

36 **INFLUENCE OF THE PARTICLES PACKING IN THE PHYSICAL AND MECHANICAL**
37 **PROPERTIES OF THE CONCRETE**
38

39 **ABSTRACT:** The construction market is constantly developing and the quest for materials with
40 high mechanical performance, durability and sustainability grows every day. In this scenario, a
41 proposal known as concrete packing appears. The technique consists in using mixtures with more
42 continuous granulometry for the production of the concrete in order to obtain a material with more
43 dense matrices, that is, with a lower void index and thus higher mechanical properties without
44 adding cement, highly polluting component. The research aims to investigate the influence of this
45 new dosing model on the physical and mechanical properties of the concrete through the
46 formulation of different mixtures of aggregates and the standardization of production modes and
47 water/cement ratio of the new concretes. The statistical program *Minitab18* was used for the
48 formulation of the mixtures and for the statistical analysis of the results. Tests were performed on
49 components and pastes to analyze characteristics such as: compressive strength, absorption and
50 workability. Among the ten manufactured traces, all procedures were standardized, differentiating
51 only the proportions of the aggregates generated by the program. In the final analysis performed
52 with the aid of the program it was possible to identify an increase in compressive strength, a
53 decrease in void index and workability in the mixtures that presented a higher sand content. This
54 behavior was presented both in the test specimens subjected to moist cure and in those exposed to
55 air. It was evidenced larger results of compressive strength in concretes subjected to moist cure
56 when compared to those subjected to dry cure.

57 **KEYWORDS:** aggregates, granulometry, void index, minitab.
58

59 **1 INTRODUÇÃO**

60 Pesquisas na área de engenharia de microestrutura dos materiais ganham cada vez mais
61 espaço perante a necessidade de construções com um melhor desempenho mecânico e durabilidade.
62 Considerando a construção civil um ramo importante na economia mundial e de grande impacto
63 ambiental, também são crescentes os estudos que buscam alinhar o seu desenvolvimento com a
64 sustentabilidade.

65 Todos os processos envolvidos na extração das matérias primas, fabricação, operação,
66 manutenção, transporte e energia dispendidas durante a obra, bem como, na disposição final dos
67 resíduos, corroboram para o lançamento e difusão de compostos químicos na atmosfera
68 (SANQUETTA, 2013). Diante do exposto, é imprescindível encontrar maneiras de alinhar as
69 necessidades da construção civil com medidas sustentáveis.

70 Nesse cenário, uma proposta que visa aprimorar as propriedades mecânicas e físicas do
71 concreto através de uma melhor distribuição granulométrica, sem que haja um acréscimo do uso de
72 cimento, é conhecida como empacotamento do concreto. Essa técnica consiste em otimizar as
73 misturas granulares de modo a produzir um material com menor índice de vazios e assim uma maior
74 resistência à compressão.

75 Segundo Daminieli, Pileggi e John (2017), essas mudanças na formulação tornam a pasta mais
76 eficiente e podem ajudar na redução do consumo de cimento caso possibilite a produção de
77 materiais com o mesmo desempenho. Os autores ainda relatam sobre a influência do
78 empacotamento na trabalhabilidade do concreto. De acordo com os referidos autores, quanto menor
79 a quantidade de vazios na mistura, menor será a quantidade de água necessária para fazer o sistema
80 fluir.

81 Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi analisar a influência do empacotamento dos
82 agregados nas propriedades físicas e mecânicas do concreto quando submetidos a cura úmida e a
83 cura ao ar.

84

85 **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

86 Por meio da análise dos agregados do concreto e sua dispersão na composição da mistura é
87 possível encontrar a influência entre o empacotamento das partículas e as propriedades do concreto.
88 Dessa forma, diversos estudos têm sido realizados a fim de verificar esta tendência e utilizá-la de
89 modo a melhorar as características físicas e mecânicas do material.

90

91 **2.1 IMPACTO DO USO DO CIMENTO NA SAÚDE E NO MEIO AMBIENTE**

92 A preocupação mundial com a preservação do meio ambiente tem bastante relevância para
93 todas as indústrias, inclusive a construção civil. Dentre os danos causados pelo setor, o cimento,
94 aglomerante fundamental para produção do concreto, é um agente agravante.

95 As emissões atmosféricas produzidas pela produção de cimento e pela coqueificação geram
96 diversos efeitos adversos para a saúde humana e o meio ambiente. Estes impactos não estão
97 apenas relacionados ao material particulado (que pode ser inalado e ingerido pela
98 população), mas também a outros poluentes que exigem controle mais sofisticado, como
99 amônia e cloro (substâncias irritantes), além de óxidos de nitrogênio e enxofre (que
100 contribuem para produção de chuva ácida). Apesar da existência de sistemas de controle
101 ambiental nas chaminés dos fornos, existem ainda incertezas quanto à sua capacidade de
102 evitar a emissão de alguns poluentes, uma vez que os fornos de cimento e seus sistemas de
103 controle são desenhados para a produção de cimento e não para a queima de resíduos
104 perigosos. (MILANEZ, FERNADES, PORTO, 2009, p. 3)

105 Em todas as etapas do processo de produção do cimento é evidenciada uma série de impactos
106 ambientais e na saúde humana. No Anexo A, figura adaptada de Maury (2007), percebe-se, de
107 forma resumida, essas perturbações durante cada etapa do processo de fabricação.

108 Apesar de um certo sucesso demonstrado por algumas técnicas alternativas, a emissão de CO_2
109 e os impactos referentes à produção de concreto continuaram crescendo com o passar dos anos. As
110 estratégias de mitigação não têm sido capazes de suprir a demanda mundial por cimento
111 (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017). Surge então uma alternativa conhecida como
112 empacotamento das partículas, e essa busca aprimorar as propriedades do concreto com um menor
113 teor de cimento através de uma melhor distribuição granulométrica e dispersão das partículas.
114 Assim, além do ganho nas características do material pode proporcionar uma redução do uso de
115 cimento, conciliando o desenvolvimento com a sustentabilidade almejada.

116

117 **2.2 INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO**

118 O empacotamento de partículas pode ser definido como o preenchimento dos vazios de uma
119 mistura, onde os agregados menores preenchem os vazios deixados pelos maiores (MONSON et al.,
120 2016). De acordo com Bauer (2008), o índice de vazios, a porosidade e a compactação dos
121 agregados são características que estão interligadas e que têm grande importância no preparo do
122 concreto. Com o aumento da compactação dos agregados, observa-se uma redução do índice de
123 vazios e aumento da resistência a compressão e durabilidade do material. Alvarenga (2016) defende
124 que a porosidade do concreto está diretamente relacionada com suas características mecânicas.

125 Segundo Castro e Pandolfelli (2009), Féret, em 1892, publicou o primeiro trabalho sobre o
126 empacotamento do concreto, em que relacionava a porosidade do material e a resistência à
127 compressão com a seleção adequada dos agregados. Londero et al. (2017) também relata que desde
128 o início do século XX, são realizadas pesquisas sobre o efeito da distribuição granulométrica dos
129 agregados no empacotamento das partículas. Ambos autores descrevem a importância do termo
130 para a construção civil e como influência de forma direta nas características do material.

