2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais

Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

USO DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PARA TRAÇAR DIAGRAMA DE DOSAGEM DE CONCRETO COM AREIA DE BRITAGEM COMO ÚNICO AGREGADO MIÚDO[1]

CAMILLO, Vinicius C. (1); COSTA, Leonardo F. (2); SEIDEL, Denilson J. (3)

(1) IFSUL – Campus Passo fundo, Vinicius.camillo.1998@gmail.com
(2) IFSUL – Campus Passo fundo, leo.costa0109@hotmail.com
(3) IFSUL – Campus Passo fundo, denilson.seidel@passofundo.ifsul.edu.br

RESUMO

O presente trabalho visa determinar um traço de concreto convencional com o uso de 100% de areia de britagem como agregado miúdo, de forma que seja viável para a aplicação na indústria da construção civil. A areia de britagem causa um problema ambiental e de logística para as empresas de mineração, pois uma parcela considerável do material que entra no britador não pode ser usada como agregado graúdo. Já se constatou, por pesquisas anteriores, que esse material pode aumentar a resistência inicial à compressão do concreto, desde que possua uma boa distribuição granulométrica. Contudo, por apresentar uma textura dos grãos muito áspera, as composições com este material tendem a necessitar de uma maior percentagem de pasta, encarecendo o produto final. Para encontrar a melhor distribuição granulométrica, utilizou-se do método de dosagem de TUTIKIAN E DAL MOLIN (2008), pois o mesmo realiza o empacotamento dos agregados, buscando assim reduzir a quantidade de pasta necessária para a estabilidade e trabalhabilidade do concreto. Ao final, foi possível dosar o referido concreto pelo método proposto, gerando concretos trabalháveis, assim como conseguiu-se utilizar Método dos Mínimos Quadrados para traçar o diagrama de dosagem bem como estabelecer as suas correlações lineares.

Palavras-chave: *Areia de britagem, Agregado miúdo, Concreto convencional, OCTAVE*

ABSTRACT

The goal of this article is to determine a trace of the conventional cement with the usage of 100% crushing sand as small aggregate, making it viable to apply in the building industry. The crushing sand causes an environmental and logistics problem to the mining companies, because 45% of the material that enters the crusher can't be used as coarse aggregate. It's already stated, by previous researches, that this material can raise the initial compression resistance of concrete, provided that it has a good granulometric distribution. Although, for having a rougher grain texture, the compositions with this material tend to need a higher percentage of paste, increasing the expenses of the final product. To find the best granulometric distribution, the TUTIKIAN E DAL MOLIN (2008) dosage method was used, for it permorms the aggregate packing, aiming to reduce the paste quantity necessary for the concrete's stability and workability. Ultimately, it was possible to dose such concrete by the provided method, resulting in workable concretes, as well as it was possible to use the

[1]AUTORES. Uso do método dos mínimos quadrados para traçar diagrama de dosagem de concreto com areia de britagem como único agregado miúdo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

minumum squares method to define the dosage diagram, as well as estabilishing it's linear correlations.

Keywords: *Crushing waste, Fine Aggregate, Conventional concrete, OCTAVE.*

1 INTRODUÇÃO

Devido ao esgotamento das jazidas para exploração de areia natural próximas aos centros consumidores e às restrições legais impostas pelos órgãos competentes, o uso da mesma torna-se mais caro, devido a maior distância a ser percorrida entre as jazidas e os centros consumidores. O Código Florestal Brasileiro (Lei 4.771/65) considera as margens dos rios ou cursos d'água como áreas de preservação permanentes, e como a exploração da areia natural ocorre principalmente nestas áreas, acaba por torná-la mais escassa e cara, pois licenças para exploração têm sido suspensas. (ALMEIDA E SILVA, 2005).

Em paralelo a isso, nas empresas mineradoras de rocha basáltica, existe uma grande produção de resíduos, aonde boa parte do material que entra em um britador não consegue ser aproveitado. Ainda, este excesso acaba criando um problema de logística e ambiental de grande importância para as pedreiras, devido ao acúmulo destes materiais nos pátios das mesmas (CHAVES, 2005).

