

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO REJEITO DE  
BRITAGEM DE RIODACITO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO  
CONVENCIONAL DE CIMENTO *PORTLAND***

Leonardo Fachinetto

Lajeado, junho de 2016.

Leonardo Fachinetto

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO REJEITO DE  
BRITAGEM DE RIODACITO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO  
CONVENCIONAL DE CIMENTO *PORTLAND***

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II – Monografia do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me.Rafael Mascolo

Lajeado, junho de 2016.

Leonardo Fachinetto

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO REJEITO DE  
BRITAGEM DE RIODACITO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO  
CONVENCIONAL DE CIMENTO *PORTLAND***

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Estágio Supervisionado III, na linha de formação específica em Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Civil:

Banca Examinadora:

Prof.– orientador  
Centro Universitário Univates  
Mestre pela

Prof.  
Centro Universitário Univates  
Mestre pela

Prof.  
Centro Universitário Univates  
Mestre pela

Lajeado, junho de 2016

## DEDICATÓRIA

A minha “*Nona*” Olga (*in memoriam*), pelo exemplo de fé, persistência, generosidade e integridade.

## **AGRADECIMENTO**

A Deus por ter me dado saúde e força para superar os obstáculos.

Ao meu orientador, professor Rafael Mascolo, pela disponibilidade e paciência. Sua colaboração foi de suma importância para que o presente estudo evoluísse com fundamento e consistência.

Ao meu amigo e parceiro, engenheiro civil César E. Della Valentina, mentor do tema desta monografia, pela confiança e apoio.

À empresa Britagem Muçum, no nome dos proprietários Jairo e Mário Poletti, por possibilitarem o uso dos materiais constituintes da pesquisa.

Ao meu grande amigo Claudir, pela confiança depositada em mim. Sem seu apoio, provavelmente não teria condições de seguir meus estudos.

Aos amigos e familiares, que me motivaram constantemente. Em especial a minha tia Zélia, pelo apoio na parte inicial do curso.

A Tia Zezé, cuidadora da minha filha caçula, a quem dedicou amor materno.

Aos meus pais, pelo incentivo e constante ajuda. Sem seu apoio teria sido muito mais complicado seguir.

Aos meus filhos Vitor, João e Alice, pela compreensão e amor. Por vezes o desânimo se fez presente, e foi a presença deles que me trouxe de volta à luta.

E em especial a minha esposa Alessandra, minha companheira de batalha, pela compreensão, apoio e constante motivação. Juntamente com os meus filhos, e a nossa filha, formou o combustível da minha evolução.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez”. Thomas Edison

## RESUMO

Buscando-se o aproveitamento do rejeito de britagem (RB), gerado na produção de pedra britada na região de Vespasiano Corrêa/RS, elaborou-se um estudo de caracterização do material com a finalidade de testar concretos produzidos com o uso fracionado ou integral do produto. Após intensa pesquisa bibliográfica, fez-se a caracterização e classificação dos agregados. Na sequência, foram elaborados traços com frações de 25, 50, 75 e 100% de RB, associados à areia natural. Constatou-se que à medida que a proporção de mistura de rejeito aumentou, houve uma demanda maior de água para manter o mesmo abatimento. Esse efeito foi motivado pela forma e textura do RB, que acabam gerando um maior travamento das partículas constituintes da mistura de concreto. O aumento da relação água/cimento ( $a/c$ ) afetou negativamente a resistência mecânica e a compressão do concreto. Desta forma, concluiu-se que, embora seja possível elaborar concretos constituídos de rejeito de britagem, a elevada perda de resistência gerada pelo aumento da relação  $a/c$  acaba por inviabilizar financeiramente seu uso.

**Palavras-chave:** Rejeito de britagem. Areia artificial. Pó de brita. Concreto. Dosagem de concreto.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Britagem localizada em Vespasiano Corrêa/RS.....	57
Figura 2 - Rocha de Riodacito (Basalto Carijó) encontrada na britagem localizada em Vespasiano Corrêa/RS.....	58
Figura 3 - Carregamento dos blocos de rocha na jazida .....	59
Figura 4 - Caminhão caçamba alimentando o britador.....	59
Figura 5 - Britador de mandíbula fragmentando blocos.....	60
Figura 6 – Fragmento denominado “Rachão” pela empresa .....	60
Figura 7 - Britador de cone que realiza a britagem secundária .....	61
Figura 8 - Peneira vibratória 3 decks.....	61
Figura 5 - Classificação do material produzido na empresa.....	62
Figura 6 - Britador de cone para reprocessamento .....	62
Figura 11 – Sequência de imagens referente à coleta de material no pátio da empresa .....	63
Figura 12 – Secagem do material ao sol .....	64
Figura 13 – Quarteamento do agregado miúdo.....	64
Figura 14 – Processo de determinação da granulometria .....	65
Figura 15 – Processo de determinação da massa específica do agregado miúdo ...	67
Figura 16 – Processo de determinação da massa específica do agregado graúdo ..	68
Figura 17 – Processo de determinação da massa unitária dos agregados miúdo e graúdo .....	69
Figura 18 – Forma do RB .....	73
Figura 19 – Materiais utilizados para a mistura experimental.....	77

Figura 20 – Imprimação da betoneira.....	78
Figura 21 – Teste do teor de argamassa.....	79
Figura 22 – Medição do abatimento do concreto .....	80
Figura 23 – Moldagem e cura dos corpos-de-prova .....	82
Figura 24 – Ensaio de resistência mecânica à compressão.....	83
Figura 25 – Ensaio de resistência mecânica à tração .....	84

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Faixas granulométricas dos agregados miúdos.....	66
Gráfico 2 – Faixas granulométricas da brita 0.....	66
Gráfico 3 – Faixas granulométricas da brita 1.....	67
Gráfico 4 – Coeficiente de inchamento e teor de umidade crítica da AN.....	71
Gráfico 5 – Coeficiente de inchamento e teor de umidade crítica do RB.....	71
Gráfico 6 – Gráfico de Ev em função da mistura da brita.....	74
Gráfico 8 – Comparativo de custo do concreto associado à resistência de 15, 20 e 25 MPa.....	91