131 Cresce, a cada dia, as pesquisas no setor que buscam por concretos de alta resistência e de alto
132 desempenho mecânico obtidos a partir da engenharia de microestrutura. Esses novos materiais
133 oferecem aos projetistas e arquitetos uma gama a mais de possibilidades relacionadas a construções
134 esbeltas e modernas que conciliem estética, segurança e usabilidade. Nesse âmbito da engenharia, o
135 empacotamento das partículas é visto como ponto promissor e tem sido alvo crescente nos estudos
136 de diversos pesquisadores.

137 O estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta
138 seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os
139 vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente
140 preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente. (CASTRO, 2009, p.25)

141 Segundo Daminieli, Pileggi e John (2017) o uso de frações de partículas de diferentes
142 tamanhos pode gerar uma redução significativa de vazios no sistema. Ou seja, a obtenção de um
143 esqueleto granular compacto, com máxima densidade de empacotamento, acarreta na diminuição do

144 índice de vazios e gera uma maior massa específica para o concreto, contribuindo com o aumento
145 da sua resistência e durabilidade. De acordo com Castro e Pandolfelli (2009, p.25) “o conceito de
146 uma alta densidade de empacotamento foi recentemente redescoberto como um parâmetro chave
147 para a obtenção de materiais cimentícios de ultra-alto desempenho.”

148 Outro ponto positivo da proposta remete ao consumo de água na mistura que decresce.
149 Damineli, Pileggi e John (2017, p. 1012), relatam que “quanto menor o volume de vazios entre as
150 partículas, menor o volume de água necessário para afastar o sistema e o fazer fluir”. Ou seja,
151 favorece a trabalhabilidade do produto, fator importante para um bom desempenho da estrutura e
152 alta produtividade dos operários durante seu uso. Além do ganho na trabalhabilidade, os autores
153 também consideram a influência da relação água/cimento (a/c) na resistência do concreto. Abordam
154 que, com a redução da quantidade de água e a manutenção o teor de cimento, observa-se uma
155 redução da a/c e, portanto, ganho na resistência.

156 Segundo Castro e Pandolfelli (2009), diversos são os fatores que podem alterar o
157 empacotamento de um determinado conjunto de partículas. O primeiro item citado pelos
158 pesquisadores foi a diversidade de distribuições granulométricas, pois alteram a condição de
159 dispersão inicial da mistura. Outro fator diz respeito a morfologia das partículas, quanto menos
160 esféricas forem, menor será a densidade de empacotamento do conjunto, pois o contato de
161 superfícies irregulares gera atrito entre as partículas e impedem seu deslocamento. A presença de
162 elementos com formas esféricas, além de favorecer o empacotamento, beneficia também a
163 trabalhabilidade da pasta, que passa a ser maior. A porosidade interna dos elementos também
164 modifica a densidade do conjunto, podendo ser classificadas como totalmente densas, com
165 porosidade interna fechada ou aberta. Além dos fatores relacionados às características dos
166 componentes, a forma como são colocados em suas posições de equilíbrio também influencia no
167 adensamento do sistema.

168 Londero et al. (2017) apresentam diversos estudiosos que desenvolveram equações para
169 expressar a distribuição granulométrica ideal dos agregados e destacam como pioneiros Fuller e
170 Thompson, em 1907. Já Alvarenga (2016) apresenta várias metodologias empíricas que objetivam
171 produzir uma mistura ótima de agregados, ou seja, pastas com um menor índice de vazios e máximo
172 empacotamento. A pesquisadora relata que todos os métodos apresentados no seu estudo obtiveram
173 misturas com baixo índice de vazios.

174 De acordo com Damineli, Pileggi e John (2017), para que seja obtido o empacotamento
175 projetado pelos diversos modelos existentes é necessário que seja atendida à condição de dispersão
176 total da pasta. Na pesquisa realizada por esses autores, foi utilizado dispersante para gerar maior
177 fluidez no sistema e garantir a dispersão das partículas. Castro e Pandolfelli (2009) também julgam
178 necessário a utilização de dispersantes na produção do concreto de modo a evitar a sedimentação de

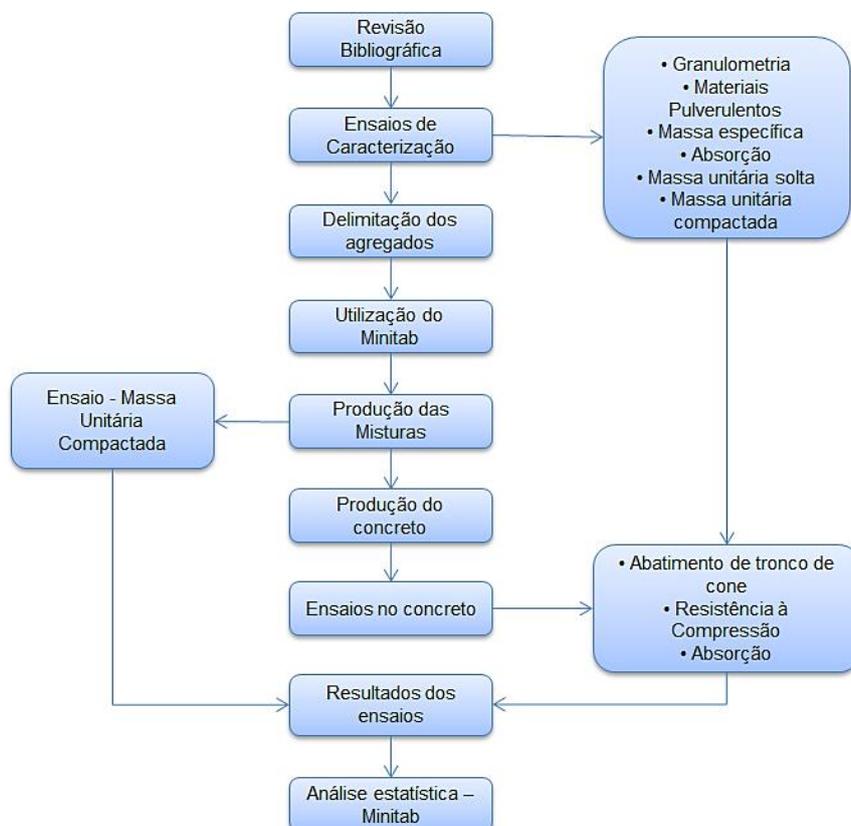
179 partículas e assim possibilitar a preparação de misturas homogêneas com alta concentração de
180 sólidos. Esses aditivos evitam que haja uma ligação prematura do cimento quando em contato com
181 a água.

182 Os novos processos de dosagem sustentados nos modelos de empacotamento das partículas
183 são baseados em conceitos fundamentais sobre as características dos componentes, suas interações e
184 resultados, e constituem soluções bastante eficientes perante a proposta de aliar a produtividade e
185 desenvolvimento com a sustentabilidade. Damineli, Pileggi e John (2017) afirmam que essas
186 mudanças na formulação do concreto podem resultar em materiais com mesmo desempenho e
187 menor consumo de cimento, portanto mais eficientes.