Agregados reutilizados como a areia de britagem possuem características peculiares, que não devem ter sua influência desconsiderada no processo de dosagem e produção de concreto. No caso da areia de britagem, a principal mudança está no estado fresco do concreto, pois devido ao seu processo de produção esse material possui uma maior concentração de componentes menores de 75µm e formas mais ásperas e lamelares (ALMEIDA, 2005 *apud* KLEIN, 2008).

Os fatores acima citados contribuem para a redução da plasticidade do concreto, exigindo assim um maior tempo de vibração, uma relação água/cimento maior e consequentemente num maior consumo do componente mais caro do concreto, o cimento (CHAVES, 2005). Dessa forma, a viabilidade econômica da utilização da areia de britagem tem relação direta com um método de dosagem eficaz, que ainda não existe nas bibliografias clássicas para esse material.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Como método de dosagem, foi utilizado o proposto por Tutikian e Dal Molin (2008), porém com a parcela que se refere ao concreto convencional, ou seja, antes da inserção de aditivos que o torne autoadensável.

Os componentes aceitos para esse método são cimento, agregados miúdo e graúdo e água, sendo estes os utilizados para esse estudo. Apesar de o método aceitar acréscimos de material fino e aditivos, estes serão desconsiderados.

O método também pede a priorização de agregados arredondados e com o menor diâmetro máximo (Dmáx) possível, para maximização do empacotamento. Contudo, a utilização de um rejeito de britagem como agregado inviabiliza essa seleção rigorosa de materiais finos.

Com o objetivo de determinar a proporção entre os materiais que compõem o concreto (sem contar o cimento) que possuam a menor quantidade de vazios, nesta etapa do processo empacota-se todos os componentes pré-definidos na etapa anterior, dois a dois e em ordem decrescente de diâmetro das partículas, até que

todos tenham sido empacotados. Para este ensaio, seguiu-se a norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), que também atende às exigências do método.

A determinação da relação água/cimento realizada no presente artigo teve por base as Tabelas 6.1, 7.1 e 7.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Contudo, alerta-se que o valor encontrado será apenas uma aproximação para a relação água cimento final, principalmente com o uso de agregados como a areia de britagem que tendem naturalmente a aumentar o consumo de água.

3 METODOLOGIA

3.1 Dosagem do concreto

O primeiro passo para a realização deste trabalho foi a seleção dos materiais para a composição do concreto: Brita 1, Areia de britagem, Cimento CP-V-ARI e água, sendo suas respectivas características físicas obtidas através as normas vigentes.

A determinação da composição granulométrica foi realizada com peneiras e agitador mecânico a partir das normas NBR NM 248 (ABNT, 2001) e NM ISSO 3310. Para a determinação da massa unitária e do volume de vazios, foi realizado o ensaio normatizado pela NM 45 – Método A (ABNT, 2006), empregado para determinar a massa unitária do material compactado. Já para a determinação da massa específica, foi utilizado o método de Chapman para a areia de britagem, normatizado pela NBR NM 52 (ABNT, 2009), e os ensaios de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2006) para a Brita 1.

Com os materiais já selecionados iniciou-se a determinação do esqueleto granular, o qual foi realizado o empacotamento da brita 1 e da areia de britagem, variando a porcentagem de areia de britagem de 10 em 10%, determinando a massa unitária para cada mistura, calculando a massa específica e o volume de vazios, selecionando ao final a proporção que obteve o menor índice de vazios. Na determinação da relação água/cimento foi considerada a Tabela 6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) com a classe de agressividade 2. Na Tabela 7.1 desta mesma norma, obtém-se o valor para a relação água/cimento como sendo de menor ou igual a 0,6.