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Consumo de agregados nos estados brasileiros em 2013.....	27
Quadro 2 - Classificação dos agregados naturais segundo o tipo de rocha.....	30
Quadro 4 - Classificação dos agregados segundo a textura superficial e exemplos.	32
Quadro 5 - Limites granulométricos do agregado miúdo.....	34
Quadro 6 - Limites granulométricos do agregado graúdo .....	35
Quadro 7 - Consumo per capita de minerais não metálicos na América em 2013 .....	52

## LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Consumo de agregados nos estados brasileiros em 2013.....	27
Quadro 2 - Classificação dos agregados naturais segundo o tipo de rocha.....	30
Quadro 4 - Classificação dos agregados segundo a textura superficial e exemplos.	32
Quadro 5 - Limites granulométricos do agregado miúdo.....	34
Quadro 6 - Limites granulométricos do agregado graúdo .....	35
Quadro 7 - Consumo <i>per capita</i> de minerais não metálicos na América em 2013.....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
$\mu\text{m}$	Micrómetro
in	Polegada
fc	Resistência do concreto a compressão
fc3	Resistência do concreto a compressão aos 3 dias.
fc7	Resistência do concreto a compressão aos 7 dias.
fc28	Resistência do concreto a compressão aos 28 dias.
a/c	água/cimento
H	água/matérias secas
ag/c	agregado/cimento
CPs	Corpos-de-prova

t/m<sup>3</sup> Tonelada/metro cúbico

kg/m<sup>3</sup> Kilograma/metro cúbico

R\$/m<sup>3</sup> Reais/metro cúbico

mm milímetro

SSS Saturado, superfície seca

n° número

Ca(OH)<sub>2</sub> Hidróxido de cálcio

°C Graus centígrados

RS Rio Grande do Sul

NM Norma Mercosul

Ev Índice de vazios

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Tema .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2 Problema .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3.1 Objetivo geral.....</b>	<b>20</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>1.4 Justificativa.....</b>	<b>21</b>
<b>1.5 Delimitação do tema.....</b>	<b>22</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Concreto de cimento Portland .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.1 Cimento <i>Portland</i>.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.2 Agregado.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.3 Classificação dos agregados .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.3.1 Origem.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.3.2 Massa .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.3.3 Dimensão .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.3.4 Classificação Petrográfica.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1.3.5 Forma .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.3.6 Textura .....</b>	<b>32</b>
<b>2.1.4 Caracterização do agregado .....</b>	<b>33</b>
<b>2.1.4.1 Composição granulométrica .....</b>	<b>33</b>

2.1.4.2 Limites granulométricos .....	34
2.1.4.3 Aderência .....	35
2.1.4.4 Resistência .....	36
2.1.4.5 Tenacidade.....	36
2.1.4.6 Dureza .....	36
2.1.4.7 Massa Específica.....	37
2.1.4.8 Massa Unitária .....	37
2.1.4.9 Umidade e absorção .....	38
2.1.4.10 Inchamento .....	39
2.1.4.11 Impurezas.....	39
2.1.5 Água .....	39
2.1.6 Aditivos .....	40
2.2 Propriedades do concreto fresco .....	41
2.2.1 Trabalhabilidade .....	42
2.2.2 Perda de abatimento .....	45
2.2.3 Segregação e exsudação.....	46
2.2.4 Massa específica do concreto fresco .....	47
2.3 Propriedades do concreto endurecido.....	47
2.4 Areia Industrializada .....	51
2.5 Dosagem do concreto.....	55
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	57
3.1 Amostragem .....	63
3.2 Caracterização dos agregados .....	65
3.2.1 Granulometria do agregado graúdo e miúdo.....	65
3.2.2 Determinação da massa específica do agregado miúdo .....	67
3.2.3 Determinação da massa específica do aglomerante.....	68
3.2.4 Determinação da massa específica do agregado graúdo.....	68
3.2.5 Determinação da massa unitária e índice de vazios .....	69
3.2.6 Índice de vazios .....	69
3.2.7 Determinação do inchamento do agregado miúdo .....	70
3.3 Classificação do RB .....	71
3.3.1 Origem.....	72
3.3.2 Massa .....	72

3.3.3 Dimensão .....	72
3.3.4 Classificação Petrográfica.....	72
3.3.5 Forma .....	72
3.3.6 Textura .....	73
3.4 Determinação do fracionamento da brita .....	73
3.5 Mistura de concreto .....	74
3.5.1 Parâmetros para dosagem do traço referência .....	74
3.5.2 Determinação do traço inicial.....	75
3.5.3 Mistura experimental.....	77
3.5.4 Definição do teor de argamassa .....	78
3.5.5 Determinação dos traços auxiliares .....	79
3.5.6 Ajuste do abatimento e determinação da relação água/cimento .....	79
3.5.7 Definição dos traços com proporção de RB .....	80
3.6 Definição da tabela de traços .....	81
3.7 Moldagem e cura dos corpos-de-prova.....	81
3.8 Determinação da resistência à compressão.....	82
3.9 Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	83
3.10 Elaboração dos diagramas de dosagem .....	84
3.11 Comparativo de custo do concreto .....	84
4 RESULTADOS.....	87
4.1 Propriedades do concreto fresco .....	87
4.1.1Trabalhabilidade.....	87
4.1.2 Perda de abatimento .....	87
4.1.3 Segregação e exsudação.....	88
4.1.4 Massa específica .....	88
4.2 Propriedades do concreto endurecido.....	89
4.3 Diagramas de dosagem .....	90
4.4 Comparativo de custo do concreto .....	90
5 CONCLUSÃO .....	92
5.1 Quanto à caracterização física dos agregados .....	92
5.2 Quanto às propriedades do concreto fresco .....	93
5.3 Quanto às propriedades do concreto endurecido.....	94

<b>5.4 Comparativo de custo dos concretos .....</b>	<b>94</b>
<b>5.5 Sugestão para trabalhos futuros .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>99</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento do custo da areia natural (AN) tem levado muitos construtores e concreteiras a buscarem alternativas para substituir este agregado do concreto. Uma das alternativas encontradas foi usar como agregado miúdo, de forma fracionada ou integral, a Areia Industrializada (AI), conhecida também, em algumas regiões do Brasil, como Pó de brita ou Rejeito de Britagem. Em grande parte dos casos, essa substituição é realizada sem que sejam feitas avaliações e testes necessários para cada aplicação.

