

SUBMETIDO 12/06/2021

APROVADO 03/09/2021

PUBLICADO ON-LINE 30/09/2021

PUBLICADO 30/06/2023

EDITORES ASSOCIADOS


Mariana Amorim Fraga e
Hugo Plínio de Andrade Alves


DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6050>

ARTIGO ORIGINAL

Estudo da influência do agregado graúdo inadequado nas propriedades dos concretos fresco e endurecido

 Danilo de Almeida e Silva ^{[1]*}

 Carlos Eduardo
Luna de Melo ^[2]

 André Luiz Bortolacci Geyer ^[3]

[1] arq.danillo@gmail.com

[2] carlosluna@unb.br

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de Brasília (UnB), Brasil

[3] andre.geyer@hotmail.com

Departamento de Construção Civil da Escola
de Engenharia Civil, Universidade Federal de
Goiás (UFG), Brasil

RESUMO: O presente estudo tem como objetivo quantificar o agregado graúdo inadequado de uma determinada amostra e avaliar a sua influência nas propriedades mecânicas do concreto fresco e endurecido. Considerando o agregado graúdo britado classificado em quatro formas, determina-se a forma alongada-lamelar como inadequada, com as dimensões comprimento/espessura > 3,0 cm e largura/espessura > 3,0 cm. Foi utilizado um agregado graúdo britado com dimensão máxima característica (DMC) em 25 mm, agregado de origem metamórfica, encontrado na região de Anápolis-GO. O agregado foi classificado em quatro categorias como forma cúbica, alongada, lamelar e alongada-lamelar, conforme o método do paquímetro para a determinação do índice de forma do agregado graúdo britado. Foram produzidos três diferentes traços de concreto, sendo o traço 1:3,5 com alto consumo de cimento, traço 1:5,0 com moderado consumo de cimento e traço 1:6,5 com baixo consumo de cimento. Dessa forma, o presente artigo tem a finalidade de avaliar a influência do agregado inadequado em diferentes situações: quantidade de materiais secos, quantidade de aglomerante e relação água/cimento (a/c). O agregado graúdo analisado apresentou um percentual de 19% de agregado inadequado (forma alongada-lamelar), e, na análise dos resultados do concreto fresco, com relação à resistência à compressão, verificou-se que essa quantidade de agregado inadequado pode influenciar negativamente nas propriedades mecânicas do concreto.

Palavras-chave: agregado graúdo; agregado ideal; agregado inadequado; desempenho do concreto.

Study of the influence of inadequate coarse aggregate on the properties of fresh and hardened concrete

ABSTRACT: The present study aims at quantifying the inadequate coarse

*Autor para correspondência.

aggregate in a given sample, and to evaluate its influence on the mechanical properties of fresh and hardened concrete. Considering the coarse crushed aggregate classified into four forms, the blade shape form was determined as inadequate, with the dimensions length/thickness > 3.0 cm and width/thickness > 3.0 cm. A coarse crushed aggregate, maximum characteristic dimension (DMC) of the aggregate in 25 mm, of metamorphic origin, found in the region of Anápolis-GO, was used. The aggregate was classified into four categories as cubic, elongated, rod and blade shape according to the caliper method for determining the shape index of the coarse crushed aggregate. Three different mixes of concrete were produced: mix 1:3.5 with high cement consumption, mix 1:5.0 with moderate cement consumption and mix 1:6.5 with low cement consumption. Thus, the purpose of this article is to evaluate the influence of inadequate aggregate in different situations: amount of dry materials, amount of binder and w/c ratio. The coarse aggregate analyzed presented a percentage of 19% of inadequate aggregate (blade shape), and, in the analysis of the fresh concrete results, with respect to compressive strength, it was found that this amount of inadequate aggregate can negatively influence the mechanical properties of concrete.

Keywords: concrete performance; coarse aggregate; ideal aggregate; inadequate aggregate.

1 Introdução

O objetivo desta pesquisa é quantificar e avaliar o agregado graúdo inadequado presente em uma determinada amostra, para uso em concreto hidráulico.

As propriedades tão desejadas dos concretos fresco e endurecido são norteadas pelas características do agregado graúdo e miúdo, como granulometria, forma, textura, dimensão, massa específica, massa unitária, porosidade. Características estas influenciadas pelo processo de beneficiamento, conhecido como mecanismo de britagem.

Conforme estudos de Zhou *et al.* (2018), os britadores produzem agregados de vários tamanhos e formas, e essa forma do agregado graúdo britado pode ter desempenho positivo ou negativo na produção do concreto. O estudo sobre a forma do agregado produzido para concreto é relativamente novo. Powers (1953) foi o primeiro a propor um método de classificação para a forma do agregado. Atualmente existem várias pesquisas sobre a classificação da forma do agregado graúdo para concreto, tais como Fabro *et al.* (2011), Erdoğan e Fowler (2005), Frazão (2007), Farias, Palmeira e Beja (2017), O'Reilly Díaz (1998), Piotrowska, Malecot e Ke (2014), Silva (2012), Silva e Geyer (2018), Ueno e Ogawa (2020), Zhou *et al.* (2018), e normas como BS 812-105.1 (BSI, 1989), BS 812-105.2 (BSI, 1990), DIN EN 933-3 (ES, 1997), DIN EN 933-4 (ES, 1999), ACI 213R-87 (ACI, 1999) e NBR 7809 (ABNT, 2008), que fazem referência a uma forma ideal do agregado graúdo para concreto.

A britagem consiste na quebra de partículas, principalmente pela ação de esforços compressivos ou de impacto. Os esforços compressivos são aplicados, em geral, por meio do movimento periódico de aproximação e afastamento de uma superfície móvel contra outra fixa. Esse é o caso dos britadores de mandíbulas, britadores giratórios e britadores cônicos (HONÓRIO, 2010). O presente estudo demonstra um determinado processo de britagem e sua correlação com as características físicas do agregado, quantidade de forma ideal e aceitável e quantidade de forma inadequada do agregado graúdo para produção de concreto.

Quando uma rocha é submetida à fragmentação por processos mecânicos de britagem, o produto será constituído de fragmentos com formas e dimensões variadas. Os tipos de forma que ocorrem na rocha britada recebem diferentes designações: cúbica (ou esférica), alongada (ou prismática), lamelar (ou achatada, ou discoide) e alongada-lamelar.

A britagem do agregado graúdo tende a produzir fragmentos alongados e achatados, especialmente quando são feitos por britadores de mandíbulas. Aquelas partículas cuja espessura é menor em relação às outras duas dimensões são denominadas de lamelares ou achatadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A forma do agregado se refere à sua geometria tridimensional, porém, como é difícil representar corpos tridimensionais irregulares, é mais conveniente definir certas características geométricas desses corpos, tais como alongamento, achatamento, cubicidade, esfericidade e angulosidade (FARIAS; PALMEIRA; BEJA, 2017).

