



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# BETÃO DE ELEVADA DENSIDADE COM AGREGADOS DE MINÉRIO DE FERRO DE MONCORVO

Projeto de Investigação BETESPECIAL – Betões Especiais

Lisboa • abril de 2017

**I&D** MATERIAIS

RELATÓRIO 128/2017 – **DM/NBPC**

## **Título**

**BETÃO DE ELEVADA DENSIDADE COM AGREGADOS DE MINÉRIO DE FERRO DE MONCORVO**

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS

**António Bettencourt Ribeiro**

Investigador Principal, Chefe do Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos

## **Colaboração**

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

**Rui Nogueira**

Técnico Superior, Núcleo de Qualidade Metrológica

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS

**António Ferreira**

Técnico Superior, Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos

**João Balsinha**

Técnico Superior, Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos

**Victor Fialho**

Técnico Superior, Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Relatório 128/2017

Proc. 0202/112/19723

## BETÃO DE ELEVADA DENSIDADE COM AGREGADOS DE MINÉRIO DE FERRO DE MONCORVO

### Resumo

---

Foi fabricado um betão com agregados de minério de ferro proveniente de jazida de Moncorvo, para avaliação do potencial destes agregados para o fabrico de betão de elevada densidade. Com base nos resultados obtidos são feitas considerações sobre a densidade do betão que será possível obter em função da massa volúmica do agregado.

Palavras-chave: Betão de elevada densidade / Minério de ferro / Agregado de elevada densidade

## HIGH-DENSITY CONCRETE WITH IRON ORE AGGREGATES FROM MONCORVO

### Abstract

---

A concrete with iron ore aggregates from Moncorvo deposit was manufactured to evaluate the potential of these aggregates for the manufacture of high-density concrete. Based on the results obtained, the concrete density is estimated according to the density of the aggregate.

Keywords: High-density concrete / Iron ore / Heavyweight aggregate



## Índice

1	Introdução .....	1
2	Método .....	2
3	Materiais e formulação .....	4
4	Ensaio realizados e resultados .....	6
5	Análise dos resultados .....	7
6	Conclusões.....	8
	Referências bibliográficas .....	9

## Índice de figuras

Figura 3.1 – Curvas granulométricas dos agregados e do betão .....	5
Figura 5.1 – Estimativa da massa volúmica do betão em função da massa volúmica do agregado .....	7

## Índice de quadros

Quadro 3.1 – Características dos agregados.....	4
Quadro 3.2 – Composição de betão .....	5
Quadro 4.1 – Resultados de ensaios no betão endurecido .....	6





# 1 | Introdução

No âmbito da Estratégia de Investigação e Inovação (E2I) do LNEC 2013-2020 (LNEC, 2014), está a ser desenvolvido um projeto de investigação programada com a designação Desenvolvimento de betões especiais, que tem como objetivo desenvolver formulações de betão que lhe confirmam características especiais, que não são atingidas com os betões atualmente em utilização, e que apresentem potencial para satisfazer necessidades atuais e futuras requeridas para este material de construção.

Tendo em conta a natureza do projeto de investigação, e atendendo ao Protocolo de Colaboração para Aproveitamento de Minério de Ferro entre a empresa MTI – Ferro de Moncorvo, SA. e o LNEC, estabelecido em março de 2015 e onde se prevê a colaboração entre estas entidades no desenvolvimento de atividades de ciência e tecnologia em domínios como a engenharia dos materiais e matérias-primas, foi efetuado este estudo de carácter exploratório para avaliação da densidade de betão produzido com minério de ferro de jazida de Moncorvo.

A empresa MTI pretende fazer a exploração de jazidas de ferro de Moncorvo, envolvendo a produção de concentrados de ferro, entre outros, em resultado da qual se prevê que venham a estar disponíveis agregados com densidade elevada, embora variável, com potencial utilização na produção de betão. Entre as aplicações possíveis de betões de elevada densidade, resultante da utilização daquele tipo de agregados, encontram-se os elementos para proteção de estruturas marítimas, cujo consumo se prevê possa crescer, face às consequências das alterações climáticas. Para estes elementos de betão, a otimização da relação entre o peso e o volume pode traduzir-se em ganhos económicos associados à quantidade de material requerida, à energia para transporte e manuseamento e à eficiência no desempenho de proteção.

A otimização na razão peso/volume passa por maximizar a densidade do betão, a qual envolve a formulação de betões com agregados de densidade elevada, usando o maior volume de agregados possível, compatível com as exigências de fabrico e colocação, bem como com o desempenho em serviço.