Algumas pesquisas sobre o tema foram realizadas, caracterizando a AI de regiões distintas do país. Porém, devido à variação destas propriedades, motivadas por fatores como variabilidade da rocha matriz, tipo de equipamento utilizado no processo de extração e beneficiamento, e aplicação ou não de lavagem do material, faz-se necessário maior aprofundamento no tema para obter-se maior embasamento técnico.

Este trabalho busca caracterizar e testar o rejeito de britagem (RB) obtido no processo de britagem da rocha Riodacito, encontrada na região de Vespasiano Corrêa/RS. Este material, também conhecido na região estudada, como “Pó de Brita”, vem sendo utilizado por construtores e empresas de pré-moldados como matéria-prima para a fabricação de artefatos de concreto, base para calçamento, piso intertravado, fabricação de concretos com finalidade estrutural e fabricação de argamassa de assentamento e revestimento.

## **1.1 Tema**

Estudo da viabilidade técnica do uso de RB produzido a partir do Riodacito, para uso na produção de concreto de cimento *Portland* convencional.

## **1.2 Problema**

Qual a caracterização do RB produzido no local e o seu potencial de aplicação, tanto no aspecto técnico como econômico, quando relacionado à substituição parcial ou integral do agregado miúdo natural na produção de concreto convencional de cimento *Portland*?

## **1.3 Objetivos**

Seguem os objetivos deste trabalho, tendo assim, o objetivo geral e os específicos.

### **1.3.1 Objetivo geral**

Avaliação do RB no que diz respeito à trabalhabilidade e resistência mecânica, associado à viabilidade econômica do uso na produção de concreto de cimento *Portland* convencional.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Essa monografia tem os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar fisicamente os agregados;
- b) avaliar as propriedades do concreto;
- c) construir diagramas de dosagem com os resultados obtidos nos ensaios;

- d) comparar o custo entre concretos de mesma resistência mecânica, elaborados com frações variadas de RB.

#### **1.4 Justificativa**

A crescente demanda de agregados para a produção de concreto, motivada pela predominância do uso de sistemas construtivos, que tem no produto seu principal elemento, tem motivado constantemente estudos relacionados à busca de alternativas. Estando diretamente relacionado à diminuição de impactos ambientais originados na extração, assim como a redução de custos de produção.

Nos últimos anos, a extração de AN vem sendo mais controlada por órgãos fiscalizadores, estando os mesmos preocupados com os impactos gerados pela forma irresponsável como a mesma é executada. Tal entrave vem gerando transtornos para as empresas que executam a extração de AN de rios e jazidas, gerando com isso um aumento no custo final do produto. Somado a isso, o elevado acréscimo do custo gerado pelo transporte, cada vez mais distante dos centros consumidores, são motivo de várias pesquisas, com o objetivo de buscar alternativas que venham a mitigar esses fatores negativos do processo produtivo de concreto.

A presente monografia visa estudar a viabilidade de substituição da AN por RB, pretendendo com isso apresentar uma alternativa para reduzir de forma significativa a necessidade de extração de AN, diminuindo, desta forma, os impactos gerados pelo processo de extração.

Outro aspecto motivador do estudo em questão trata-se da possibilidade de dar um destino rentável para o que hoje é tratado como custo operacional.

No que diz respeito à redução de custos, não se pode deixar de destacar o fato da possível diminuição da distância do transporte do agregado miúdo, reduzindo assim significativamente o valor final do produto.

Por fim, o trabalho busca alcançar alternativas viáveis, tanto tecnicamente como financeiramente, para substituir a areia natural, gerando desta forma, uma

solução eficaz para mitigar o problema atual da carência de agregado miúdo para a produção de concreto.

### **1.5 Delimitação do tema**

Pretende-se estudar o efeito da substituição da AN pelo RB na produção de concreto de cimento *Portland*, no que diz respeito à trabalhabilidade, resistência mecânica à compressão e à tração, bem como a variação do custo de produção.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Concreto de cimento Portland

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo. O consumo de concreto aumentou muito com o passar dos anos. Metha e Monteiro (2014), estimam a produção atual em 11 bilhões de toneladas ao ano.

Normalmente sua constituição é formada por cimento *Portland*, areia, brita e água. No entanto, a necessidade de melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido, fez com que se adotassem alguns outros constituintes na mistura, materiais estes, destinados a conferir propriedades especiais ao concreto, denominados de aditivos e/ou adições.

Metha e Monteiro (2014) destacam três características do concreto responsáveis pelo atual cenário: sua excelente resistência à água, o que difere do aço e da madeira, por exemplo; sua fácil adaptação à variação de formas e tamanhos dos elementos moldados; e, baixo custo de produção com rápida disponibilidade de material.

Segundo Bastos (2002), a variação da estrutura dos materiais que constituem os concretos geram comportamentos distintos nos mesmos, tanto no estado fresco como do endurecido. Essa metamorfose acaba por gerar desafios aos profissionais responsáveis pela produção, distribuição e emprego do concreto. Desta forma, destaca-se que a dosagem dos materiais não pode ser feita de forma empírica, quando se busca um conglomerado compacto e sólido.

Neville e Brooks (2013) destacam ainda que os materiais constituintes de um concreto adequado e de um de qualidade insatisfatória podem ser os mesmos, sendo este concreto diferenciado apenas pelo *know-how* de quem o executou.

Já Petrucci (1998) destaca que para se elaborar um concreto durável, resistente, econômico e de bom aspecto, deve-se estudar o seguinte:

- a) as propriedades de cada material envolvido no processo;
- b) as propriedades do concreto e os mecanismos sujeitos à interferência nestas propriedades;
- c) o fracionamento e a elaboração cuidadosa da mistura de cada traço, objetivando atingir as características pré-definidas;
- d) o deslocamento, lançamento e adensamento relativos a cada obra;
- e) o controle da produção e do processo de cura, garantindo assim o atingimento das características exigidas, ou quando não as forem, possibilitar a intervenção necessária para corrigi-las.