Conforme estudos realizados (AL-ROUNAN *et al.*, 2007; FRAZÃO; PARAGUASSU, 1998; KRUMBEIN, 1941; UENO; OGAWA, 2020), os métodos comumente utilizados para determinar a forma dos agregados se baseiam na medição de dimensões dos fragmentos por meio de linhas imaginárias que definem comprimento, largura e espessura.

Considerando a forma ideal no processo de britagem e as dimensões exatas (imaginando uma forma perfeita), podemos classificar a forma do agregado graúdo segundo a razão de suas dimensões: comprimento/espessura e largura/espessura.

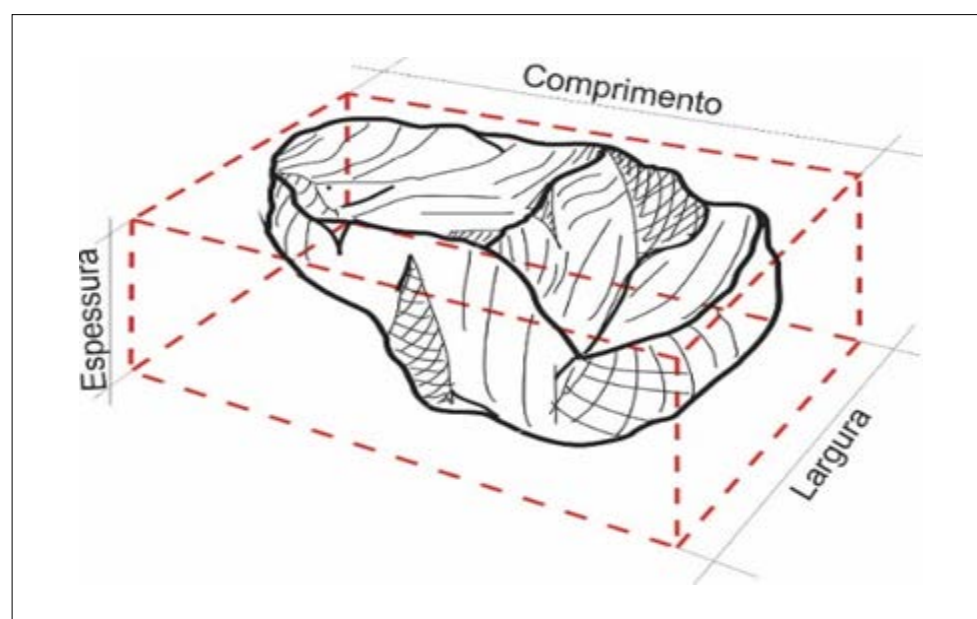
Para a análise de um agregado, definem-se seus eixos conforme a NBR 7809 (ABNT, 2008), a partir da qual se obtêm a maior dimensão, denominada comprimento; a dimensão intermediária, denominada largura; e a menor dimensão, a espessura. A classificação do agregado graúdo britado é dada conforme o grau de cubicidade do agregado (SILVA; GEYER, 2018).

A Figura 1 indica informações acerca da forma do agregado graúdo para concreto, tendo como referência a proporção de suas dimensões.

Figura 1 ►

Projeção da forma perfeita do agregado sobre a verdadeira.

Fonte: elaborada pelos autores



Como uma breve elucidação sobre o assunto, a ideia é que a forma de uma partícula pode ser definida como uma projeção da forma perfeita da partícula cúbica sobre a

verdadeira (a área de uma projeção arbitrária – bidimensional – da partícula, ou seja, exata, com o volume verdadeiro, ou a área de superfície real, medida em três dimensões).

A análise de Silva (2012) considera o agregado com forma cúbica como ideal, a forma alongada e a forma lamelar como aceitáveis e a forma alongada-lamelar como inadequada para produção de concreto.

2 Metodologia

O método utilizado nesta pesquisa foi o proposto por Silva e Geyer (2018), que classifica a forma do agregado em quatro categorias (cúbica, alongada, lamelar e alongada-lamelar) para o agregado gráúdo britado natural, tendo como referência a proporção de suas dimensões – comprimento/espessura (c/e) e largura/espessura (l/e) –, como demonstra a Tabela 1.

Tabela 1 ▶

Índice de forma do agregado gráúdo.

Fonte: Silva e Geyer (2018)

| Forma | Razão | Índice |
|------------------|-----------------|--------|
| Cúbica | $c/e < e/l/e <$ | 1,8 |
| Alongada | $c/e > e/l/e <$ | 1,8 |
| Lamelar | $c/e > e/l/e >$ | 2,4 |
| Alongada-lamelar | $c/e > e/l/e >$ | 3,0 |

As Figuras 2 a 5 apresentam as quatro formas do agregado gráúdo britado para concreto hidráulico.

Figura 2 ▶

Forma cúbica do agregado gráúdo.

Fonte: arquivo dos autores



Figura 3 ▶

Forma alongada do agregado gráúdo.

Fonte: arquivo dos autores



Figura 4 ▶

Forma lamelar do agregado graúdo.

Fonte: arquivo dos autores



Figura 5 ▶

Forma alongada-lamelar do agregado graúdo.

Fonte: arquivo dos autores



2.1 Seleção dos materiais

O agregado graúdo selecionado para o programa experimental foi o granulito proveniente da Pedreira Anápolis – Goiás, devido ao processo de britagem, à origem da rocha e às especificações técnicas, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2005). A rocha é de origem metamórfica com alto grau de metamorfismo, com textura granuloblástica e estrutura gnáissica, que se assemelha ao granito (rocha ígnea rica em quartzo, feldspato e mica), devido à sua mineralogia e textura. Foi utilizado o agregado com intervalo com dimensão máxima característica (DMC) 25 mm, que melhor se enquadra ao experimento, pela facilidade de manuseio.

2.2 Extração e britagem do agregado graúdo

A extração da rocha se dá por explosivos na jazida a céu aberto. Após o desmanche, a rocha é transportada por caminhões por uma distância de 500 m até o britador primário (britador de mandíbulas) e, após a britagem primária, é transportada por esteiras para o britador secundário (britador de cone), ficando no processo de britagem secundária até adquirir a granulometria desejada. Em seguida, é transportada por esteiras para o britador terciário (britador de cone) e, quando adquirida a granulometria requerida, é transportada por caminhões para o consumidor final.

2.3 Classificação da forma do agregado graúdo

Foram separadas dez amostras com 10 kg do agregado graúdo e seguiu-se a determinada sequência: caracterização, catalogação e separação das amostras. A caracterização da amostra foi feita conforme a Tabela 1, seguida da catalogação e da separação do agregado em forma cúbica, forma alongada, forma lamelar e forma alongada-lamelar, de acordo com a metodologia proposta por Silva e Geyer (2018).

A Tabela 2 e as Figuras 6 e 7 demonstram o método de classificação do agregado graúdo britado em diferentes formas.