Com os resultados dos ensaios de empacotamento, foram calculados os traços e moldados oito corpos de prova para cada traço, sendo dois para cada rompimento programado, totalizando vinte e quatro corpos de prova. Para o cálculo dos traços foram consideradas as relações agregado/cimento (m) de 3, 5 e 7.

Após a cura dos corpos de prova, estes foram rompidos a compressão simples e os resultados utilizados no programa desenvolvido para determinar as equações das leis que representam o comportamento do concreto e seus respectivos gráficos.

3.2 Desenvolvimento dos diagramas de dosagem a partir do Método dos Mínimos Quadrados

A última etapa desta pesquisa foi traçar os diagramas de dosagem do concreto produzido através do ajuste de curvas, possível pelo método dos mínimos quadrados, sendo para isso realizado a linearização das equações das leis clássicas da tecnologia do concreto (Lei de Abrams, Lyse, Molinari e percentagem de argamassa) e desenvolvendo linhas de comando no software OCTAVE.

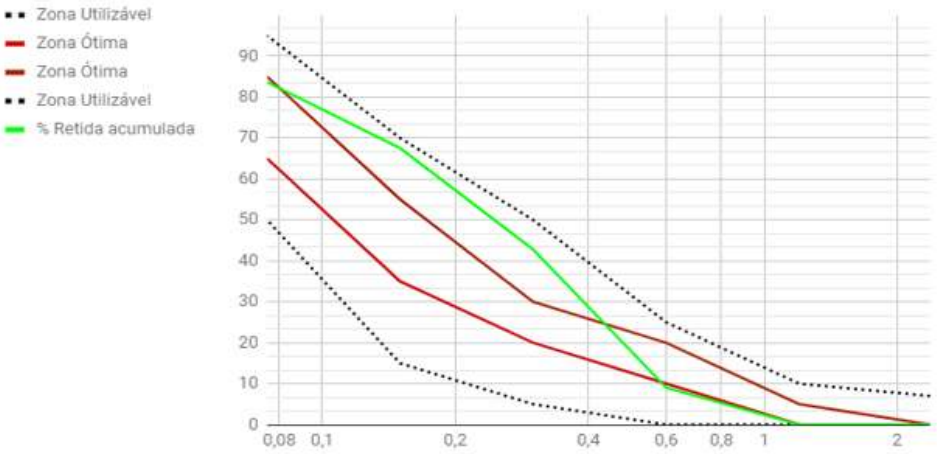
O objetivo foi de se obter um programa capaz de plotar os gráficos das equações

obtidas pelo mesmo, de maneira que possam ser salvos e utilizados em outros programas como imagem e determinar as características necessárias para a dosagem de um concreto com uma resistência dentro das residências mínima e máxima, através da resistência fornecida pelo usuário, em MPa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado da distribuição granulométrica do agregado miúdo está registrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Os valores estão expressos em porcentagens retidas e retida acumulada. O módulo de finura da areia de britagem utilizada é 2,98 e a dimensão máxima característica é 4,75mm.

Figura 1 - Gráfico da granulometria da areia de britagem



Fonte: Os autores

O resultado do ensaio da massa específica, massa unitária e volume de vazios foram realizados como descrito anteriormente, obtendo-se um resultado de ME=2604,17 Kg/m^3, MU=1675,03 Kg/m^3 e Vazios = 35,68%.

Pode-se verificar que, como previsto, a areia de britagem não possui uma granulometria ótima segundo a norma NBR 7211 (2005) devido à falta de partículas de dimensões entre 0,1 e 0,4 mm, mas ainda se encaixa na zona utilizável.

O módulo de finura da brita 1 utilizada é 7,77 e a dimensão máxima característica é 19mm. O resultado do ensaio da massa específica, massa unitária e volume de vazios foram realizados como descrito anteriormente, obtendo-se um resultado de ME=2604,17 Kg/m^3, MU=1675,03 Kg/m^3 e vazios = 35,68%.