De acordo com Petrucci (1998) é dada a denominação de pasta para a mistura de água e cimento. Já, adicionando o agregado miúdo à pasta, tem-se a argamassa. Considera-se então, o concreto uma argamassa à qual foi adicionado um agregado graúdo. Destaca-se ainda as seguintes funções de cada subproduto:

- pasta:
  - a) envolver o agregado, enchendo os vazios do concreto, gerando trabalhabilidade e fluidez ao composto quando recém-misturado;
  - b) unir os agregados no concreto endurecido, gerando impermeabilidade, resistência mecânica e durabilidade diante dos agentes agressivos.
- agregados:
  - a) contribuir com partículas que resistam as solicitações geradas pelos esforços, ao desgaste e interferência das intempéries;

- b) contribuir para a redução da variação de volume gerada por fatores diversos;
- c) diminuir o custo.

### **2.1.1 Cimento *Portland***

Segundo ASTM C 150 apud Metha e Monteiro (2014), cimento *Portland* é definido como um material hidráulico originado da trituração de clínqueres formados principalmente de silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de sulfato de cálcio. Esses clínqueres são esferas de 5 a 25 mm de diâmetro de material sinterizado, produzido pelo aquecimento de altas temperaturas de matérias-primas de composição pré-determinadas.

Já para Neville e Brooks (2013), cimento *Portland* trata-se de cimento elaborado pela mistura de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro. Esse composto é queimado à temperatura de clinquerização, sendo o material resultante desta queima, o clínquer moído.

Tanto Neville e Brooks (2013) como Bastos (2002) creditam a patente do cimento *Portland* ao inglês Joseph Aspdin, a qual foi requerida em 1824.

### **2.1.2 Agregado**

Por constituir em torno de 75% do volume do concreto, a qualidade do agregado é de suma importância, no que diz respeito ao resultado final do produto. Para Neville e Brooks (2013), os agregados, além de limitarem a resistência para concretos de alta resistência, afetam, através de suas propriedades, a durabilidade e o desempenho do concreto.

Por muito tempo, o agregado foi tratado como um material de enchimento inerte do concreto. Mas esta visão vem sendo alterada pela melhor compreensão da função desempenhada pelo agregado na determinação de várias das características do concreto. Metha e Monteiro (2014) relacionam as seguintes características do agregado relevantes para a constituição do concreto: porosidade, composição ou

distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipo de substâncias deletérias presentes.

Todas essas características se originam da composição mineralógica da rocha mãe, das condições a que a rocha foi exposta, antes de produzir o agregado, e do tipo de equipamento usado para a produção do agregado. Petrucci (1998) destaca ainda que os agregados cumprem um importante papel nas argamassas e concretos, tanto economicamente como tecnicamente, destacando-se aspectos característicos como retração e resistência ao desgaste, sem prejudicar a resistência aos esforços mecânicos, pois agregados de boa qualidade superam a resistência da pasta aglomerante.

Neville e Brooks (2013) destacam ainda que, do ponto de vista econômico é interessante produzir concretos com a maior relação possível com o/a agregado/pasta aglomerante. Contudo, deve-se balancear essa relação com o objetivo de se alcançar as propriedades desejadas do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

O Brasil, no ano de 2013, consumiu mais de 600 milhões de toneladas de agregados (15º Congresso brasileiro de mineração, 2013). Esse número expressa a relevância dos estudos voltados para a área de desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos, que venham a mitigar impactos gerados na obtenção do agregado. O Quadro 1 quantifica o consumo de agregados nos estados brasileiros em 2013.

Quadro 1 - Consumo de agregados nos estados brasileiros em 2013

Estado	Consumo de Agregados (ton/ano)	Representatividade (%)	Estimativa de Valor/ano
São Paulo	168.079.812	26,61	R\$ 6.010.337.013,24
Minas Gerais	67.185.545	10,64	R\$ 2.402.476.318,03
Rio de Janeiro	55.065.275	8,72	R\$ 1.969.069.673,14
Paraná	38.389.633	6,08	R\$ 1.372.768.266,45
Rio Grande do Sul	36.136.254	5,72	R\$ 1.292.190.075,37
Bahia	35.436.090	5,61	R\$ 1.267.153.031,63
Santa Catarina	26.739.383	4,23	R\$ 956.168.985,70
Pernambuco	23.368.922	3,70	R\$ 835.645.252,01
Goiás	22.522.241	3,57	R\$ 805.368.932,13
Ceará	19.241.455	3,05	R\$ 688.051.871,30
Pará	17.710.219	2,80	R\$ 633.296.667,23
Distrito Federal	14.573.323	2,31	R\$ 521.124.944,10
Maranhão	14.388.769	2,28	R\$ 514.525.509,44
Espírito Santo	13.008.346	2,06	R\$ 465.163.201,43
Mato Grosso	10.796.489	1,71	R\$ 386.069.788,38
Espírito Santo	9.602.763	1,52	R\$ 343.383.546,19
Paraíba	8.736.989	1,38	R\$ 312.424.483,02
Rio Gde. Do Norte	8.377.007	1,33	R\$ 299.551.948,76
Mato Grosso do Sul	7.940.052	1,26	R\$ 283.926.950,27
Rondônia	6.910.196	1,09	R\$ 247.100.507,15
Piauí	6.703.706	1,06	R\$ 239.716.666,85
Alagoas	6.656.138	1,05	R\$ 238.015.690,94
Sergipe	5.213.289	0,83	R\$ 186.421.102,36
Tocantins	4.315.236	0,68	R\$ 154.307.779,99
Acre	1.856.442	0,29	R\$ 66.384.189,35
Amapá	1.704.023	0,27	R\$ 60.933.864,61
Roraima	1.076.533	0,17	R\$ 38.495.557,91
<b>Total Brasil</b>	<b>631.734.130</b>	<b>100,00</b>	<b>R\$ 22.590.071.817,00</b>

Fonte: 15º Congresso brasileiro de mineração (2013).