O presente trabalho configura uma avaliação preliminar sobre o potencial de utilização dos agregados provenientes de Moncorvo, através da produção de um betão com agregados fornecidos pela empresa MTI e medição da sua densidade. Com base no intervalo esperado de densidade dos agregados provenientes das jazidas de ferro em causa, faz-se um estudo prospetivo sobre as densidades dos betões produzidos com este tipo de agregados.

## 2 | Método

Em obras de proteção marítima é necessário utilizar elementos de materiais densos que permitam suportar a energia associada ao movimento da água. Os elementos utilizados podem ser simples enrocamentos mas a utilização de betão permite obter formas otimizadas e aproveitar elementos de pequenas dimensões. O betão, sendo uma mistura de rocha com uma pasta ligante, apresenta uma densidade inferior à dos agregados que o constituem, quando de massa volúmica normal ou elevada, porque a pasta tem uma densidade relativa que não chega a 2. Assim, a massa volúmica de um betão será dada por:

$$\gamma_b = \frac{\gamma_a \times V_a + \gamma_p \times V_p}{V_a + V_p + V_v} \quad (1)$$

onde,

$\gamma_b$  – massa volúmica do betão,

$\gamma_a$  – massa volúmica do agregado,

$V_a$  – volume de agregado,

$\gamma_p$  – massa volúmica da pasta,

$V_p$  – volume de pasta,

$V_v$  – volume de vazios.

Da expressão (1), e tendo em consideração a massa volúmica da pasta e dos agregados, resulta que a maximização da densidade do betão passa pela maximização do volume de agregado e minimização do volume de vazios.

Tendo como enquadramento a produção de betão simples para elementos de estruturas marítimas, os quais requerem um material com a relação peso/volume maximizada e características de resistência e durabilidade adaptadas a ambiente marítimo, considerou-se necessário efetuar um trabalho experimental exploratório, usando uma amostra de agregados fornecida pela empresa e outros materiais de utilização corrente na produção de betões. O trabalho experimental consistiu na formulação e produção de um betão com maximização do volume de agregados densos, com características compatíveis para utilização em elementos de proteção costeira.

Em betão simples não armado exposto à água do mar, em geral não existem condições de especial agressividade química, sendo as exigências para o betão estabelecidas em função das necessidades associadas ao comportamento mecânico. No estado fresco, o betão deve apresentar consistência suficiente para moldagem e endurecimento sem segregação. No estado endurecido, as

características mecânicas a exigir dependem do nível de tensões a que os elementos estão sujeitos, sendo prática corrente utilização de betões com classes de resistência não muito elevada.

Assim, foi definido produzir um betão com consistência no estado fresco, medida pelo abaixamento do cone de Abrams (NP EN 12350-2), superior a 20 mm, e uma resistência à compressão (NP EN 12390-3), medida em cubos com 150 mm de aresta, aos 28 dias, superior a 30 MPa, características mínimas julgadas suficientes para a maioria das aplicações em elementos de proteção costeira.

Estas características deverão ser obtidas usando o agregado na granulometria fornecida pela MTI, com maximização do volume de agregado denso. Para este efeito, e no que se refere ao empacotamento de agregados, recorreu-se, como primeira aproximação, ao método empírico de Faury (Faury; Caquot; 1958), que define uma curva granulométrica para redução do espaço entre partículas.

A trabalhabilidade do betão, requerida para fabrico, manuseamento, colocação e compactação, e conseqüente minimização de vazios, depende do movimento relativo entre partículas de agregados, o qual pode ser simulado através de um modelo de Bingham (eq. 2)

$$\tau = \tau_0 + \mu \times \dot{\varphi} \quad (2)$$

onde,

$\tau$  - tensão de corte,

$\tau_0$  - tensão de corte para o início do movimento,

$\mu$  - viscosidade,

$\dot{\varphi}$  - velocidade de corte.

A redução do espaço entre partículas faz aumentar a velocidade de corte para um mesmo movimento relativo, pelo que é importante atuar ao nível da tensão de corte para o início do movimento e da viscosidade da pasta. Para tal foram usados dois adjuvantes redutores de água, que permitem minimizar o volume de pasta necessária à consistência requerida.