Tabela 2 ▶
Método para classificação do agregado graúdo britado.

| Traço 01 – Amostra experimental | | | | | | kg |
|---------------------------------|-------------|---------|-----------|--------|--------|----------|
| Partícula | Comprimento | Largura | Espessura | Índice | Forma | Peso (g) |
| 1 | 0,27 | 0,23 | 0,15 | 1,50 | Cúbica | |

Figura 6 ▶
Método de classificação.
Fonte: arquivo dos autores



Figura 7 ▶
Classificação do agregado graúdo em quatro formas.
Fonte: arquivo dos autores



A Tabela 3 indica a classificação e separação dos agregados graúdos em forma cúbica, forma alongada, forma lamelar e forma alongada-lamelar, com base em suas dimensões, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 3 ▶

Caracterização da amostra 1 (10 kg).

Fonte: dados da pesquisa

| Forma | Nº agregado | Índice | (kg) | % |
|------------------|-------------|--------|-------|------|
| Cúbica | 331 | 1,52 | 3,35 | 33,5 |
| Alongada | 363 | 2,10 | 3,11 | 31,1 |
| Lamelar | 204 | 2,71 | 1,61 | 16,1 |
| Alongada-lamelar | 365 | 6,07 | 1,93 | 19,3 |
| TOTAL | 1.263 | 3,20 | 10,00 | 100% |

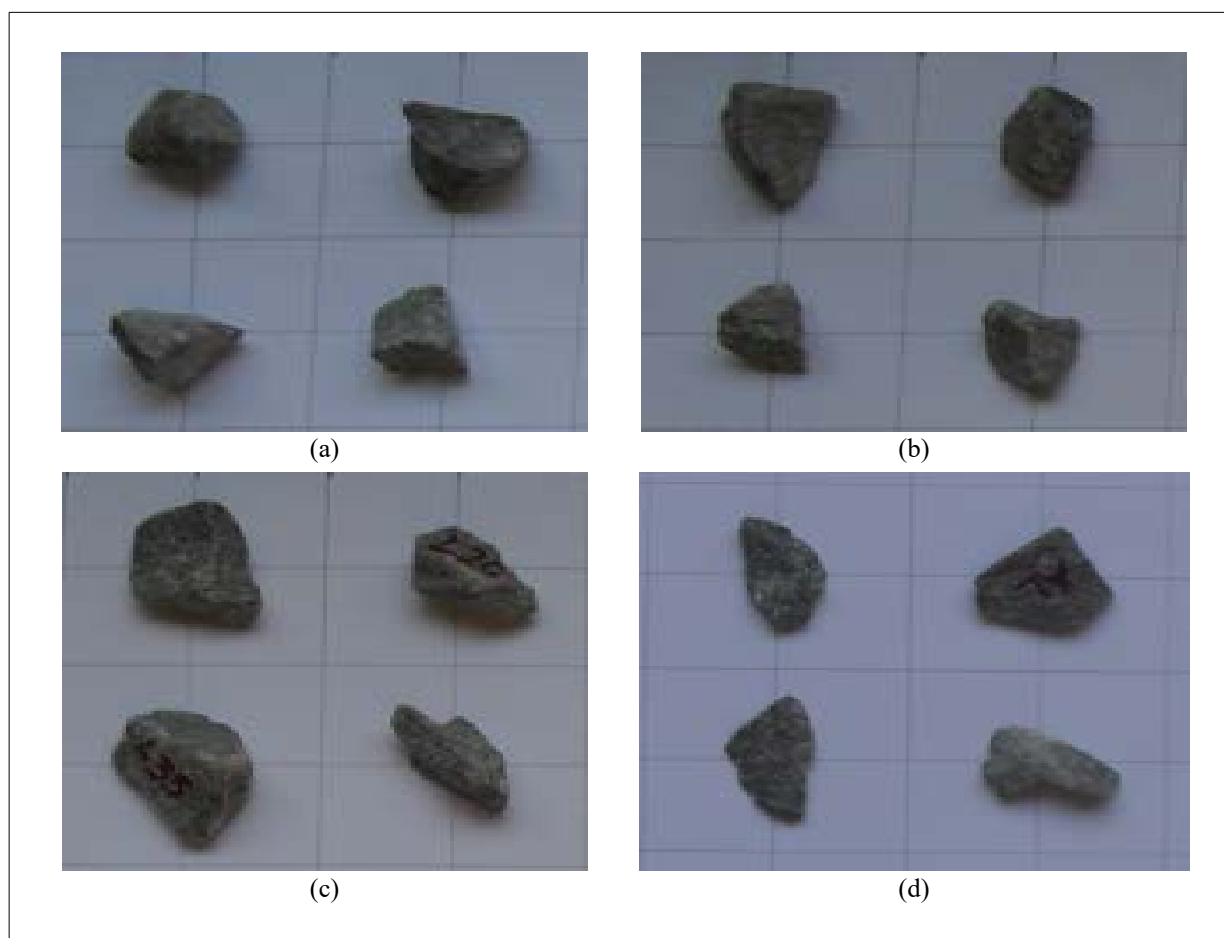
Figura 8 ▼

Imagens dos agregados conforme sua classificação.

a) forma cúbica. b) forma alongada. c) forma lamelar. d) Forma alongada-lamelar.

Fonte: arquivo dos autores

Para as análises foi realizada a classificação conforme a forma, quantificação e pesagem de cada agregado e posterior pesagem total para cada forma, com o objetivo de determinar a representação exata de cada forma em uma amostra de 10 kg. A partir da segunda análise não houve a pesagem individual do agregado. A Figura 8 apresenta a classificação das amostras conforme sua forma.



A Tabela 4 indica o resultado das amostras 1 a 10, com todas possuindo 10 kg do agregado graúdo selecionado.

Tabela 4 ►
Comparação das amostras
1 a 10 do agregado graúdo,
todos em kg.
Fonte: dados da pesquisa

| Forma | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cúbica | 3,35 | 3,29 | 3,12 | 3,09 | 3,20 | 3,30 | 3,25 | 3,10 | 3,09 | 3,35 |
| Alongada | 3,11 | 3,19 | 3,21 | 3,19 | 3,21 | 3,12 | 3,03 | 3,25 | 3,50 | 3,14 |
| Lamelar | 1,61 | 1,70 | 1,95 | 1,79 | 1,65 | 1,80 | 1,76 | 1,69 | 1,55 | 1,80 |
| Alongada-lamelar | 1,92 | 1,81 | 1,72 | 1,93 | 1,94 | 1,78 | 1,96 | 1,96 | 1,86 | 1,71 |

Observa-se nas Tabelas 3 e 4 um padrão nas amostras, estabelecendo a quantidade em que cada forma está presente nas amostras, permitindo estabelecer uma média para análise de 33,50% para a forma cúbica, 31,10% para a forma alongada, 16,10% para a forma lamelar e 19,30% para a forma alongada-lamelar.

2.4 Dosagem do concreto

Foi utilizado o método de dosagem do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) para a produção dos concretos e posterior avaliação dos traços (1:3,5; 1:5,0; e 1:6,5) de corpos de prova cilíndricos de 10 cm × 20 cm.

