da área e posicionamento da ancoragem*, Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 2012.

[37] Clément, T., Ramos, A. P., Fernández Ruiz, M. e Muttoni, A. - *Design for punching of prestressed concrete slabs.* Structural Concrete, 14: 157–167. 2013.

[38] Monteiro Azevedo, N. e Lemos, V. - *A 3D generalized rigid particle contact model for rock fracture*, Engineering Computations, Vol 30 (2), 2013, pp. 277-300.

[39] Gouveia, N.; Fernandes, N., Faria, D.; Ramos A. e Lúcio, V. - Punching of Steel Fibre Reinforcement Concrete Flat Slabs, Proceedings of fib symposium Tel Aviv 2013, Tel Aviv, Abril 2013.

[40] Faria, D.; Lúcio, V. e Ramos, A. - Development of a Design Proposal for a Slab Strengthening System using Prestress with Anchorages by Bonding, Proceedings of fib symposium Tel Aviv 2013, Tel Aviv, Abril 2013.

[41] Inácio, M.; Ramos, A., Lúcio, V. e Faria, D. - Punching of High Strength Concrete Flat Slabs - Experimental Investigation, Proceedings of fib symposium Tel Aviv 2013, 4p, Tel Aviv, Abril de 2013.

[42] Silva, R.; Faria, D.; Ramos, A.; Inácio, M. - A physical approach for considering the anchorage head size influence in the punching capacity of slabs strengthened with vertical steel bolts, Structural Concrete, Junho, 2013.