### 3 | Materiais e formulação

Para o fabrico do betão foram usados agregados fornecidos pela empresa MTI, identificados como gravilha de minério de ferro, provenientes de jazida de Moncorvo. A empresa forneceu 150 kg deste agregado em 3 frações, identificadas como Brita 2, Brita 1 e Areia. Foram determinadas as características dos agregados que estão apresentadas no Quadro 3.1

Quadro 3.1 – Características dos agregados

	Abertura do peneiro	Brita 2	Brita 1	Areia
Granulometria (% de material que passa)	31.5	100.0	100.0	100.0
	20	93.9	100.0	100.0
	16	67.5	100.0	100.0
	14	49.6	100.0	100.0
	12.5	34.1	100.0	100.0
	10	12.6	99.5	100.0
	8	3.1	88.4	100.0
	6.3	1.5	54.1	100.0
	4	1.1	10.8	96.1
	2	1.0	4.6	81.5
	1	1.0	3.4	64.8
	0.5	1.0	2.9	48.6
	0.25	0.9	2.6	36.4
	0.125	0.8	2.3	28.1
	0.063	0.7	2.0	22.3
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m <sup>3</sup> )		3810	3780	3370
Massa volúmica das partículas secas (kg/m <sup>3</sup> )		3590	3540	3240
Massa volúmica das partículas saturadas com a superfície seca (kg/m <sup>3</sup> )		3650	3600	3280
Absorção de água (%)		1.6	1.8	1.1

Como se constata, a máxima dimensão do agregado mais grosso é de 20 mm, pelo que se pode considerar estar em condições desfavoráveis para a maximização da massa volúmica, o que permite concluir que as densidades obtidas serão valores passíveis de serem superados em betões fabricados com agregados mais grossos.

Para o fabrico do betão usou-se cimento CEM I 42,5 R proveniente da fábrica de Alhandra da Cimpor, os adjuvantes redutores de água com as marcas comerciais Pozolith 390 N e Glenium 26 SCC da BASF e água do abastecimento público da rede de Lisboa.

A composição de betão utilizada está apresentada no Quadro 3.2. Na segunda e terceira colunas deste quadro encontra-se a composição de betão, em massa e em volume respetivamente, considerando um teor de vazios estimado de 10 l/m<sup>3</sup>, enquanto nas quarta e quinta colunas se apresenta a composição para teor nulo de vazios. Na Figura 3.1 encontram-se as curvas

granulométricas dos agregados e dos sólidos no betão, bem como a curva de referência de Faury, traçada assumindo um parâmetro A de 26 e um parâmetro B de 2 (Coutinho; Gonçalves, 1994).

Quadro 3.2 – Composição de betão

Constituinte	Dosagem em massa (kg/m <sup>3</sup> )	Dosagem em volume (litros)	Dosagem em massa (kg/m <sup>3</sup> )	Dosagem em volume (litros)
Cimento	281	91	284	92
Brita 2	912	250	921	252
Brita 1	750	208	758	211
Areia	1013	309	1023	312
Pozzolith 390 N	2,69	2	3	2
Glenium 26 SCC	5,03	5	5	5
Água	125	125	126	126
Vazios estimados	-	10	-	0
Total	3089	1000	3121	1000