Foi definido, em laboratório, o teor de argamassa em alfa de 0,52 e, para a relação *a/c*, foi estabelecido o *slump test* de 100 ± 20 mm, com o objetivo de alcançar uma determinada trabalhabilidade, adequada e compatível com concretos bombeáveis. Na Tabela 5 é apresentada a dosagem dos concretos.

Tabela 5 ►
Quantidade de materiais
secos dos traços.
Fonte: dados da pesquisa

| Traço | Cimento | Areia grossa | Brita 1 | Cimento (kg/m ³) |
|-------|---------|--------------|---------|------------------------------|
| 1:3,5 | 1,00 | 1,34 | 2,16 | 471,7 |
| 1:5,0 | 1,00 | 2,12 | 2,88 | 365,8 |
| 1:6,5 | 1,00 | 2,90 | 3,60 | 289,3 |

2.5 Resistência à compressão

Para avaliar a resistência à compressão do concreto foram realizados ensaios de compressão, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), para determinação do desempenho do concreto aos 3, 7 e 28 dias de idade de corpos de prova cilíndricos 10 cm × 20 cm. Foi utilizado um capeamento superficial em enxofre, com o objetivo de regularizar a superfície do corpo de prova cilíndrico para rompimento na prensa.

A Figura 9 (página seguinte) ilustra o equipamento utilizado para o rompimento dos concretos do estudo.

Figura 9 ▶

Ensaio de resistência à compressão do concreto no laboratório de materiais.

Fonte: arquivo dos autores



3 Resultados experimentais

Para uma melhor investigação de parâmetros que interferem diretamente nas propriedades do concreto, foi realizada uma análise da forma do agregado graúdo britado.

3.1 Resultados das propriedades do agregado graúdo britado

Os ensaios para a caracterização da granulometria, massa específica, massa unitária e índice de forma do agregado, utilizados para o experimento, foram realizados no Laboratório de Materiais da Escola de Engenharia Civil da Universidade de Goiás. Os ensaios seguiram determinação da composição granulométrica e outros aspectos definidos nas normas NBR 7251, NM 248 e NM 53 (ABNT, 1982, 2003a, 2003b), conforme demonstram as Tabelas 6 e 7 e a Figura 10.

Tabela 6 ▶

Caracterização do agregado graúdo.

Fonte: dados da pesquisa

| Ensaio | Agregado graúdo | Norma |
|--|-----------------|----------------------|
| Módulo de finura | 7,48 | ABNT NBR NM 248:2003 |
| DMC (mm) | 25 | ABNT NBR NM 248:2003 |
| Massa unitária (kg/dm ³) | 1,37 | ABNT NBR 7251:1982 |
| Massa específica (kg/dm ³) | 2,67 | ABNT NBR NM 53:2003 |

Tabela 7 ▶

Ensaio granulométrico do agregado graúdo.

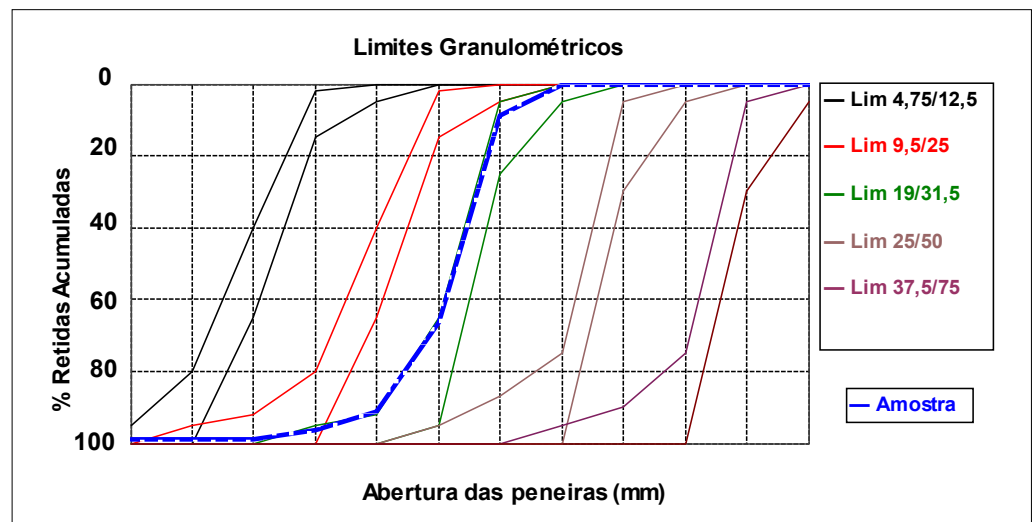
Fonte: dados da pesquisa

| Abertura | Ensaio | | | |
|----------|----------|--------------|-----------|-----|
| | Peneiras | Massa retida | % retidas | |
| | | | (mm) | (g) |
| 75 | | 0 | 0 | 0 |
| 63 | | 0 | 0 | 0 |
| 50 | | 0 | 0 | 0 |
| 37,5 | | 0 | 0 | 0 |
| 31,5 | | 0 | 0 | 0 |
| 25 | | 870 | 9 | 9 |
| 19 | | 5750 | 58 | 66 |
| 12,5 | | 2500 | 25 | 91 |
| 9,5 | | 500 | 5 | 96 |
| 6,3 | | 284 | 3 | 99 |
| 4,75 | | 0 | 0 | 99 |
| 2,36 | | 0 | 0 | 99 |
| Prato | | 96 | 1 | 100 |
| Totais | | 10000 | 100 | - |

Figura 10 ▶

Resultado granulométrico do agregado graúdo.

Fonte: dados da pesquisa



O agregado graúdo apresentou granulometria contínua, dentro dos limites aceitáveis para a produção do concreto e para a pesquisa, conforme especificações técnicas das normas NBR NM 248 (ABNT, 2003b) e NBR 7211 (ABNT, 2005).

3.2 Resultados das propriedades do concreto no estado fresco

Os ensaios do concreto fresco seguiram os padrões estabelecidos pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), com determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – *slump test*. Os resultados de abatimento do tronco de cone foram obtidos pela dosagem do concreto sem o uso de aditivo. Foi utilizada apenas água para a regulação da trabalhabilidade do concreto, até que se conduzisse o abatimento do tronco de cone em 100 ± 20 mm, como demonstram a Figura 11 e a Tabela 8.

Figura 11 ►

Abatimento do tronco de cone do *slump test* do concreto.
Fonte: arquivo dos autores



Tabela 8 ►

Relação *a/c* e *slump test* dos concretos.
Fonte: dados da pesquisa

| Traço | <i>a/c</i> | <i>Slump test</i> |
|-------|------------|-------------------|
| 1:3,5 | 0,44 | 110 mm |
| 1:5,0 | 0,60 | 110 mm |
| 1:6,5 | 0,75 | 110 mm |

3.3 Resultados da resistência à compressão

A Tabela 9 apresenta os resultados dos corpos de prova (CPs) cilíndricos de 10 cm x 20 cm rompidos aos 3, 7 e 28 dias de idade.