188

189 3 METODOLOGIA

190 De modo a avaliar a influência do empacotamento nas propriedades do concreto, foram
191 realizadas várias misturas com o auxílio do programa estatístico *Minitab18*, além de pastas de
192 concreto, ensaios e testes em laboratório. A metodologia adotada, os ensaios de caracterização
193 realizados, a definição das misturas por meio do programa, a massa unitária compactada das
194 misturas, o equacionamento para determinação do índice de vazios nas misturas e a análise dos
195 resultados por meio do *Minitab18* foram embasados nos estudos de Alvarenga (2016). Todos os
196 procedimentos e etapas da pesquisa encontram-se de forma resumida na Figura 1.



197
198
199
Figura 1 – Fluxograma da metodologia adotada.

200 3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

201 Inicialmente foram definidos os agregados a serem utilizados no estudo visando a obtenção de
202 um esqueleto granular mais compacto, obtendo-se: areia natural, brita natural 0 e brita natural 1. Foi
203 realizada a coleta dos materiais de forma aleatória em campo, a armazenagem dos mesmos em
204 laboratório e a redução das amostras para ensaios conforme as normas técnicas ABNT NBR NM
205 26:2009 e ABNT NBR NM 27:2001. Posteriormente, foram realizados os ensaios dispostos na
206 Tabela 1 seguindo detalhadamente as recomendações exigidas pelas normas subsequentes.

207 Tabela 1 – Ensaios nos agregados.

Ensaio	Agregado	Norma Técnica
Granulometria	Areia	ABNT NBR NM 248:2003
	Brita 0	ABNT NBR NM 248:2003
	Brita 1	ABNT NBR NM 248:2003
Material Pulverulento	Areia	ABNT NBR NM 46:2003
	Brita 0	ABNT NBR NM 46:2003
	Brita 1	ABNT NBR NM 46:2003
Massa específica	Areia	ABNT NBR NM 52:2009
	Brita 0	ABNT NBR NM 52:2009
	Brita 1	ABNT NBR NM 52:2009
Absorção	Areia	ABNT NBR NM 53:2009
	Brita 0	ABNT NBR NM 53:2009
	Brita 1	ABNT NBR NM 53:2009
Massa unitária solta	Areia	ABNT NBR NM 45:2006
	Brita 0	ABNT NBR NM 45:2006
	Brita 1	ABNT NBR NM 45:2006
Massa unitária compactada	Areia	ABNT NBR NM 45:2006
	Brita 0	ABNT NBR NM 45:2006
	Brita 1	ABNT NBR NM 45:2006
Impurezas orgânicas	Areia	ABNT NBR NM 49:2001

208

209 Todos os ensaios foram executados no Laboratório de Ensino de Materiais de Construção do
210 curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, *campus* Rio Paranaíba.

211

212 3.2 PROPORCIONAMENTO DOS AGREGADOS

213 Para a definição dos traços das misturas pelo programa foi necessário a delimitação de cada
214 componente de forma a ordenar combinações que se enquadrassem no intuito da pesquisa. Como se
215 trata de uma mistura ternária, as possíveis combinações de misturas obtidas no *Minitab18* foram
216 modeladas por meio de um triângulo equilátero, ocupando um espaço fatorial restrito denominado
217 simplex, como mostrado na Figura 2.

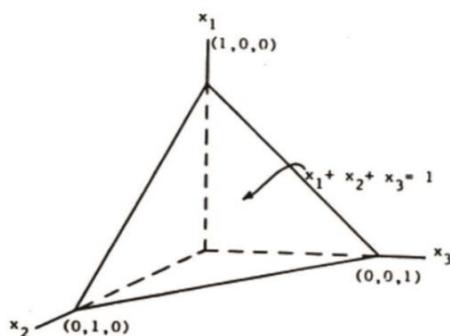


Figura 2 – Modelo de mistura ternária.
Fonte – Cornell, 1990.

218
219
220

221 De forma a seguir o delineamento proposto na pesquisa, os teores dos componentes foram
222 limitados seguindo as seguintes restrições:

- 223 • Por se tratar de uma mistura ternária e a modelagem realizada através de um
224 triângulo equilátero, os intervalos de variação dos agregados foram iguais.
- 225 • O intervalo de variação foi escolhido tendo como referência outros estudos na área e
226 visando uma maior abrangência de misturas, sendo ele de 40%.
- 227 • O primeiro material delimitado foi a areia por se tratar de um agregado miúdo. Em
228 estudos como de Londero et al. (2017); Alvarenga (2016); Damineli, Pileggi e John
229 (2017) pode-se notar que os melhores resultados de índice de vazios e resistência do
230 concreto foram encontrados quando o valor do agregado miúdo variava em torno de
231 70% do valor total. Visto isso, optou-se por utilizar o intervalo de variação de areia
232 de 50% a 90%.
- 233 • Posteriormente foi definida a porcentagem de brita 0 da mistura. Como esse
234 componente não é frequentemente utilizado na produção do concreto como os
235 demais, optou-se por um limite inferior igual a zero o que ocasionou sua ausência em
236 algumas misturas.
- 237 • As combinações que eram constituídas pela proporção máxima de um elemento
238 continham a mínima dos demais. Dessa forma foi possível calcular a variação de
239 brita 1 limitada entre 10% e 50% do total.

240 Por meio das especificações e restrições citadas acima foram definidos os limites de cada
241 componente, estando os mesmos apresentados na Tabela 2.

242

Tabela 2 – Delimitação dos agregados.

Delimitação dos agregados		
Agregados	Limite inferior (%)	Limite superior (%)
Areia	50	90
Brita 0	0	40
Brita 1	10	50

243 Optou-se por uma maior porcentagem de agregados miúdos objetivando uma mistura mais
244 compacta através do embasamento em estudos anteriores.

245

246 **3.3 USO DO MINITAB18**

247 Após a delimitação dos agregados esses valores foram inseridos no programa de base
248 estatística, *Minitab 18*, responsável pela formulação das 10 proporções de misturas estudadas na
249 pesquisa. As combinações geradas encontram-se descritas na Tabela 3.

250

Tabela 3 – Proporcionalamento dos agregados pelo *Minitab18*.

Proporções geradas pelo <i>Minitab18</i>			
Misturas	Areia	Brita 0	Brita 1
1	0,500	0,400	0,100
2	0,633	0,267	0,100
3	0,767	0,133	0,100
4	0,500	0,267	0,233
5	0,633	0,000	0,367
6	0,500	0,133	0,367
7	0,633	0,133	0,233
8	0,900	0,000	0,100
9	0,767	0,000	0,233
10	0,500	0,000	0,500

251

252 **3.4 PRODUÇÃO DAS MISTURAS**

253 Para a produção dos corpos de prova e realização dos ensaios propostos foi determinado o uso
254 de 10 kg de cimento para cada proporção com base em experiências anteriores. Visando a
255 comparação e análise dos resultados, foi necessária a padronização do traço, do método de dosagem
256 e da relação água/cimento para todas as misturas. Optou-se então pela utilização do traço 1:3 de
257 cimento para agregado fundamentado na pesquisa realizada por Alvarenga (2016), obtendo-se então
258 30 kg de agregados por mistura. De posse desse valor total e com as proporções geradas pelo
259 *Minitab18*, foram obtidas as quantidades de cada elemento necessárias para a produção do concreto.
260 Após a pesagem dos elementos e homogeneização da mistura foi realizado o ensaio de massa
261 unitária compactada conforme a norma ABNT NBR NM 45:2006 – Agregados – Determinação da
262 massa unitária e volume de vazios.