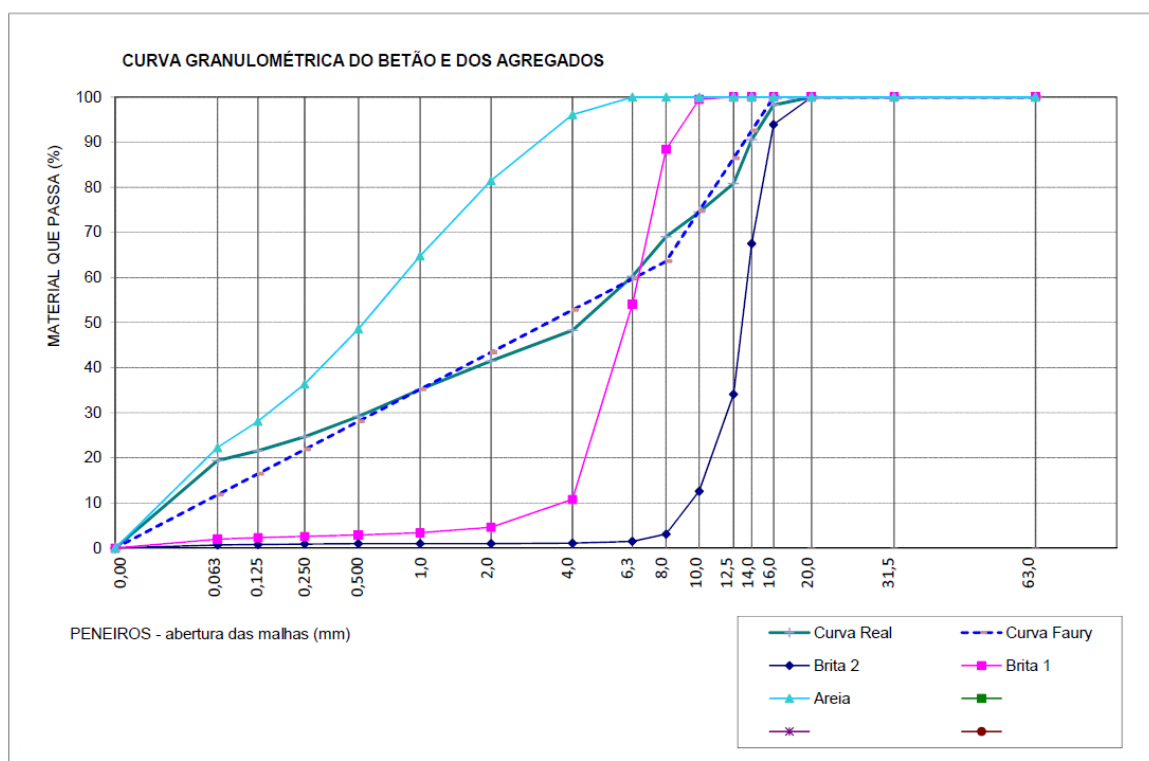


Figura 3.1 – Curvas granulométricas dos agregados e do betão

## 4 | Ensaio realizados e resultados

Foi efetuada uma amassadura betão com cerca de 15 litros de volume, numa misturadora de eixo vertical, com capacidade para misturar de forma homogénea 35 litros. Foram colocados os agregados secos, com 1/3 da água de amassadura, os quais foram misturados durante 30 segundos. Seguidamente foi colocado o cimento e a restante água de amassadura, com exceção de uma pequena quantidade que foi adicionada posteriormente com os adjuvantes. Após colocação do cimento, o material foi misturado durante mais 2 minutos, altura em que se colocaram os adjuvantes e a restante parcela de água, mantendo-se a misturadora em funcionamento até perfazer 5 minutos de tempo total, após o início da mistura.

Seguidamente foi efetuada a determinação da consistência do betão no estado fresco, pelo ensaio de abaixamento, com um resultado de 30 mm. O betão utilizado neste ensaio foi colocado de novo na misturadora, tendo-se remisturado todo o material durante 30 segundos. Foram depois moldados 4 provetes cúbicos de 150 mm de aresta e 1 provete cúbico de 100 mm de aresta, usando-se assim 14,5 litros de betão dos 15 litros fabricados.

Após fabrico, os provetes foram conservados nos moldes em laboratório durante 24 horas, a  $20\pm 4$  °C e humidade relativa de  $60\pm 10$  %, cobertos de forma a evitar a saída de humidade. Após desmoldagem, os provetes foram colocados em sala condicionada, com  $20\pm 2$  °C e humidade relativa superior a 95 %, até à idade em que foram sujeitos aos ensaios de determinação da densidade e da resistência à compressão, nomeadamente aos 3, 7, 28 e 850 dias (2 anos e 4 meses). Os resultados estão apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Resultados de ensaios no betão endurecido

Identificação do provete cúbico	1	2	3	4	5
Idade de ensaio (dias)	3	7	28	28	850
Aresta (mm)	150				100
Massa saturada (g)	10700	10676	10638	10646	3168
Massa imersa (g)	7280.5	7285.9	7225.7	7234	2160
Volume (ml)	3419.5	3390.1	3412.3	3412	1008
Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	3129	3149	3118	3120	3143
Tensão de rotura (MPa)	20.2	33.9	41.6	41.8	49,7

## 5 | Análise dos resultados

Neste trabalho exploratório foi produzido um betão com consistência suficiente para fabricar elementos destinados a proteção marítima, tendo-se obtido no estado endurecido os resultados apresentados no Quadro 4.1. Como se pode observar nesse quadro, a massa volúmica do betão é praticamente idêntica à massa volúmica teórica com teor nulo de vazios (Quadro 3.2), evidenciando uma adequada formulação. Nesta caso a pasta apresenta uma massa volúmica de cerca de 1850 kg/m<sup>3</sup>, para uma massa volúmica ponderada dos agregados de cerca de 3500 kg/m<sup>3</sup>.