Tabela 9 ►

Resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias, em MPa.
Fonte: dados da pesquisa

| Traço | 3 dias | 7 dias | 28 dias |
|-------|--------|--------|---------|
| 1:3,5 | 26,8 | 27 | 31,8 |
| 1:5,0 | 16,8 | 17,7 | 20,5 |
| 1:6,5 | 10,1 | 10,6 | 12,6 |

4 Análise e discussão dos resultados

Para a análise dos resultados do concreto fresco e endurecido, foram consideradas as porcentagens com que cada forma do agregado gráúdo está presente nas amostras.

4.1 Caracterização da forma do agregado graúdo

Na Tabela 3 pode-se observar, a partir da caracterização da amostra 1, que quanto menor a dimensão do agregado, maior é sua irregularidade. Percebemos uma maior quantidade de partículas alongada-lamelar e uma menor porcentagem em massa em relação à forma cúbica.

Logo, para um agregado com granulometria entre 19 mm e 25 mm se enquadrar como um agregado de boa qualidade, com granulometria contínua e bem graduada, é necessária uma determinada quantidade de agregado, de ordem decrescente, para que se enquadre na curva granulométrica ideal.

A Tabela 10 apresenta os resultados da caracterização dos agregados com forma cúbica, forma alongada, forma lamelar e forma alongada-lamelar utilizados para a produção do concreto.

Tabela 10 ►
Caracterização do agregado graúdo conforme a forma do agregado.
Fonte: dados da pesquisa

| Ensaio | Cúbica | Alongada | Lamelar | Alongada-lamelar |
|--|--------|----------|---------|------------------|
| Módulo de finura | 7,58 | 7,44 | 7,33 | 7,1 |
| DMC (mm) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Massa unitária (kg/dm ³) | 1,413 | 1,367 | 1,358 | 1,279 |
| Massa específica (kg/dm ³) | 2,57 | 2,58 | 2,63 | 2,72 |
| Índice de forma | 1,52 | 2,1 | 2,71 | 6,07 |

Pode-se avaliar que o processo de britagem influencia significativamente nas propriedades físicas do agregado graúdo britado, tais como massa específica, massa unitária, módulo de finura e índice de forma. As Figuras 12 e 13 apresentam a porcentagem com que cada forma está presente em uma amostra de graúdo britado.

Figura 12 ►
Porcentagem de cada forma na amostra 1 (10 kg) do agregado graúdo.
Fonte: dados da pesquisa

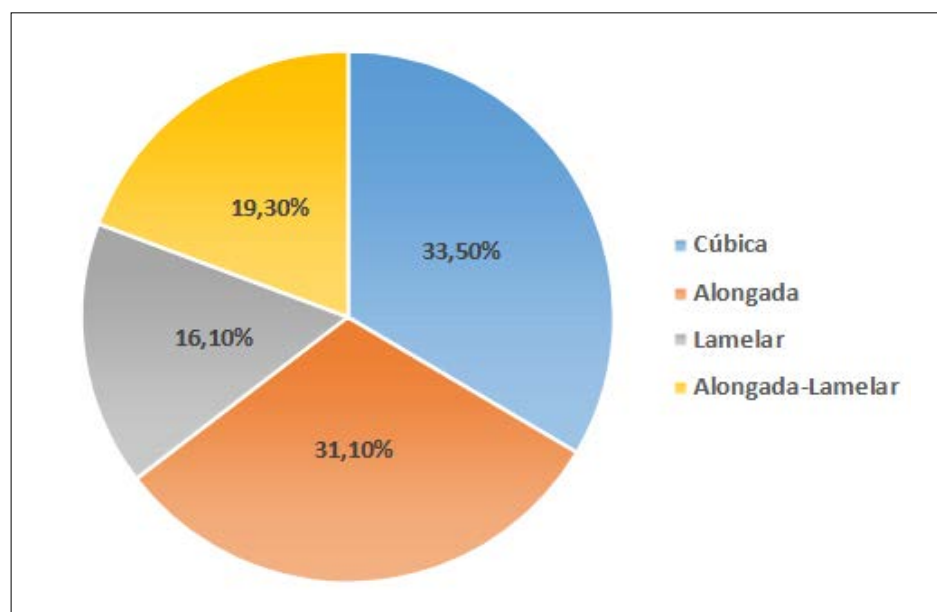
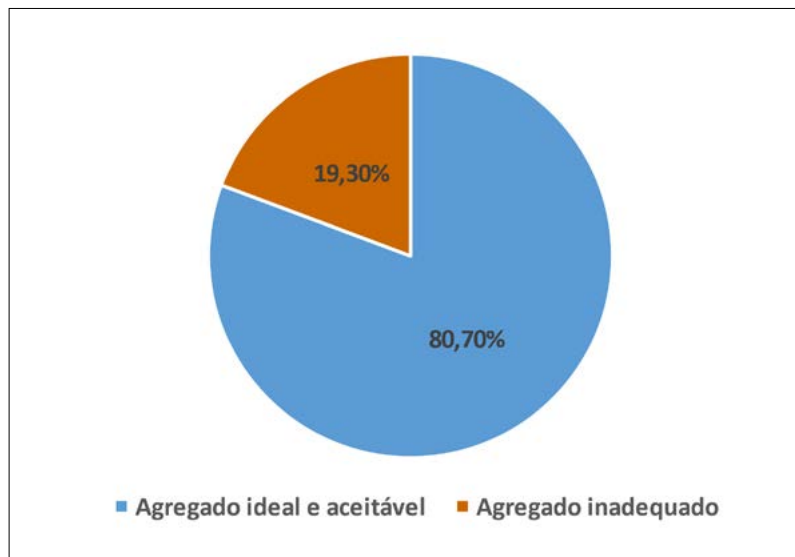


Figura 13 ►
Quantidade de agregados ideais, aceitáveis e inadequados presentes na amostra 1.
Fonte: dados da pesquisa