263

264 **3.5 ENSAIOS NO CONCRETO**

265 A produção das dez pastas foi realizada de forma padrão em laboratório com betoneira. A
266 relação água/cimento determinada para a pesquisa foi de 0,65 para todas as misturas, sendo a
267 máxima permitida pela norma ABNT NBR 12655. Foram realizados ensaios de umidade dos
268 agregados reduzindo-se os valores de água encontrados em cada um, da quantidade total de água
269 necessária na mistura.

270 Foi feita a pesagem dos materiais e o concreto produzido em betoneira seguindo todas as
271 recomendações da norma ABNT NBR 12655:2015– Concreto de cimento Portland – Preparo,
272 controle, recebimento e aceitação.

273 Depois de finalizado o procedimento, foi realizado o ensaio de Abatimento de tronco de cone
274 conforme as indicações da norma NBR NM 67: 1998 – Concreto – Determinação da consistência
275 pelo abatimento do tronco de cone, obtendo-se a trabalhabilidade do concreto produzido. Com o
276 restante do material presente na máquina foram produzidos oito corpos de prova, sendo seis deles
277 para o ensaio de resistência à compressão e dois para ensaio de absorção.

278 O ensaio de resistência à compressão foi efetuado segundo as instruções da norma NBR
279 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Dentre os 6 corpos
280 de prova destinados a esse ensaio por mistura, 3 ficaram mantidos em água com cal e o restante
281 exposto ao ar para verificação da influência da cura úmida nas suas propriedades. Todos tiveram
282 seu diâmetro medido e foram submetidos à prensa de compressão no 28º dia.

283 O ensaio de absorção foi executado conforme as recomendações da norma ABNT NBR
284 9778:2009 – Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água, índice de
285 vazios e massa específica. Foi realizado em dois corpos de prova, em que um ficou submerso por 28
286 dias em água com cal e o segundo exposto ao ar. Por meio desse ensaio foi possível analisar a
287 influência da cura úmida e da cura seca na absorção do concreto.

288

289 **3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS PELO MINITAB18**

290 As variáveis respostas examinadas pelo programa *Minitab18* foram a trabalhabilidade,
291 resistência à compressão, absorção e índice de vazios. As três primeiras foram encontradas através
292 dos respectivos ensaios e cálculos indicados por norma. Já o índice de vazios foi mensurado por
293 meio dos resultados dos ensaios de massa específica dos agregados e do ensaio de massa unitária
294 compactada de cada mistura.

295 Com base na massa média obtida no ensaio de massa unitária compactada e das proporções
296 dos componentes foi possível calcular a massa de cada um deles no recipiente. Através dessa massa
297 foi calculado o volume real que cada agregado ocupava pela Equação 1.

$$V = \frac{M}{\gamma} \quad (1)$$

298 Onde:

299 V = volume real de cada elemento (cm³);

300 M = massa de cada elemento (g);

301 γ = massa específica de cada elemento (kg/m³).

302 Por meio da diferença entre o volume do recipiente utilizado no ensaio pelo volume real dos
303 materiais foi calculado o volume de vazios existentes. Já o índice de vazios de cada traço foi obtido
304 pela Equação 2.

$$I_v = \frac{V_v}{V_r} * 100 \quad (2)$$

305 Onde:

306 I_v = índice de vazios (%);

307 V_v = volume de vazios (cm³);

308 V_r = volume recipiente (cm³).

309 Após a obtenção das quatro variáveis respostas da pesquisa os resultados foram inseridos no
310 programa *Minitab* 18 para a análise estatística.

311

312 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

313 De acordo com a metodologia adotada, estão apresentados a seguir os resultados dos ensaios
314 de caracterização dos agregados, massa unitária das misturas, abatimento de tronco de cone e as
315 resistências à compressão aos 28 dias. De posse de todos esses resultados e dos gerados pelo
316 programa *Minitab*18, realizou-se as discussões pertinentes as análises realizadas.

317

318 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

319 Os resultados de caracterização dos agregados estão apresentados na Tabela 4.

320

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de caracterização da areia.

	Areia	Brita 0	Brita 1
Massa específica – sss (g/cm ³)	2,55	2,67	2,68
Materiais pulverulentos (%)	1,8	2,0	1,2
Dimensão máxima característica (mm)	2,5	9,5	19
Módulo de finura	2,62	4,67	6,73
Massa unitária estado solto (Kg/dm ³)	1,346	1,262	1,394
Massa unitária compactada (Kg/dm ³)	1,463	1,403	1,497
Absorção (%)	0,5	0,2	0,6
Impurezas orgânicas	OK	-	-

321

322 Apêndice A, estão ilustrados alguns ensaios de caracterização realizados nos agregados.

323

324 4.2 MASSA UNITÁRIA DAS MISTURAS

325 De posse dos resultados do delineamento experimental, onde foram geradas as 10 misturas a
326 serem estudadas, foi realizado o ensaio de massa unitária compactada de cada uma delas. Os
327 resultados estão apresentados na Tabela 5. Algumas imagens da execução do ensaio estão expostas
328 no Apêndice B.

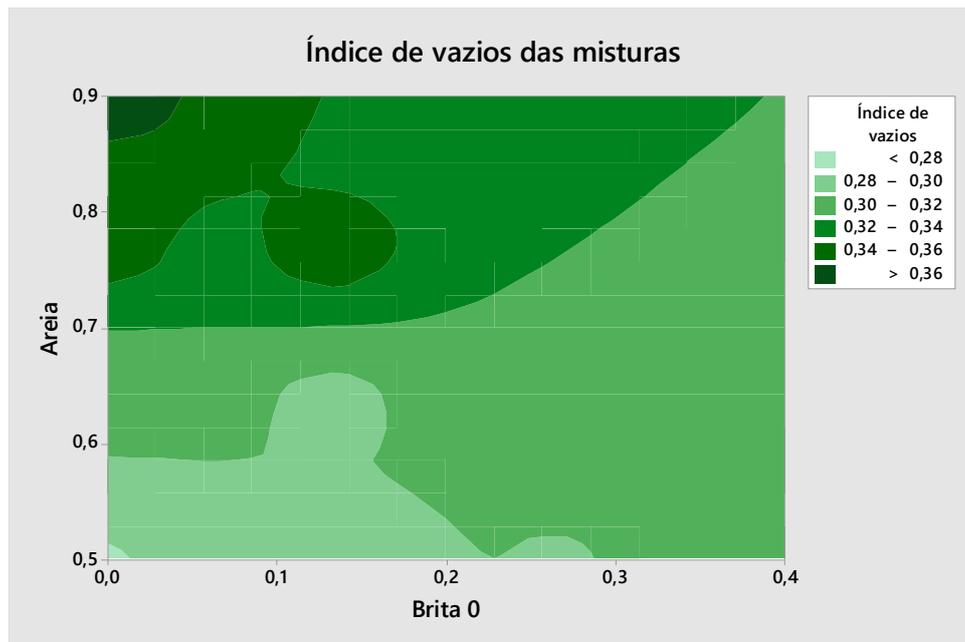
329 Através da Tabela 5 percebe-se que a mistura que possui maior massa unitária e menor índice
330 de vazios possui a maior concentração de brita 1 (mistura 10, teor de brita 1 de 50%). Por outro

331 lado, a menor massa unitária e o maior índice de vazios foram identificados na mistura com maior
 332 quantidade de areia (mistura 8, teor de areia de 90%).