### 2.1.3 Classificação dos agregados

Os agregados são classificados conforme sua origem, massa, tamanho, petrografia, forma e textura.

#### 2.1.3.1 Origem

Quanto à sua origem os agregados são classificados como naturais ou artificiais.

Para Bastos (2002), tratam-se de agregados naturais aqueles encontrados juntos à natureza sob a forma de agregado pronto para o uso, dando-se destaque para as areias encontradas em minas ou cursos d'água, pedregulhos ou seixos rolados.

Em paralelo, o autor classifica como agregados artificiais aqueles que necessitam ser beneficiados por maquinário apropriado, com a finalidade de obter fragmentos adequados ao uso específico, normalmente com granulometria controlada, destacando-se pedras britadas e areias artificiais.

Por outro lado, Metha e Monteiro (2014) classificam como agregados artificiais os materiais termicamente processados como argila e folhelho expandido, que são utilizados para a produção de concretos leves. Os autores ainda citam os agregados produzidos a partir de rejeitos industriais, como a escória de alto forno e as cinzas volantes, como pertencentes a esta categoria. Para Metha e Monteiro (2014) as pedras britadas são consideradas agregados naturais por serem procedentes de jazidas naturais.

### **2.1.3.2 Massa**

Quanto à massa específica aparente, Petrucci (1998) classifica os agregados entre leves (pedra-pomes, vermiculita, argila expandida, etc.), normais (areias, seixos, pedras britadas) e pesadas (barita, magnetita, limonita).

Bastos (2002) sugere a seguinte classificação:

- a) leves: massa inferior a  $1 \text{ t/m}^3$ : argila expandida, vermiculita, poliestireno
- b) expandido, etc.;
- c) normais: massa de 1 a  $2 \text{ t/m}^3$ : areia, seixo, brita, etc.;
- d) pesados: massa superior a  $2 \text{ t/m}^3$ : barita, magnetita, limonita, etc..

### **2.1.3.3 Dimensão**

Quanto ao tamanho, pode-se classificar o agregado como gráudo ou miúdo. Petrucci (1998) destaca como a classificação mais importante do agregado, pelo comportamento bastante distinto entre os dois tipos quando aplicados ao concreto.

A NBR 7211:2009 classifica o agregado quanto ao tamanho, da seguinte forma:

- a) agregado miúdo: areia natural, artificial ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,8 mm, com possibilidade de retenção de 5%, e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm;
- b) agregado graúdo: pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos em peneira com abertura de malha 4,8 mm;
- c) material pulverulento: partículas minerais com dimensões inferiores a 0,075 mm, inclusive os materiais solúveis em água presentes nos agregados, definida na NBR 7219 vigente;
- d) outros: brita corrida, pedra de mão e pedra amarrada.

Petrucci (1998) elaborou as seguintes definições, que considerou importante para o campo dos agregados correntes:

- a) *filler* é o material que passa na peneira nº 200;
- b) areia é o material encontrado junto à natureza, pronto para o uso, que passa pela peneira nº 4;
- c) pedrisco, também denominado de “Areia Artificial”, é o material obtido por fragmentação mecânica da rocha, e que passa pela peneira nº 4;
- d) seixo rolado trata-se de um material natural, encontrado no fundo de rios ou em jazidas, e que fica retido na peneira nº 4;
- e) pedra britada, ou brita, é o material obtido pela fragmentação da rocha e retido na peneira nº 4;

- f) agregado leve é o material com peso unitário inferior a 2.000 kg/m<sup>3</sup>, constituído de pedra-pomes, argila expandida, cinza volante sinterizada, etc..

### 2.1.3.4 Classificação Petrográfica

Segundo Neville e Brooks (2013), os agregados podem ser separados em vários grupos de rochas com características semelhantes (Quadro 2), porém destaca que produtos inadequados podem ser encontrados em todos os grupos, mesmo que alguns sejam mais favoráveis para a produção de concreto.

Quadro 2 - Classificação dos agregados naturais segundo o tipo de rocha

<b>Grupo Basalto</b>	<b>Grupo Xisto</b>	<b>Grupo Gabro</b>
Andesito	Filito	Diorito básico
Basalto	Xisto	Gnaisse básico
Porfiritos Básicos	Folhelho	Gabro
Diabásio	Todas as rochas altamente	Hornblenda
Todos os tipos de doleritos incluindo teralito e teschenito	Cisalhadas	Norito
Epidiorito		Peridotito
Lamprófiro	<b>Grupo Arenito (incluindo</b>	Picrito
Quartzo-dolerito	<b>rochas vulcânicas</b>	Serpentinito
Espilito	<b>fragmentadas)</b>	
<b>Grupo Granito</b>	Arcósio	<b>Grupo Hornfels</b>
Gnaisse	Grauvaca	Todos os tipos de rochas de contato alteradas, exceto mármore
Granito	Arenito	
Granodiorito	Tufo	
Granulito	<b>Grupo Porfirítico</b>	
Pegmatito	Aplito	
Quartzo-diorito	Dacito	
Sienito	Felcito	
<b>Grupo Calcário</b>	Granófiro	
Dolomito	Queratófiro	
Calcário	Microgranito	<b>Grupo Quartzito</b>
Mármore	Pórfiro	Quartzito
<b>Grupo Flint</b>	Quartzo-porfirítico	Arenito quartzítico
Chert	Riólito	Quartzito recristalizado
Flint	Traquito	

Fonte: Neville e Brooks (2013, p. 43).

### 2.1.3.5 Forma

Quanto à forma da partícula, Neville e Brooks (2013) destacam que a forma e a textura superficial da partícula do agregado são de fundamental importância para determinar as características do concreto fresco e endurecido.

Esse aspecto está diretamente relacionado ao desgaste que a partícula foi submetida. No caso de agregado industrializado, esse aspecto é determinado pelas características da rocha-mãe, do tipo de britagem e da taxa de redução. O Quadro 3 mostra uma classificação geral das formas das partículas.