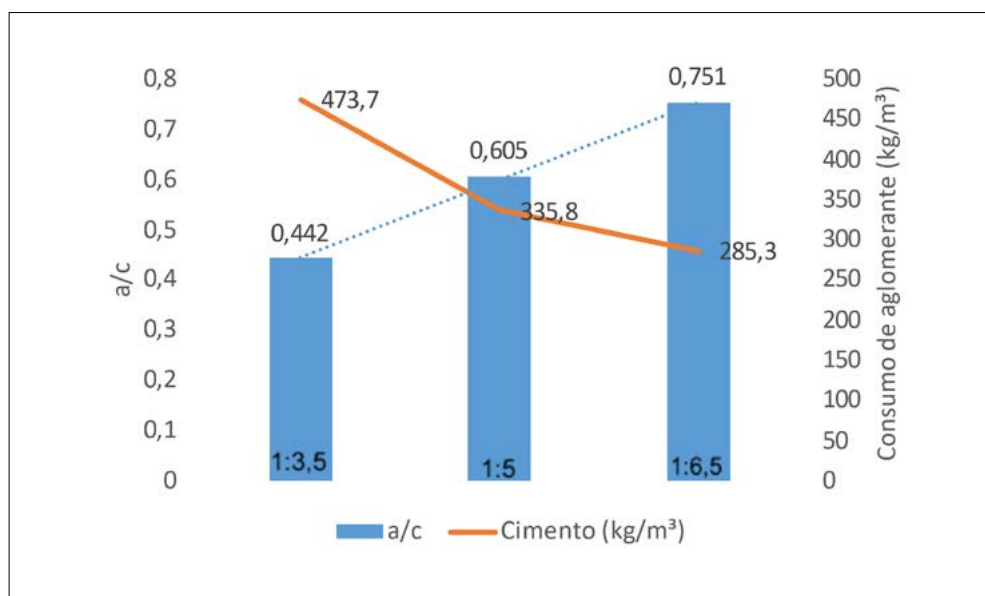


Para o processo de britagem estudado, composto por britador primário (britador de mandíbulas), britador secundário (britador de cone) e britador terciário (britador de cone), o agregado final utilizado para o estudo, com DMC 25 mm, apresenta um percentual de 80,7% de agregado graúdo ideal e aceitável (formas cúbicas, alongadas e lamelares) e 19,3% de agregado graúdo inadequado (forma alongada-lamelar).

4.2 Trabalhabilidade do concreto fresco

Na análise do concreto fresco, para o traço 1:3,5, com alto consumo de cimento, foi necessária uma menor quantidade de água para alcançar a trabalhabilidade desejada, em relação aos outros traços. No traço 1:5,0, com moderado consumo de cimento, foi necessário um acréscimo de 0,163 na relação *a/c*, para manter a mesma trabalhabilidade. Já para o traço 1:6,5, com baixo consumo de cimento, foi necessário um acréscimo de 0,329 na relação *a/c*, para manter a trabalhabilidade desejada, como demonstra a Figura 14.

Figura 14 ►
Comparativo entre consumo de água e aglomerante (kg/m^3).
Fonte: dados da pesquisa



Para manter a trabalhabilidade estabelecida para o experimento, o traço 1:5,0 teve um acréscimo de 36,87% na relação a/c e o traço 1:6,5, um acréscimo de 58,85% na relação a/c , em comparação com o traço 1:3,5.

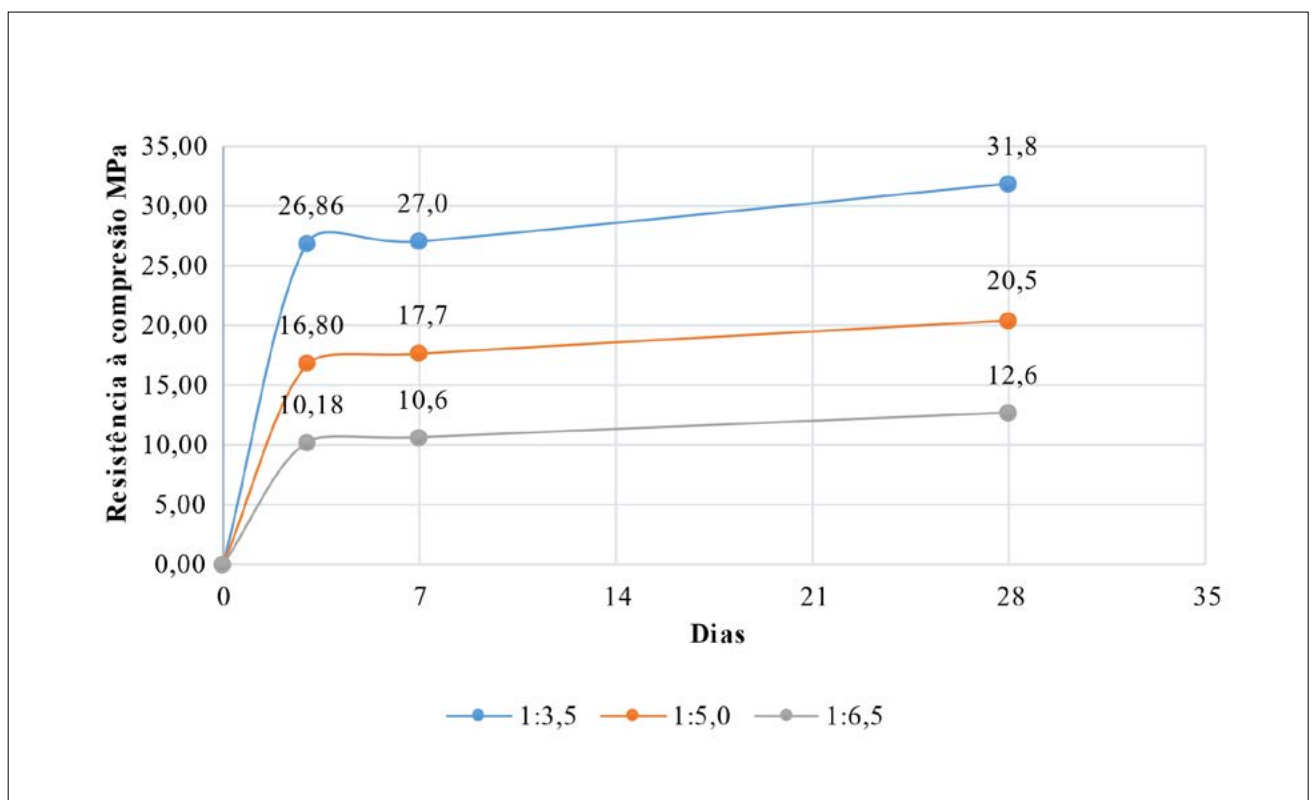
4.3 Resistência do concreto à compressão

Nos resultados do concreto endurecido, o traço 1:3,5 com alto consumo de cimento e o traço 1:5,0 com moderado consumo de cimento apresentaram resistência, aos 28 dias, acima do exigido para concreto estrutural $f_{ck} > 20$ MPa, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). Já no traço 1:6,5 com baixo consumo de cimento, a resistência ficou abaixo do esperado. A Figura 15 apresenta os resultados de resistência à compressão.

Figura 15 ▼

Resultado dos ensaios à compressão aos 3, 7 e 28 dias.

Fonte: dados da pesquisa



Os agregados ideais para concreto apresentam arestas vivas e maior aderência na zona de transição, elevando a resistência dos concretos. Os agregados inadequados para concreto provocam acúmulo de bolhas na estrutura do concreto, aumentando o índice de vazios, enfraquecendo, com isso, sua estrutura e seu desempenho (SILVA, 2012).

As Figuras 16, 17 e 18 (página seguinte) apresentam as curvas de dosagem do método IPT (lei de Abrams, lei de Lyse e lei de Molinari), para os traços 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5 rompidos aos 3, 7 e 28 dias.

Figura 16 ►

Curva de Abrams –
correlação do fator
água/cimento.