333 Tabela 5 – Massa unitária compactada da mistura

Misturas	δ_c (Kg/dm ³)	Índice de vazios (%)	Misturas	δ_c (Kg/dm ³)	Índice de vazios (%)
1	1,802	30,95	6	1,857	28,91
2	1,782	31,31	7	1,829	29,50
3	1,682	34,76	8	1,615	36,96
4	1,829	29,93	9	1,691	34,46
5	1,816	30,04	10	1,886	27,84

334
 335 Ajustando os valores apresentados na Tabela 5 no programa *MiniTab18* e utilizando um p-
 336 valor > 0,05, apresenta-se a Figura 3 Percebeu-se que a região com maior índice de vazios encontra-
 337 se em misturas com altas concentrações de areia (87% a 90%) e baixas concentrações de brita 0 (0 a
 338 5%) e brita 1 (5% a 13%), enquanto que para baixos teores de areia (50% a 52%), baixos teores de
 339 brita 0 (0 a 2%) e altos teores de brita 1 (48% a 50%) foram obtidos os menores índices de vazios.



340
 341 Figura 3 – Gráfico de contorno do índice de vazios versus areia e brita 0.
 342

343 A Equação 3 demonstra a correlação entre o índice de vazios e a quantidade de agregados.

$$\begin{aligned}
 I_v = & 1,3930 - 6,3081 * a + 9,911 * a^2 - 4,6457 * a^3 + 1,0802 * b_0^2 \\
 & + 0,2306 * b_0 - 1,6269 * b_0^3 + 1,4209 * b_1^2 - 1,7027 * b_1^3
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

344 Onde:

345 I_v = índice de vazios, em decimal;

346 a = concentração de areia na mistura;

347 b_0 = concentração de brita 0 na mistura;

348 b_1 = concentração de brita 1 na mistura.

349 O R² da equação é de 99,99%, o que representa uma baixíssima dispersão dos pontos na
 350 curva. Por meio da Equação 3, notou-se que a areia é o componente que mais contribui para o
 351 aumento do índice de vazios. O que contraria o exposto na literatura, uma vez que por apresentar
 352 uma dimensão máxima característica inferior deveria preencher os vazios existentes entre as
 353 partículas. Esse comportamento identificado pode ter como causa a falta da dispersão total das
 354 partículas na pasta.

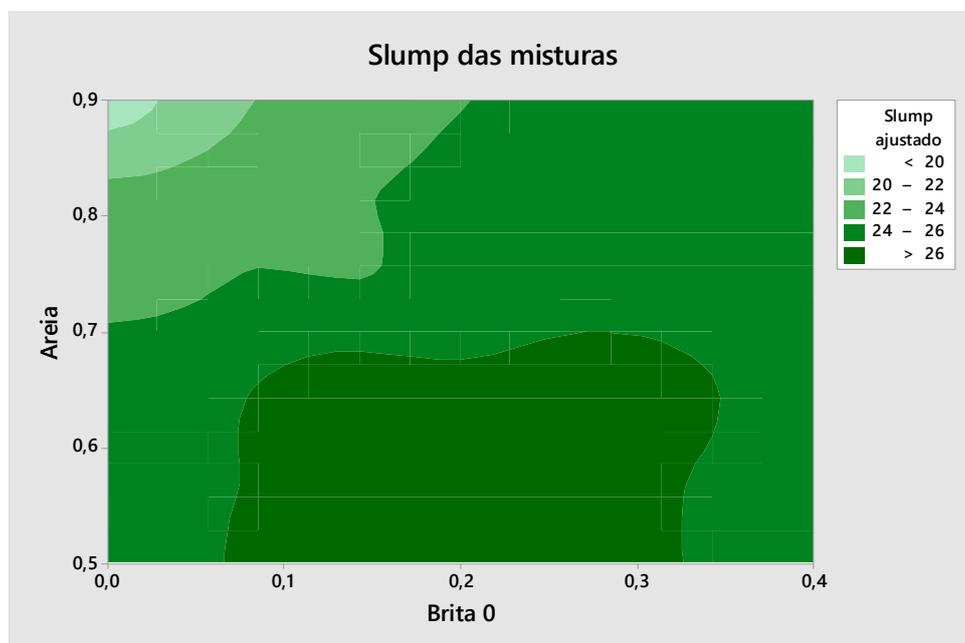
355 4.3 PRODUÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

357 Os resultados dos ensaios de abatimento do tronco de cone estão apresentados na Tabela 6.
 358 Notou-se que os maiores abatimentos estão vinculados as concentrações compostas pelos três
 359 agregados, com baixas quantidades de areia e uma maior concentração de brita 1 do que a brita 0.

360 Tabela 6 – Valores do ensaio de abatimento do tronco de cone para cada mistura

Misturas	Resultados (cm)	Misturas	Resultados (cm)
1	24,5	6	27,0
2	26,5	7	27,5
3	23,8	8	19,5
4	27,0	9	22,7
5	25,2	10	25,3

361
 362 Por meio da Figura 4 nota-se que para baixos teores de areia (50% e 65%) têm-se os maiores
 363 valores do ensaio.



365
 366 Figura 4 – Gráfico de contorno do slump versus areia e brita 0.

367 A Equação 4 demonstra a correlação entre o Slump obtido para as misturas e a quantidade de
 368 agregados.

$$S = - 37,7 - 514,9 * a^2 - 54,25 * b0^2 - 66,78 * b1^2 + 343,5 * a + 227,4 * a^3 + 65,9 * b1^3 \quad (4)$$

369 Onde:

370 S = slump, em centímetros [cm];

371 a = concentração de areia na mistura;

372 b_0 = concentração de brita 0 na mistura;

373 b_1 = concentração de brita 1 na mistura.

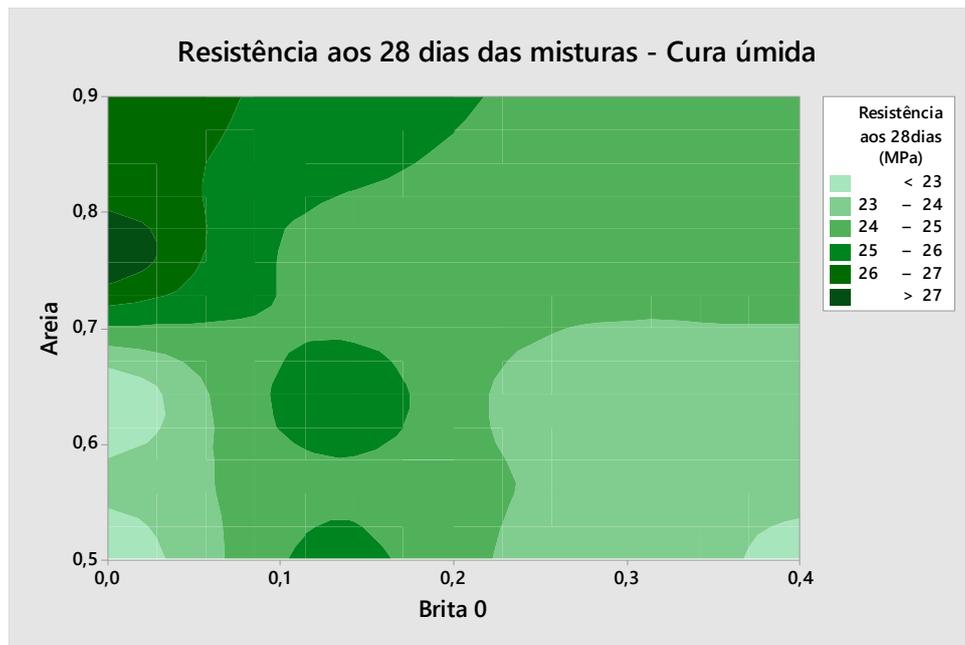
374 O R^2 da equação é de 99,52%. Ainda, através da Equação 4 percebe-se que a concentração de
375 areia é o fator mais influenciador no valor do slump.