Quadro 3 - Classificação segundo a forma das partículas e exemplos

<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Exemplos</b>
Arredondado	Totalmente desgastado pela ação de água ou totalmente conformado por atrito.	Seixos de rio ou zonas litorâneas marítimas; areia de deserto, de origem eólica ou de litoral marítimo.
Irregular	Normalmente irregular ou parcilamente conformado por atrito com arestas arredondadas.	Outros seixos, <i>flint</i> .
Lamelar	Material em que a espessura é menor que as outras duas dimensões.	Rochas lamelares.
Anguloso	Possuem arestas bem definidas na interseção de faces rasoavelmente planas.	Pedras britadas de todos os tipos, talus e escória britada.
Alongado	Material, em geral, anguloso no qual o comprimento é consideravelmente maior que as outras duas dimensões.	–
Lamelar e alongado	Material com comprimento bem maior que a largura e esta bem maior que a espessura.	–

Fonte: Neville e Brooks (2013, p. 44).

Metha e Monteiro (2014) salientam que a forma se refere às características geométricas como arredondada, angulosa, alongada ou achatada. Destacam que partículas mais angulosas, alongadas e ásperas, quando comparadas às partículas mais lisas e arredondadas, necessitam de mais pasta de cimento para produzir concretos trabaláveis, aumentando o custo.

Enquanto areias de depósitos eólicos, assim como areias e pedregulhos oriundos de leitos de rio tem, normalmente, forma arredondada, rochas britadas apresentam vértices e arestas bem definidas, sendo descritas como angulosas e, geralmente produzem partículas equidimensionais.

### 2.1.3.6 Textura

Para Neville e Brooks (2013), a classificação segundo a textura superficial é baseada no grau de polimento da superfície das partículas, sendo polidas ou opacas, lisas ou ásperas. O tipo de aspereza também deve ser analisado. A textura superficial depende da dureza, de dimensões dos grãos e de características de porosidade da rocha-mãe (rochas duras, densas e grãos finos em geral, resultam em superfícies de fratura lisas), bem como o grau com que as forças atuantes sobre a superfície das partículas as tenham alisado, ou tornado-as ásperas. A avaliação visual da aspereza é bastante aceitável, mas para evitar erros, pode ser adotada a classificação do Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação dos agregados segundo a textura superficial e exemplos

<b>Grupo</b>	<b>Textura superficial</b>	<b>Características</b>	<b>Exemplos</b>
1	Vítrea	Fratura conchoidal.	<i>Fint</i> negro, escória vitrificada.
2	Lisa	Desgastado por água ou alisado devido a fratura de rochas laminadas ou de granulação fina.	Seixos, <i>chert</i> , ardósia, mármore e alguns riolitos.
3	Granular	Fratura mostrando grãos mais ou menos uniformes arredondados.	Basalto, felsito, pórfiro, calcário.
4	Áspera	Fratura áspera de rocha de granulação fina ou média, contendo constituintes cristalinos de difícil visualização.	Basaltos, felsitos, pórfiro, calcário.
5	Cristalina	Presença de constituintes cristalinos de fácil visualização.	Granito, gabro, <i>gnaisse</i> .
6	Alveolar	Com poros e cavidades visíveis.	Tijolo, pedra-pome, escória expandida, clínquer, argila expandida.

Fonte: Neville e Brooks (2013, p. 46).

#### **2.1.4 Caracterização do agregado**

A NBR 7211:2009 define que os agregados devem ser constituídos por partículas de minerais duros, compactos, duráveis e limpos, isentos de materiais que possam afetar a hidratação do cimento ou dar origem a produtos expansivos. Também devem apresentar resistência à compressão superior à da pasta, boa forma e boa graduação.

Os agregados possuem diversas características e propriedades, cujo conhecimento e entendimento são fundamentais para a sua aplicação em concretos. Dentre elas, pode-se destacar a composição granulométrica, a massa específica, a massa unitária, a umidade e a absorção, bem como a presença de impurezas.

##### **2.1.4.1 Composição granulométrica**

O estudo da granulometria faz-se necessária para determinar a graduação ou distribuição das dimensões do agregado. Neville e Brooks (2013) descrevem que a análise granulométrica consiste em classificar, por meio de agitação ou vibração de uma série de peneiras empilhadas em ordem decrescente, uma amostra de agregado seco ao ar. Esse processo se dá por um tempo determinado, de forma que o material retido em cada peneira represente uma fração de material maior que a abertura da peneira em questão e menor que a peneira acima.

É recomendado que se faça composições de agregados miúdos objetivando-se constituir uma granulometria próxima à especificada por norma (PRUDÊNCIO, 1999 apud BASTOS, 2002).

A NBR 7211;2009 descreve os seguintes parâmetros a serem determinados pelo processo de peneiramento:

- a) dimensão máxima característica – corresponde à abertura de malha, em mm, da peneira de série normal ou intermediária, a qual corresponde a uma porcentagem retida e acumulada, igual ou imediatamente inferior a 5% em massa; e,

- b) módulo de finura – é o valor da soma das percentagens retidas, acumuladas nas peneiras de série normal, sem o fundo, dividido por 100.

Quanto ao módulo de finura de agregados miúdos, são considerados valores típicos entre 2,3 e 3,0. Acima destes valores temos um indicativo de um agregado mais grosso. Esse índice é útil na detecção de pequenas variações de granulometria em agregados de mesma origem, que podem interferir na trabalhabilidade.

#### 2.1.4.2 Limites granulométricos

Os limites granulométricos determinados segundo a norma NBR NM 248:2003 devem atender aos limites relacionados nos Quadros 5 e 6.

Quadro 5 - Limites granulométricos do agregado miúdo

Peneiras (mm)	<b>Porcentagem retida acumulada</b>			
	Limite inferior		Limite superior	
	Aceitável	Ótimo	Ótimo	Aceitável
<b>9,50</b>	0%	0%	0%	0%
<b>6,30</b>	0%	0%	0%	7%
<b>4,75</b>	0%	0%	5%	10%
<b>2,36</b>	0%	10%	20%	25%
<b>1,18</b>	5%	20%	30%	50%
<b>0,60</b>	15%	35%	55%	70%
<b>0,30</b>	50%	65%	85%	95%
<b>0,15</b>	85%	90%	95%	100%
<b>0,00</b>	100%	100%	100%	100%

Fonte: NBR 7211;2009, modificado pelo autor.