Fonte: dados da pesquisa

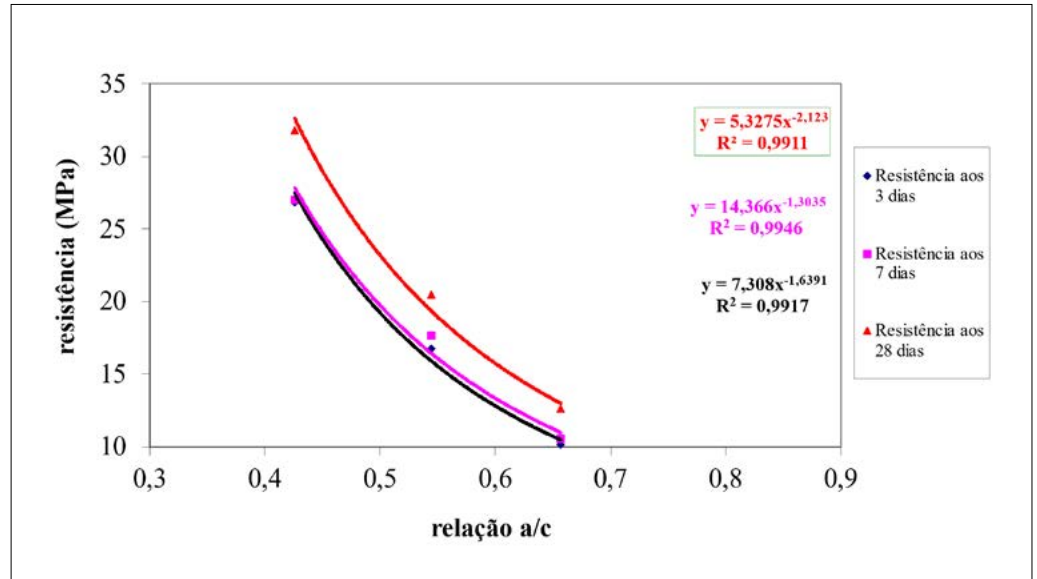


Figura 17 ►

Quantidade de agregados
versus relação a/c.

Fonte: dados da pesquisa

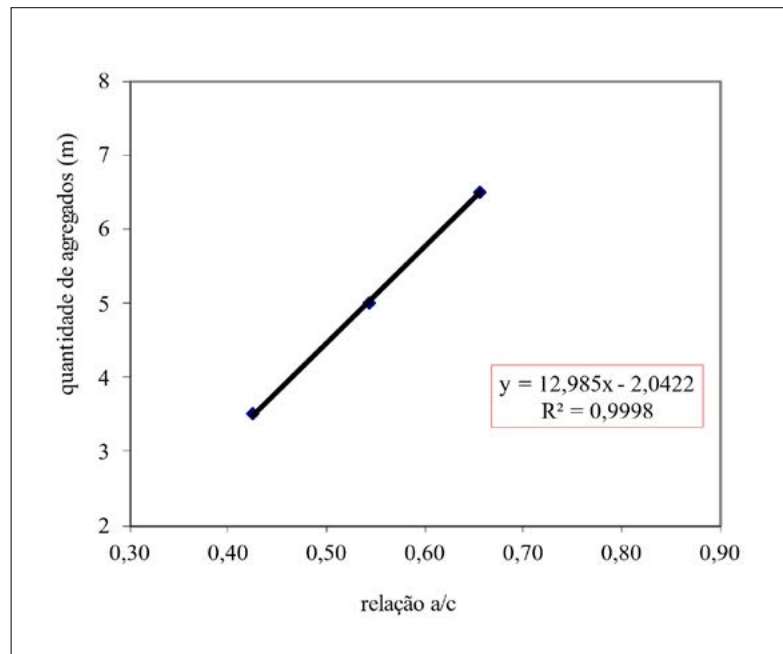
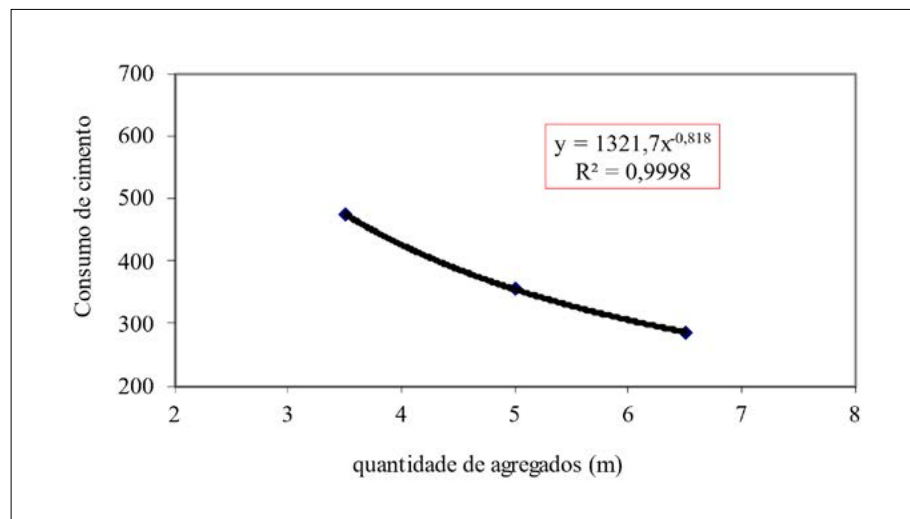


Figura 18 ►

Consumo de cimento versus
quantidade de agregados.

Fonte: dados da pesquisa



Em uma análise visual dos concretos rompidos aos 28 dias, o traço 1:3,5 apresentou poucos sinais de espaços vazios (poros ou microbolhas) em relação aos outros traços. Já o traço 1:6,5 apresentou grande incidência de poros e microbolhas visíveis. Essa alta porosidade do traço 1:6,5 é atribuída à alta relação *a/c* e ao efeito negativo dos agregados inadequados, que nos traços 1:3,5 e 1:5,0 foram minimizados pela alta quantidade de cimento.

Para o concreto com baixo consumo de cimento 1:6,5, a resistência ficou abaixo do aceitável para concretos estruturais $f_{ck} > 20$ MPa. Esse resultado pode ser atribuído à baixa quantidade de argamassa e ao efeito negativo dos 19,30% de agregados inadequados presentes no concreto (forma alongada-lamelar).

As determinações da razão entre a maior e a menor dimensão do agregado, em seus resultados experimentais, indicam que quando a maior parte dos agregados tiver uma razão menor do que 3:1, a forma do agregado terá pouca influência na qualidade do concreto.

O agregado graúdo utilizado para a produção do concreto apresenta uma porcentagem de 19,30% de agregado inadequado, o que ocasiona mau empacotamento dos agregados no interior do concreto. Sendo assim, torna-se necessário um maior consumo de cimento para atingir uma determinada resistência. Para os traços 1:3,5 com alto consumo de cimento e 1:5,0 com moderado consumo de cimento, em que há um menor índice de vazios, ocasionado pela alta quantidade de argamassa de cimento, obtiveram-se resistências de 31,8 MPa e 20,5 MPa aos 28 dias de idade, compatíveis com concretos estruturais $f_{ck} > 20$ MPa.