376 Na Tabela 7 são mostrados os resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos corpos
377 de prova. Percebe-se que os maiores valores de resistência, tanto para cura seca quanto para úmida,
378 encontram-se nas misturas onde tem-se as maiores concentrações de areia. No Apêndice C estão
379 apresentados os corpos de prova sob cura ao ar e sob cura úmida e ainda um corpo de prova que foi
380 submetido ao ensaio de resistência à compressão.

381 Tabela 7 – Resistência à compressão aos 28 dias

Misturas	Resistência - Cura Úmida (MPa)	Resistência - Cura Seca (MPa)
1	22,8	23,7
2	23,4	21,8
3	24,8	23,2
4	23,7	22,3
5	22,2	20,6
6	25,3	22,6
7	25,6	24,1
8	26,7	25,3
9	27,6	24,6
10	22,5	21,1

382
383 Na Figura 5 é mostrada a correlação entre os percentuais de agregados e a resistência à
384 compressão obtida por meio da cura úmida. Verificou-se que para concentrações entre 75% e 80%
385 de areia, 0 a 3% de brita 0 e 20% a 25% de brita 1 obteve-se as maiores resistências. Nota-se que os
386 corpos de prova que contem de 70% a 80% de areia resultaram em maiores resistências, estando
387 coerente com os valores encontrados nos estudos dos autores citados no item 2.3. Ao analisarmos
388 em conjunto as Figuras 3 e 5 notou-se que para os maiores índices de vazios foram obtidas as
389 maiores resistências.



390
391 Figura 5 – Gráfico de contorno da resistência aos 28 dias – cura úmida versus areia e brita 0.

392 A equação 5 demonstra a correlação entre a resistência obtida com corpos de prova
393 submetidos a cura úmida e a quantidade de agregados.

$$R = 404,7 - 656,0 * b1^2 - 702,4 * b0^2 - 904,5 * a - 207,8 * b0 + 827,7 * a^2 - 313,2 * a^3 + 889,2 * b0^3 + 530,6 * b1^3 + 1181 * a^2 * b0^2 \quad (5)$$

394 Onde:

395 R = resistência em MPa;

396 a = concentração de areia na mistura;

397 b0 = concentração de brita 0 na mistura;

398 b1 = concentração de brita 1 na mistura.

399 O R² da equação obtida foi de 100%, o que representa que os pontos estão exatamente sobre a
400 curva, apresentando relações confiáveis entre as variáveis analisadas.

401 Percebe-se por meio da Figura 6 que, para altas porcentagens de areia (87% e 90%), baixas
402 porcentagens de brita 0 (0 e 3%) e de brita 1 (10% e 13%) alcançou-se os maiores valores de
403 resistência à compressão para a cura ao ar. Já para teores entre 61% e 65% de areia e 0% e 3% de
404 brita 0, obteve-se os menores valores de resistência. Ao analisar a Figura 3 conjuntamente com a
405 Figura 6 percebe-se que, assim como nos corpos de prova que foram submetidos a cura úmida
406 (Figura 5), os corpos de prova que tiveram sua cura ao ar também detinham as maiores resistências
407 para as misturas com os maiores índices de vazios.

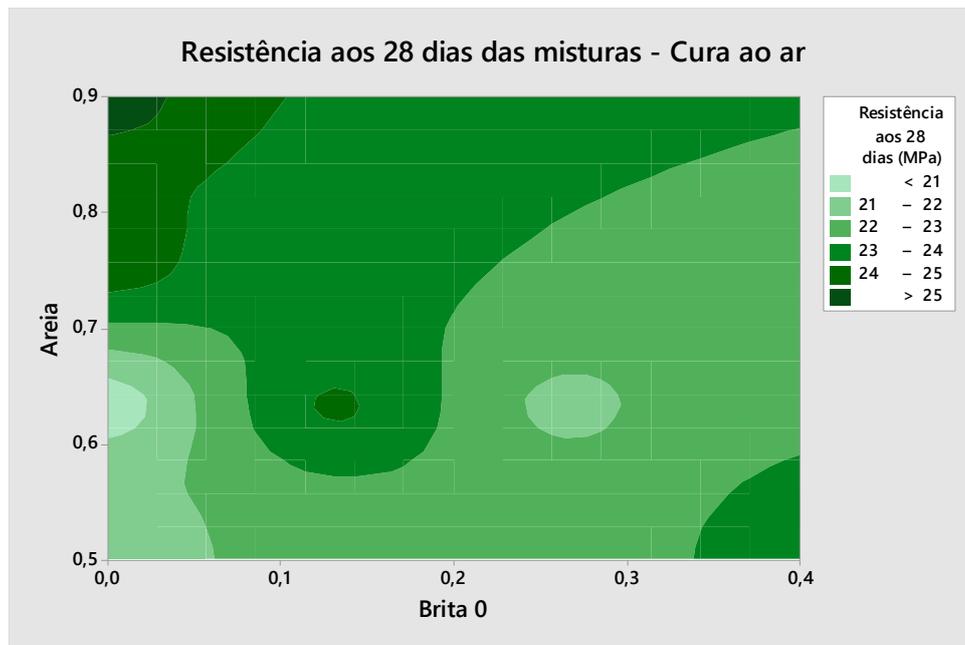


Figura 6 - Gráfico de contorno da resistência aos 28 dias – cura ao ar versus areia e brita 0.

408
409

410 A Equação 6 demonstra a correlação entre a resistência à compressão obtida com corpos de
411 prova submetidos à cura seca e a proporção dos agregados.

$$R = 231,4 - 367,5 * a - 142,5 * b_0 + 185,2 * a^2 - 36,12 * a^3 - 516,9 * b_0^2 + 758,4 * b_0^3 - 553,5 * b_1^2 + 512,3 * b_1^3 + 611,7 * a^2 * b_0^2 \quad (6)$$

412

Onde:

413

R = resistência em MPa;

414

a = concentração de areia na mistura;

415

b₀ = concentração de brita 0 na mistura;

416

b₁ = concentração de brita 1 na mistura.

417

418

O R² da equação obtida é de 100%, o que representa que os pontos estão exatamente sobre a curva apresentando relações confiáveis entre as variáveis estudadas.

419

420

Por meio das Figuras 5 e 6 percebeu-se que tanto para a cura úmida quanto para a cura seca os maiores valores de resistência foram atingidos quando a porcentagem de areia ultrapassa os 75%. Realizando-se um paralelo com a Figura 3, notou-se o aumento da resistência à compressão, para a análise realizada, com a redução do índice de vazios.