Quadro 6 - Limites granulométricos do agregado graúdo

Peneiras (mm)	Porcentagem retida acumulada			
	Brita 1		Brita 0	
	Limite Inferior	Limite superior	Limite Inferior	Limite superior
25,00	0%	5%	-	-
19,00	2%	15%	-	-
12,50	40%	65%	0%	5%
9,50	80%	100%	2%	15%
6,30	92%	100%	40%	65%
4,75	95%	100%	80%	100%
2,36	-	-	95%	100%

Fonte: NBR 7211;2009, modificado pelo autor.

#### 2.1.4.3 Aderência

Para Neville e Brooks (2013), tanto a forma como a textura superficial do agregado interferem significativamente na resistência do concreto, principalmente nos concretos de alta resistência, sendo a resistência à flexão mais afetada que a resistência à compressão. Agregados com texturas mais ásperas, área superficial maior, e mais angulosos, possibilitam maior aderência entre as partículas e a matriz de cimento. Agregados mais macios, porosos e com partículas mineralógicamente heterogêneas geram maior aderência, ao contrário de agregados que possuem superfície com textura mais lisa, resistente à penetração da pasta.

Para Metha e Monteiro (2014) as evidências de que durante as primeiras idades, a resistência à flexão do concreto pode ser afetada pela textura do agregado; texturas mais ásperas tendem a gerar uma aderência física mais forte entre a pasta de cimento e o agregado. Contudo, em idades mais avançadas, esse efeito não é tão considerável.

#### **2.1.4.4 Resistência**

Apesar de não ser fácil de determinar a resistência à compressão do agregado é fato que esta não pode ser muito maior do que a resistência da maior parte do agregado constituinte deste concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os autores sugerem que se obtenham informações sobre a partícula de agregado a partir de métodos de ensaios indiretos, como ensaios de esmagamento de amostras preparadas a partir de rocha sã, esmagamento de agregados soltos e desempenho de agregados em concreto. Sendo este último, baseado em experiências anteriores com um determinado agregado ou ainda experimentação de substituição de agregado de qualidade, conhecida em uma determinada composição de concreto pelo agregado em questão.

O autor destaca ainda que a resistência do agregado deve ser significativamente superior à resistência do concreto, visto que as tensões reais nos pontos de contato das partículas podem ser maiores que as tensões de compressão nominal aplicada.

#### **2.1.4.5 Tenacidade**

Representa a resistência do agregado à ruptura por impacto. Seu ensaio é relacionado ao índice de esmagamento.

#### **2.1.4.6 Dureza**

Neville e Brooks (2013) destacam a importância da caracterização da dureza ou resistência ao desgaste do agregado utilizado em concretos destinados às rodovias ou pisos sujeitos a tráfego pesado. Destaca, porém, que não existe nenhum equipamento normatizado para caracterizar o agregado miúdo, e aconselha que seja testada sua degradação através de um ensaio de atrito em condições úmidas para determinar a quantidade de material menor que 75  $\mu\text{m}$  (peneira n° 200) produzida.

No que diz respeito ao agregado graúdo, o autor cita o uso do ensaio de abrasão Los Angeles, que combina processos de atrito e abrasão fornecendo resultados de desgaste real do agregado, relacionado com a resistência, a flexão produzida com o mesmo agregado.

#### **2.1.4.7 Massa Específica**

Segundo Petrucci (1998), define-se massa específica, a massa por unidade do volume, dos grãos dos agregados, excluindo os vazios permeáveis e impermeáveis. Pode ser determinado pelo frasco de Chapman ou picnômetro, seu valor é utilizado no cálculo do consumo de materiais em concretos e argamassas.

#### **2.1.4.8 Massa Unitária**

É a relação da massa total de certo volume de agregados, e esse volume, considerando os vazios existentes entre os grãos do agregado. É por meio dela que podem-se converter as composições das argamassas e concretos dados em massa para volume e vice-versa (Neville e Brooks, 2013).

Submetendo o agregado à condição saturado superfície seca e sabendo a sua massa específica aparente, pode-se obter o índice de vazios pelo uso da

seguinte expressão: índice de vazios =  $1 - \frac{\text{Massa unitária}}{\text{Massa específica aparente SSS}}$

Com isso, consegue-se um indicativo do volume de argamassa necessária para preencher os espaços existentes entre as partículas do agregado graúdo. Esse indicativo pode ser muito útil, no que diz respeito à determinação de um volume mínimo de pasta de cimento, onde busca-se a massa unitária máxima de uma mistura de agregados graúdo e miúdo. Segundo Neville e Brooks (2013), 35 a 40% desta mistura deve ser constituída de agregado miúdo. Desta forma, teremos um menor volume de vazios, o que determinará um consumo menor de cimento.

#### **2.1.4.9 Umidade e absorção**

Outro aspecto destacado por Neville e Brooks (2013), trata-se do teor de umidade do agregado miúdo. Visto que este aspecto modifica de obra para obra, sendo o agregado entregue com variação de umidade, faz-se necessário a constante determinação de seu teor de umidade, tendo como finalidade a correção da quantidade de água que irá ser usada na elaboração do concreto ou da argamassa, assim como a atualização da quantidade de material, sendo esse medido em peso ou em volume. Já no caso de ser medido em volume, a medida sofre alteração em virtude do fenômeno de inchamento.

Segundo Neville e Brooks (2013), porosidade, permeabilidade e absorção dos agregados são determinantes na aderência entre eles e a pasta de cimento, na resistência do concreto ao gelo-degelo, bem como em sua estabilidade química, resistência à abrasão e massa específica.