4.1 Dosagem

Com os materiais já devidamente selecionados, realizou-se os ensaios de compactação entre a areia de britagem e a brita 1, obtendo-se a relação de menor volume de vazios de 40% de brita 1 e 60% de areia de britagem, sendo essa a selecionada para ser utilizada nas demais etapas de dosagem (Tabela 1).

Com os resultados dos ensaios de compactação obtidos e a relação água/cimento pré-determinada em 0,6, foram calculados os traços unitários descritos na Tabela 2 e a massa específica, o consumo de materiais e trabalhabilidade obtida na Tabela 3.

Tabela 1 – Ensaio de compactação e determinação do volume de vazios das composições de brita e areia

% Brita 19mm	% Areia de Britagem	Munit. Mistura	Mesp. Mistura	Vazios (%)
80	20	1554,31	2529,97	38,56
70	30	1701,44	2539,24	32,99
60	40	1829,71	2548,52	28,20
50	50	1931,56	2557,79	24,48
40	**60**	**1950,43**	**2567,07**	**24,02**
30	70	1935,34	2576,34	24,88

Fonte: Os autores

Os resultados insatisfatórios da relação água/cimento devem-se ao teor de finos e a irregularidade da areia industrial serem naturalmente maiores quando comparados a areia natural, devido ao seu processo de produção (NEVILLE E BROOKS, 2013). Lodi (2006) obteve relações água/cimento melhores com o uso de plastificantes e dosando o concreto pelo método IPT/EPUSP.

Tabela 2 – Traços unitários

Família	Traço			Água/cimento	H	α
	Cimento	Areia	Brita			
3	1	1,8	1,2	0,626	15,65%	70%
5	1	3	2	0,716	11,93%	66,67%
7	1	4,2	2,8	0,966	12,08%	65,00%

Fonte: Os autores

Tabela 3 – Massa específica, consumo de materiais e trabalhabilidade das famílias

Família	Massa específica (Kg/m³)	Cimento (Kg/m³)	Areia de Britagem (Kg/m³)	Brita 19mm (Kg/m³)	Água (Kg/m³)	Slump Test (mm)
3	2248,1	485,97	874,75	583,16	304,22	70
5	2260,25	336,55	1009,64	673,1	240,97	65
7	2242,49	250,11	1050,47	700,31	241,61	75

Fonte: Os autores

Para esse estudo foi analisado a resistência à compressão axial e, como esperado, os concretos com relação agregado/cimento mais alta geraram concretos com menor resistência quando comparados a concretos com uma relação menor a uma mesma idade, como pode ser visto claramente na Tabela 4.

Tabela 4 - Ensaios de compressão

Relação água/cimento	Rico	Intermediário	Pobre
Idade de ruptura		**Tensão (MPa)**	
24 horas	12,74	9,18	2,97
	Danificado	9,8	3,03
3 dias	23,91	17,28	7,35
	26,95	17,58	6,61
7 dias	34,86	22,35	10,05
	35,7	23,12	10,14
28 dias	46,85	32,31	17,23
	46,17	31,96	18,48

Fonte: Os autores

Como era esperado, o traço pobre ficou 2,53 e 1,74 vezes menos resistente que o rico e o intermediário aos 28 dias, respectivamente, 3,52 e 2,28 vezes aos 7 dias, 3,66 e 2,39 aos 3 dias e 4,02 e 3,23 vezes nas primeiras 24h.

Não foram encontrados na bibliografia trabalhos utilizando esta mesma metodologia de dosagem para concretos convencionais com resíduos. Contudo, quando comparado com o trabalho de Viero (2010) e fazendo as devidas ponderações (autor utiliza relação agregados/cimento de 3,5, 5 e 6,5) os resultados mostram-se coerentes.