423

424

425

426

427

428

A divergência dos resultados pode estar associada ao fato do presente trabalho não utilizar outros materiais e nem aditivos que poderiam auxiliar na dispersão total das partículas e na otimização do empacotamento dos agregados. Ainda recomenda-se uma análise química sobre as rochas que deram origem a esses agregados pois pode-se encontrar algum fator influenciador que justifica os resultados obtidos. No entanto ao podemos perceber uma região onde temos 60% e 68%, de areia e 10% a 18% de brita 0 e conseqüentemente 14 % a 30% de brita 1 que obteve

429 resultados de acordo com os expostos na bibliografia estudada. Nessa, região tivemos, baixos
430 índices de vazios, boa trabalhabilidade e altos valores de resistência.

431 Já as menores resistências foram apresentadas nas misturas que continham o mínimo valor
432 delimitado para a areia e brita zero, ou seja, que continham as maiores porcentagens de brita 1.
433 Através das equações 4 e 5 percebeu-se que, neste trabalho, o fator que mais influenciou
434 positivamente na resistência foi a concentração de areia.

435 Por fim, foi avaliada a relação entre o tipo de cura (úmida ou seca), absorção e resistência. A
436 Equação 7 demonstra a correlação entre a resistência obtida com corpos de prova submetidos a cura
437 seca e úmida e a absorção dos mesmos.

$$R = 16,38 + 38818829 * abs^6 - 32886167076 * abs^9 \\ + 4617 * us * abs^2 - 50975 * us * abs^3 \quad (7)$$

438 Onde:

439 R = resistência em MPa;

440 abs = absorção, em decimal.

441 us = cura úmida ou cura seca.

442 O R² da equação obtida foi de 33,51%, ou seja, os pontos apresentam uma alta dispersão na
443 curva, não sendo encontrada uma relação entre a resistência, absorção e tipo de cura. Portanto
444 optou-se por não apresentar o gráfico tendo em vista a não representatividade do modelo. No
445 entanto, quando se observou os valores de absorção quanto ao tipo de cura, percebeu-se que os
446 resultados nos corpos de prova que foram submetidos à cura úmida alcançaram valores inferiores
447 aos sujeitos à cura seca. O fato pode ser explicado devido a maior porosidade encontrada nos
448 concretos que passaram por cura seca, o que gerou uma maior absorção. Isso mostra a relevância da
449 cura úmida para a redução da porosidade do concreto.

450

451 **5 CONCLUSÃO**

452 Através das análises realizadas pode-se concluir que o empacotamento das partículas
453 influencia diretamente nas propriedades do concreto. Ao produzir concretos com quantidades
454 padrões de cimento e água variando apenas as porcentagens de cada agregado, pode-se observar
455 como as características e combinações dos mesmos podem resultar em diferentes valores e
456 influenciar nas características do produto.

457 Os maiores valores de resistência foram encontrados em combinações com alto teor de areia
458 estando em conformidade com diversos estudos na área. Apesar do intuito de utilizar esse agregado
459 miúdo em maiores quantidades visando preencher os vazios existentes na mistura e assim encontrar
460 o máximo empacotamento das partículas, observou-se uma tendência contrária, ou seja, o índice de

461 vazios aumentou com a elevação do teor de areia. Esse comportamento pode ter como causa a falta
462 de dispersão correta das partículas na pasta.

463 Essa tendência foi identificada tanto para os corpos de prova submetidos a cura úmida quanto
464 àqueles submetidos a cura ao ar. Os resultados do ensaio de resistência à compressão foram maiores
465 nos corpos de prova submetidos a cura úmida quando comparados aos expostos ao ar. Quanto a
466 trabalhabilidade, os maiores abatimentos foram encontrados nas misturas que detinham as menores
467 concentrações de areia, podendo-se notar que nas misturas com menor trabalhabilidade verificou-se
468 as maiores resistências.

469 Em relação a absorção foi identificado que os corpos de prova que foram submetidos a cura
470 úmida obtiveram valores de absorção menores do que aqueles curados ao ar. No entanto, essa não
471 demonstrou uma relação considerável em relação a resistência. De forma geral, foi evidenciado uma
472 maior influência da concentração de areia perante os outros agregados em relação a todas as
473 características observadas nos concretos.

474

475 **6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

476 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 26:** Agregados – Amostragem. Rio de
477 Janeiro, 2009. 10 p.

478

479 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 27:** Agregados - Redução da amostra
480 de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7 p.

481

482 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 45:** Agregados - Determinação da
483 massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

484

485 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 46:** Agregados - Determinação do
486 material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

487

488 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 49:** Agregado miúdo - Determinação
489 de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001. Versão corrigida 2001. 3 p.

490

491 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação
492 da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

493

494 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação
495 da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

496

497 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 67:** Concreto - Determinação da
498 consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

499

500 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 248:** Agregados - Determinação da
501 composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

502

503 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de
504 corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

505
506 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos -
507 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
508 Versão corrigida 2009. 4 p.
509
510 Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland –
511 Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. Versão corrigida
512 2015. 23 p.
513
514 ALVARENGA, M. C. S. **Desenvolvimento de metodologia de dosagem de concreto com adição**
515 **de sílica ativa para fabricação de blocos para alvenaria estrutural**. 2016. 197 p. Tese (Pós-
516 Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
517
518 BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. Ed. Rio de Janeiro. LTC, 2008. p. 109.
519
520 DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Influência do empacotamento e dispersão de**
521 **partículas no consumo de cimento de concretos**. REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E
522 MATERIAIS, São Paulo, v. 10, n. 5, p. 1011-1024, out. 2017. Disponível em:
523 <<http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000500004>>. Acesso em: 10 jun. 2018.
524
525 CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Desempenho de concretos**
526 **avanzados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional**.
527 Cerâmica, São Carlos, v. 55, p. 233-251, jul. 2009. Disponível em:
528 <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_serial&pid=0366-6913&lng=en&nrm=iso>. Acesso
529 em: 17 jun. 2018.
530
531 CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento**
532 **de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica,
533 São Paulo, v. 55, n. 333, p. 18-32, jan. 2009. Disponível
534 em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S036669132009000100003>. Acesso
535 em: 09 jun. 2018.
536
537 LONDERO, C.; LENZ L. A.; SANTOS Í. M. R. dos; KLEIN N. S. **Determinação da densidade**
538 **de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT:**
539 **comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições**
540 **aleatórias**. Cerâmica, Curitiba, v. 63, p. 22-33, jan. 2017. Disponível em:
541 <<http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633652018>>. Acesso em: 06 maio 2018.
542
543 MAURY, Maria Beatriz; BLUMENSCHHEIN, Raquel Naves. **Produção de cimento: Impactos à**
544 **saúde e ao meio ambiente**. Sustentabilidade em debate, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jun. 2012.
545 Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18472/SustDeb.v3n1.2012>>. Acesso em: 12 ago. 2018.
546
547 MILANEZ, Bruno; FERNANDES, Lúcia de Oliveira; PORTO, Marcelo Firpo de Souza. **A**
548 **coincineração de resíduos em fornos de cimento: riscos para a saúde e o meio ambiente**.
549 Ciência & Saúde Coletiva, [s.l.], v. 14, n. 6, p.2143-2152, dez. 2009. Disponível em:
550 <<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-81232009000600021>>. Acesso em 08 jan. 2018.
551
552 MONSON, Alexandre Rodrigues et al. **Influência do empacotamento da estrutura granular na**
553 **resistência à compressão de concretos utilizados para fabricação de postes duplo T**. 2016. 15 p.
554 Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade Educacional
555 Araucária, Araucária, 2016. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/28940275-Influencia-do>>