Segundo a análise de Silva, Melo e Geyer (2020), considera-se o agregado com forma cúbica como ideal, a forma alongada e a forma lamelar como aceitáveis e a forma alongada-lamelar como inadequada para produção de concreto. O Quadro 1 apresenta as formas para o agregado graúdo, como ideal, aceitável e inadequada para concreto.

Quadro 1 ►

Classificação da forma em ideal, aceitável e inadequada para concreto.

Fonte: adaptado de Silva (2012)

| Forma | Parâmetro |
|------------------|---------------------|
| Cúbica | Agregado ideal |
| Alongada | Agregado aceitável |
| Lamelar | |
| Alongada-lamelar | Agregado inadequado |

De acordo com a análise dos concretos, o agregado ideal, com forma cúbica, apresenta melhor desempenho na produção de concreto, comparado com a forma alongada-lamelar. Isso ocorre devido à forma do agregado e à boa granulometria, que permitem um bom empacotamento dos agregados graúdos e miúdos, eliminando os vazios na microestrutura do concreto e melhorando as propriedades do concreto fresco e endurecido.

5 Conclusão

Os agregados inadequados com forma alongada-lamelar produzem maiores índices de vazios, ocasionados pelo acúmulo de bolhas. Esses vazios permitem uma elasticidade do concreto, funcionando como concentradores de tensões, permitindo que o concreto trabalhe quando sujeito a esforços. Isso o torna mais frágil, rompendo a baixa resistência em concretos com pouca argamassa e, em concretos com alta relação de materiais secos, pode induzir um bom empacotamento das partículas do agregado.

A baixa resistência do concreto está intimamente ligada à resistência do agregado graúdo. As partículas com forma alongada-lamelar, quando submetidas à compressão, funcionam como vigas biapoiadas e rompem a baixa resistência. Esse comportamento deixa de ser linear um pouco antes da última carga, decorrente da microfissuração progressiva que ocorre inicialmente na interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento e, posteriormente, se dissemina em todo o concreto.

De acordo com os resultados da amostra, quando o índice de forma do agregado graúdo aumenta, eleva-se a massa específica e diminui a massa unitária. Esse resultado é atribuído ao processo de britagem que produz agregados mais planos (forma alongada-lamelar), em vez de formas cúbicas. A forma alongada-lamelar apresenta maior área de contato e maior área superficial, resultando em maior absorção de água, utilizada para hidratar o cimento, tornando o concreto mais frágil devido à alta porosidade da microestrutura do concreto e à esbeltez do agregado.

O agregado utilizado para o experimento apresentou um percentual de 19,30% de agregado inadequado com relação 6:1, que demonstrou ter influência negativa nas propriedades mecânicas do concreto.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for structural lightweight-aggregate concrete**: Reported by ACI Committee 213R-87. Farmington Hills, 1999.

AL-ROUSAN, T.; MASAD, E.; TUTUMLUER, E.; PAN, T. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 5, p. 978-990, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.03.005>.

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **British Standard BS 812-105.1**. Testing aggregates – Part 105: Methods for determination of particle shape – Section 105.1 Flakiness index. London, 1989. Disponível em: <http://saliergeotechnical.co.uk/BritishStandardsNEW/BSEN812/BS812-105.11989.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **British Standard BS 812-105.2**. Testing aggregates – Part 105: Methods for determination of particle shape – Section 105.2 Elongation index of coarse aggregate. London, 1990. Disponível em: <http://www.saliergeotechnical.co.uk/British%20Standards%20NEW/BS%20EN%20812/BS%20812-105.2%201990.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

ERDOĞAN, S. T.; FOWLER, D. W. **Determination of aggregate shape properties using x-ray tomographic methods and the effect of shape on concrete rheology**. Research Report ICAR 106-1. Austin: University of Texas, 2005. DOI: <https://doi.org/10.15781/T2SG01>.

ES – EUROPEAN STANDARDS. **DIN EN 933-3**: Tests for geometrical properties of aggregates – Part 3: Determination of particle shape – Flakiness index. Plzen, 1997.

ES – EUROPEAN STANDARDS. **DIN EN 933-4**: Tests for geometrical properties of aggregates – Part 4: Determination of particle shape – Shape index. Plzen, 1999.

FABRO, F.; GAVA, G. P.; GRIGOLI, H. B.; MENEGHETTI, L. C. Influence of fine aggregates particle shape in the concrete properties. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 2, p. 191-212, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952011000200004>.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M.; BEJA, I. A. Agregados para a construção civil. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2017. v. 1, p. 481-524.

FRAZÃO, E. B. Tecnologia para produção e utilização de agregados. *In*: TANÚS, M. B.; CARMO, J. C. (ed.). **Agregados para Construção Civil no Brasil**: contribuições para formação de Políticas Públicas. Belo Horizonte: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2007.

FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU, A. B. Materiais rochosos para construção. **Geologia de Engenharia**, São Paulo, v. único, p. 331- 342, 1998.

HONÓRIO, O. **Estudo de aumento de capacidade da planta de britagem da usina I de Germano – Samarco Mineração S.A.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Beneficiamento Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/87171242/Estudo-de-Aumento-de-Capacidade-Da-Planta-de-Britagem-Da-Usina-i-de-Germano-Samarco-Mineracao-Sa>. Acesso em: 15 mar. 2020.

KRUMBEIN, W. C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. **SEPM Journal of Sedimentary Research**, v. 11, n. 2, p. 64-72, 1941. DOI: <https://doi.org/10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008.

O'REILLY DÍAZ, V. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Pini, 1998.

PIOTROWSKA, E.; MALECOT, Y.; KE, Y. Experimental investigation of the effect of coarse aggregate shape and composition on concrete triaxial behavior. **Mechanics of Materials**, v. 79, p. 45-57, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2014.08.002>.

POWERS, M. C. A new roundness scale for sedimentary particles. **SEPM Journal of Sedimentary Research**, v. 23, n. 2, p. 117-119, 1953. DOI: <https://doi.org/10.1306/D4269567-2B26-11D7-8648000102C1865D>.

SILVA, D. A. **Estudo da influência do índice de forma do graúdo nas propriedades mecânicas do concreto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.34443.13608>.

SILVA, D. A.; MELO, C. E. L.; GEYER, A. L. B. Comparative study of ideal and inadequate coarse aggregate on the mechanical properties of concrete. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 7, n. 10, p. 176-189, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22161/ijaers.710.18>.

SILVA, D. A.; GEYER, L. B. Análise e classificação da forma do agregado graúdo britado para concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 5, n. 12, p. 18-28, 2018. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/agregado-graudo>. Acesso em: 14 abr. 2020.

UENO, A.; OGAWA, Y. Influence of coarse aggregate shape on optimum fine to total aggregate ratio using a virtual voids-ratio diagram in concrete compaction. **Cement and Concrete Composites**, v. 106, 103463, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103463>.

ZHOU, C.; FENG, D.; WU, X.; CAO, P.; FAN, X. Prediction of concrete coefficient of thermal expansion by effective self-consistent method considering coarse aggregate shape. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 12, 04018312, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002520](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002520).