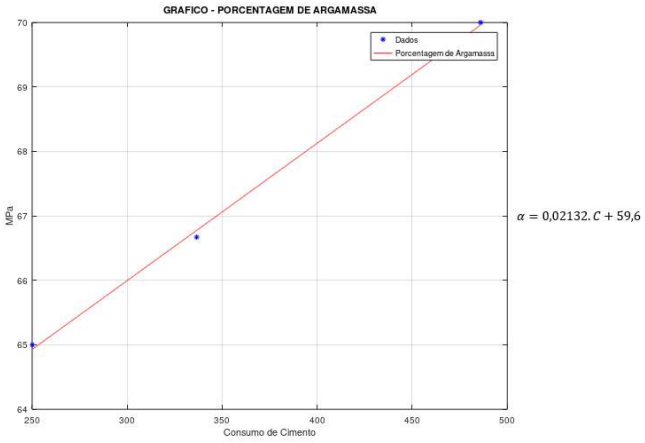
4.2 Analise de resultados com o Método dos Mínimos Quadrados

Através da linguagem do programa OCTAVE, foram desenvolvidas as linhas de comando que ajustaram as equações para os resultados obtidos através do Método dos Mínimos Quadrados. A utilização deste método aconteceu a partir do sistema de linearização das equações das leis clássicas da tecnologia do concreto, na qual a partir de determinado grupo de dados e a equação, é possível gerar um gráfico que representa ambos com o menor erro possível.

Os resultados apresentados pelo programa em forma de gráficos foram confrontados com os apresentados por Tutikian e Dal Molin (2008) para validação do mesmo e posteriormente gerados as equações e os gráficos com os dados obtidos.

Os Coeficientes de determinação indicaram uma ligação muito forte ou forte (acima de 95% de correlação) entre a maior parte das equações encontradas pelo programa. Para a determinação de porcentagem de argamassa, o resultado foi de 99,87% de correlação (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e para a Lei de Molinari de 99,89% (Figura 2).

Figura 1 - Gráfico da porcentagem de argamassa seca

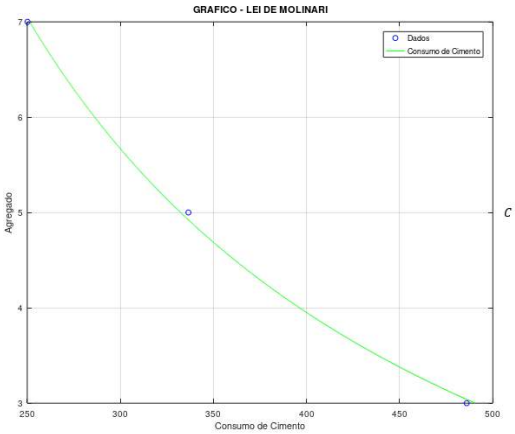


Fonte: Os autores

Para a Lei de Abrans, os coeficientes de determinação obtidos foram de 99,26% para vinte e quatro horas, de 99,51% para os três dias, de 99,22% para os sete dias e de 97,78% para os vinte e oito dias (Figura 3). O único gráfico que não apresentou uma correlação muito forte ou forte (acima de 95%) foi o gerado a partir da equação da Lei de Lyse, cujo resultado foi de 93,13% de correlação (Figura 4).

O método dos mínimos quadrados apresenta-se coerente e confiável, como pode ser visto nos coeficientes de determinação das equações 1 a 7, permitindo seu uso para obter equações determinar traços de concreto de forma prática.