556 empacotamento-da-estrutura-granular-na-resistencia-a-compressao-de-concretos-utilizados-para-a-
557 fabricacao-de-postes-duplo-t.html>. Acesso em: 03 jan. 2019.
558
559 **SANQUETTA, C. R. et al. Estimativa das emissões de gases de Efeito Estufa em uma obra de**
560 **construção civil com a metodologia GHG Protocol.** *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico*
561 *Conhecer*, Goiânia, v.9, n.16, 2013.
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592

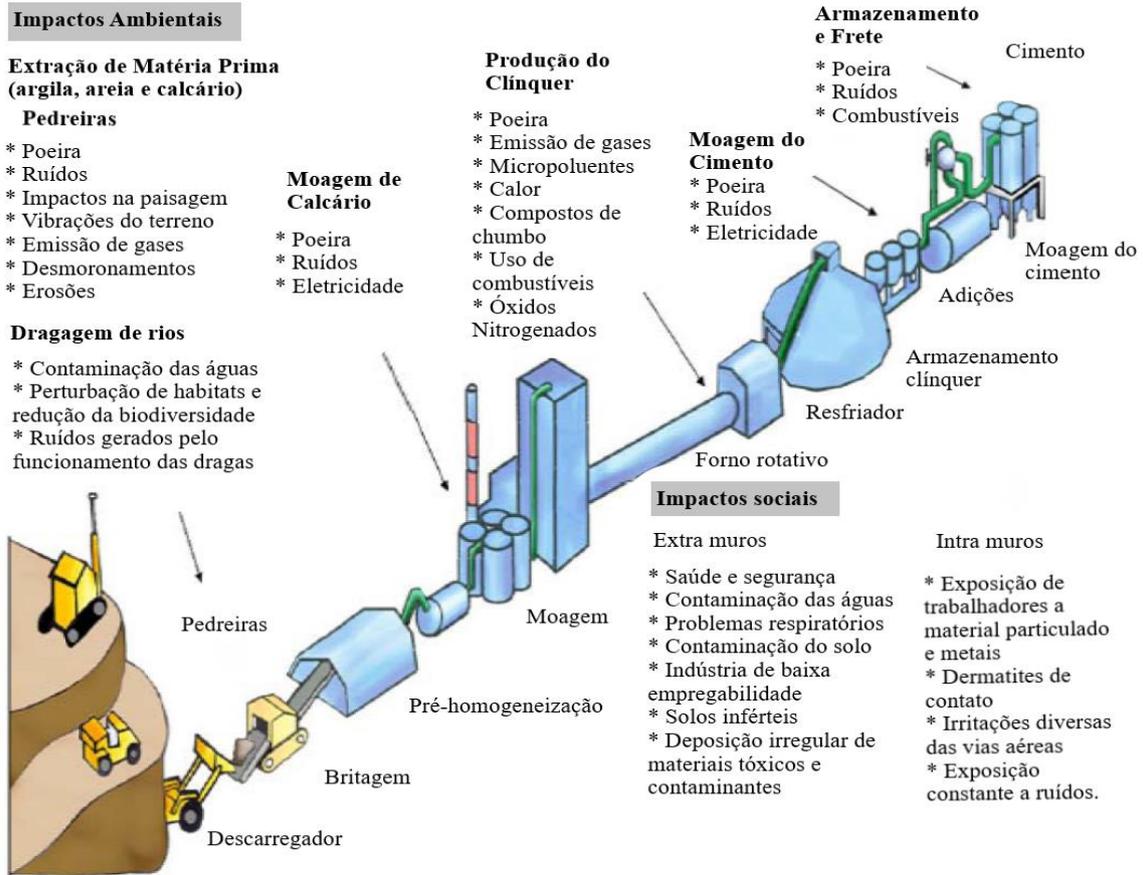


Figura 7 – Impactos ambientais e sociais: Indústria de cimento.
 Fonte – Adaptado de Maury e Blumenschein, 2012.

594
 595
 596

597

598

APÊNDICE A



Figura 8 – Quarteamento da areia.

599

600

601



Figura 9 – Ensaio de granulometria da areia.



Figura 10 – Ensaio de massa específica da brita 1.

602

603

604



Figura 11 – Ensaio de Impurezas orgânicas.



Figura 12 – Ensaio de granulometria da brita 1.

605

606

607

608

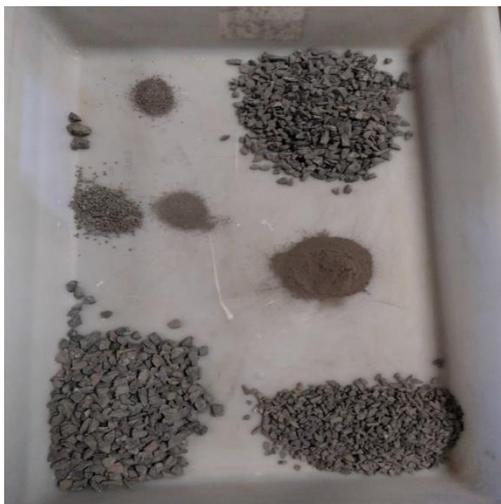


Figura 13 – Ensaio de granulometria da brita 0.

609

APÊNDICE B

610



Figura 14 – Proporcionalamento das misturas.

611

612

613



Figura 15 – Ensaio de massa unitária compactada das misturas.

614

615

616

617

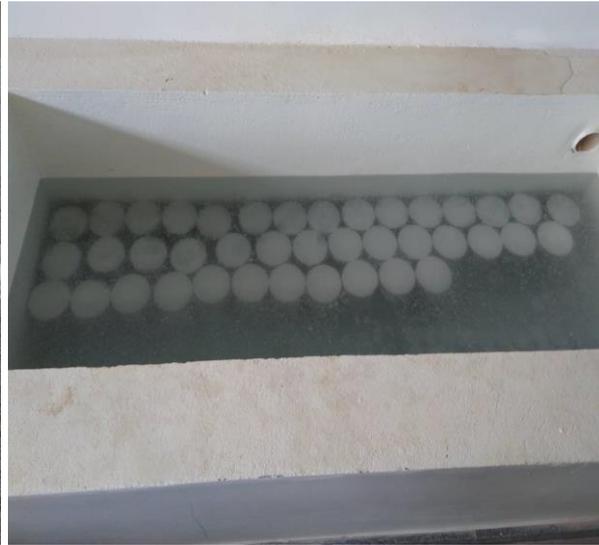
618

619

620

APÊNDICE C

621



622

623 Figura 16 – Corpos de prova submetidos a cura ao ar.

624 Figura 17 – Corpos de prova submetidos a cura úmida.

624



Figura 18 – Corpo de prova após o rompimento.

625

626

627

628

629

630

631