A resistência à compressão, superior a 20 MPa aos 3 dias, é suficiente para assegurar um ritmo de descofragem compatível com fabrico industrial, e a resistência aos 28 dias, superior a 40 MPa, é adequada às exigências usuais para o tipo de elementos em causa. Ao fim de mais de 2 anos, como é expectável, a resistência à compressão é superior, sendo neste caso o crescimento de cerca de 20 % em relação aos 28 dias.

Em face da densidade dos agregados, de cerca de 3,5, pode considerar-se que a massa volúmica do betão obtida, próxima 3100 kg/m<sup>3</sup>, e que é cerca de 90 % da massa volúmica do agregado, se encontra já nos valores máximos que é possível alcançar com os mesmos agregados, particularmente com esta máxima dimensão de 20 mm.

Deixando nesta fase a análise da influência da máxima dimensão do agregado, e considerando que se podem obter granulometrias de agregado semelhantes às utilizadas neste trabalho, para agregados da mesma natureza mas com densidades distintas, pode estimar-se uma função de variação da densidade do betão com a densidade do agregado.

Segundo informação disponibilizada pela MTI, no mesmo local onde foram colhidos os agregados enviados para este estudo, podem ser obtidos agregados com densidade até 5150 kg/m<sup>3</sup>. Assim, tomando constante os volumes aplicados no betão produzido, obtêm-se a linha de variação da densidade do betão com a densidade do agregado, que se apresenta na Figura 5.1.

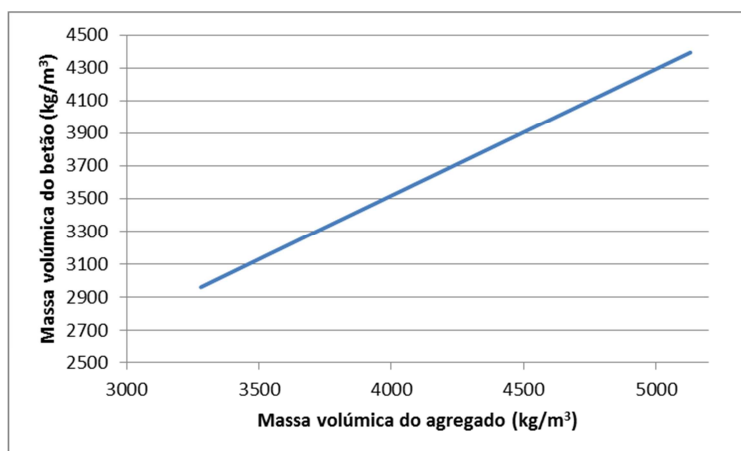


Figura 5.1 – Estimativa da massa volúmica do betão em função da massa volúmica do agregado

## 6 | Conclusões

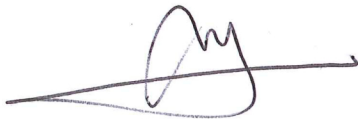
Neste estudo fez-se uma análise exploratória sobre as potencialidades de fabrico de betões densos, com recurso a agregados provenientes de uma jazida de Moncorvo pertencente à empresa MTI. Foi fabricado um betão com características suficientes para ser aplicado em elementos de proteção marítima.

Com agregados de massa volúmica de cerca de  $3500 \text{ kg/m}^3$  produziu-se um betão com massa volúmica superior a  $3100 \text{ kg/m}^3$ , tendo-se feita uma estimativa, por extrapolação, para agregados com densidade superior, que permite antever a possibilidade de produzir betões com massa volúmica superior a  $4000 \text{ kg/m}^3$ , se estiverem disponíveis agregados com massa volúmica da ordem de  $5000 \text{ kg/m}^3$ .

Lisboa, LNEC, abril de 2017

VISTO

O Diretor do Departamento de Materiais



Arlindo Gonçalves

AUTORIA



António Bettencourt Ribeiro

Investigador Principal

Chefe do Núcleo de Betões Pedra e Cerâmicos



## Referências bibliográficas

COUTINHO, A.S.; GONÇALVES, A. J, 1995 – **Fabrico e Propriedades do Betão**”. Vol. III., LNEC.

FAURY, J.; CAQUOT, A., 1958 – **Le Béton – Influence de ses constituants inertes, Régles à adopter pour sa meilleure composition, confection et son transport sur les chantiers**. Terceira edição, Paris: Dunod.

LNEC, 2014 – **E2I Estratégia de Investigação e Inovação 2013-2020**. Conselho Diretivo.

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

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