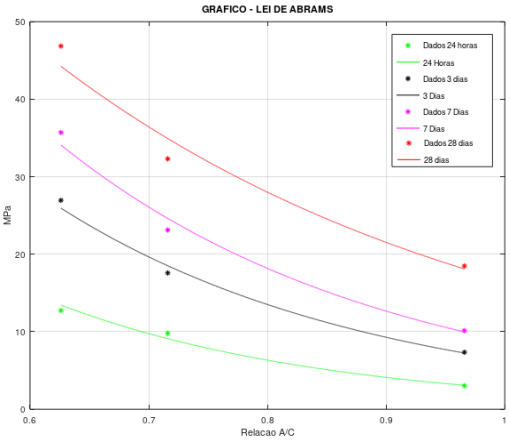
Figura 2 - Gráfico da Lei de Molinari



$$C = \frac{1000}{(0{,}58348 + 0{,}48512.m)}$$

Fonte: Os autores

Figura 3 - Gráfico da Lei de Abrams



$$\sigma(28dias) = \frac{229{,}315}{13{,}851^{a/c}}$$

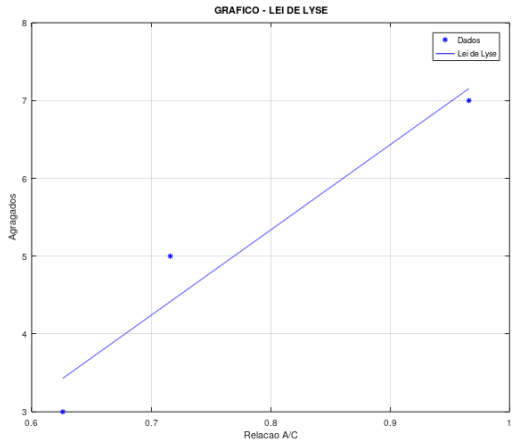
$$\sigma(3dias) = \frac{271{,}338}{42{,}515^{a/c}}$$

$$\sigma(7dias) = \frac{327{,}622}{37{,}148^{a/c}}$$

$$\sigma(24horas) = \frac{201{,}574}{75{,}588^{a/c}}$$

Fonte: Os autores

Figura 4 - Gráfico da Lei de Lyse



$$m = 10{,}956.\frac{a}{c} - 3{,}429$$

Fonte: Os autores

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo demonstrou um grande e pouco explorado vínculo entre a matemática em prol do estudo de materiais na engenharia civil, visto que uma série de grupos de dados podem ser compilados e analisados de forma mais intuitiva com a utilização dos softwares de modelagem matemática adequados.

Ao contrário do esperado de acordo com a bibliografia, obteve-se concretos trabalháveis na faixa dos 75-65mm no abatimento do tronco de cone. Isto pode indicar que fatores externos não analisados aqui possam ter influência direta na trabalhabilidade do compósito, de forma a passarem despercebidos devido aos parâmetros analisados. Contudo, esse assunto exige maiores análises em posteriores pesquisas com os materiais em questão, não sendo suficientes as nesse apresentadas.

Este estudo também mostra que concretos com 100% do agregado miúdo sendo areia de britagem podem não atender às exigências das NBR 6118 ao que se refere a relação água/cimento, graças as complicações causadas pela própria granulometria do material e a forte relação do índice de vazios com alguns fatores dispostos nessa norma.

Por fim, as relações água/cimento ficaram fora dos limites exigidos pela NBR 6118, de forma que a otimização deste tipo de concreto com substituição total de agregado miúdo por areia de britagem necessita de estudos posteriores, para que sua implementação e popularização possa acontecer.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248**: *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45**: *Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52**: *Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: *Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 6118**: *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: *Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro, 2005.

Almeida, S.L.M. e Silva, V.S. *Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados*, Anais do II SUFFIB – SEMINÁRIO: O uso da fração fina da britagem, São Paulo (2005).

Chaves, A.P. *Estado da arte da produção de areia de britagem*, Anais do II SUFFIB – SEMINÁRIO: O uso da fração fina da britagem, São Paulo (2005).

Klein, N.S. *Influência da substituição da arreia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto adensável.* Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Londrina (2008)

Neville, A.M. e Brooks, J.J. *Tecnologia do Concreto*, 2ª edição, Porto Alegre (2013).

Tutikian, B.F. *Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto adensáveis*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2008).

Viero, E.H. *Aplicação de areia de britagem de rochas basálticas na fabricação de concreto de cimento Portland.* Dissertação de mestrado, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul (2010).

Lodi, V.H. *Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó-SC*. Dissertação de mestrado, Universidade de Santa Clara, Florianópolis (2006).