Considerando que a porosidade em rochas comuns pode variar entre 0 e 50%, e levando em conta que o agregado constitui aproximadamente 75% do volume do concreto, conclui-se que a porosidade do agregado influencia consideravelmente a porosidade final do concreto. Quanto ao teor de umidade, Neville e Brooks (2013) e Petrucci (1998) classificam o agregado da seguinte forma:

- a) completamente seco ou seco em estufa, quando sofre secagem prolongada em estufa para a retirada total da umidade;
- b) seco ao ar, quando exposto ao ar seco, o que elimina a umidade superficial, mantendo a umidade interna, mas não de forma saturada;
- c) saturado superfície seca, quando todos os poros do agregado encontram-se cheios, porém, a superfície está seca;
- d) úmido ou saturado quando apresenta água na superfície e os poros totalmente cheios.

#### **2.1.4.10 Inchamento**

Petrucci (1998) descreve que o fenômeno do inchamento é motivado pela película de água que adere ao grão do agregado miúdo, provocando o afastamento entre eles, causando aumento no volume do material. O grau de inchamento é determinado pela composição granulométrica e pelo teor de umidade, sendo maior para areias finas que possuem maior superfície específica.

Destaca ainda, que o inchamento máximo ocorre para o grau de umidade entre 4 e 6%, tendendo, a partir destes teores, a praticamente anular-se com a areia saturada. Segundo o autor, a pesquisa realizada com 558 amostras de areia retiradas de obras de Porto Alegre, aponta que a maioria das amostras (95,7%) possuía teor de umidade entre 2 e 7%, sugerindo uma simplificação na utilização dos dados para aplicação prática em obra.

Para Metha e Monteiro (2014) o fato da maioria das areias serem entregues no canteiro de obra com teor de umidade saturado, implica na possibilidade de ocorrerem grande variação na dosagem do concreto, o que tem levado à adoção de dosagem por massa na maioria dos países.

#### **2.4.1.11 Impurezas**

A presença de material pulverulento constituído de argila e *silte*, em volume acima do tolerado por norma, podem trazer efeitos nocivos ao concreto. A argila forma uma película que envolve o grão do agregado, interferindo na aderência entre o agregado e a pasta de cimento. Petrucci (1998) e Neville e Brooks (2013) salientam ainda, que o excesso de grãos finos gera um aumento da área superficial, ocasionando maior consumo de água, e conseqüente no enfraquecimento do concreto.

#### **2.1.5 Água**

É comum dizer que toda água potável pode ser utilizada para a produção de

concreto. Porém, nem toda a água que pode ser usada para esse fim, pode ser consumida pelo homem. Neville e Brooks (2013) destacam que o critério da potabilidade da água não é absoluto, pois águas com grande concentração de sódio e potássio podem interferir na reação álcali-agregado.

Segundo Petrucci (1998), a água de amassamento não pode conter impurezas que possam interferir negativamente nas reações com os compostos do cimento. Por outro lado, o autor destaca que pequenas quantidades de impurezas podem ser toleradas no processo. Ambos os autores destacam que águas de reuso podem ser utilizadas para a elaboração do concreto. Para tanto, faz-se necessário que se façam avaliações desta água comparando concretos elaborados com a mesma, e até concretos elaborados com água de qualidade conhecida.

Destacam ainda que é possível utilizar água do mar para a produção de concreto simples, no entanto, para caso de concreto armado, não aconselham sua utilização devido ao aumento do risco de corrosão da armadura. Sugerem ainda que se utilizem águas com pH (grau de acidez) entre 6,0 e 8,0, e teor de *silte* inferior a 0,2%.

#### **2.1.6 Aditivos**

Para Metha e Monteiro (2014) a constatação de que as propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido, podem ser alteradas com a adição de materiais à mistura do concreto tem sido determinante para a evolução da indústria de aditivos e adições para concreto nos últimos 60 anos.

Esses aditivos são comumente usados para melhorar a trabalhabilidade, acelerar ou retardar o tempo de pega, controlar o desenvolvimento da resistência mecânica e intensificar a resistência à ação do congelamento, fissuração térmica, expansão álcali-agregado, ataque por sulfato e resistência à corrosão da armadura.

Segundo Neville e Brooks (2013), em alguns casos, a incorporação de aditivos é a única maneira de se obter um determinado efeito no concreto.

Os autores destacam os seguintes aditivos e seus efeitos:

- aceleradores: aceleram o desenvolvimento da resistência inicial do concreto;
- retardadores de pega: têm efeito contrário aos aceleradores, retardando o endurecimento do concreto;
- redutores de água (plastificantes): são usados com três propósitos – aumentar a resistência do concreto endurecido pela diminuição da relação água/cimento para um abatimento constante; manter a mesma trabalhabilidade com menos teor de cimento na mistura; e, reduzir o calor de hidratação em concretos de massa e aumentar a trabalhabilidade com o objetivo de facilitar o lançamento;
- superplastificantes: trata-se de redutores de água de alto desempenho, que possibilitam dosagens normalmente maiores do que os plastificantes comuns, com redução significativa de possíveis efeitos colaterais indesejados. Normalmente usados para a elaboração de concretos fluídos ou de alta resistência.

## **2.2 Propriedades do concreto fresco**

A classificação dos materiais e sua devida dosagem são de fundamental importância para se produzir concretos que atendam às especificações pré-estabelecidas em projeto. Mas de nada adianta seguir estas regras se não for dada a devida atenção aos processos que o concreto é submetido nas primeiras idades.

Este período é muito curto se comparado à perspectiva de vida útil do concreto. No entanto, Metha e Monteiro (2014) destacam que neste período, várias operações são realizadas, como mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e desmoldagem. Segundo os autores, todos estes processos são influenciados pelas características do concreto fresco, como trabalhabilidade e tempo de pega, sendo de fundamental importância o devido controle das operações e das propriedades do concreto fresco nas primeiras idades.

A negligência a estes aspectos, podem causar deficiência no concreto fresco, como perda de trabalhabilidade no lançamento, segregação e exsudação durante o adensamento, assim como perda na resistência, e conseqüente, prejuízo ao produto final, com significativa redução da vida útil.

### **2.2.1 Trabalhabilidade**

Petrucci (1998) resume trabalhabilidade como a propriedade do concreto fresco que identifica variação de possibilidade de ser usado para determinada finalidade, sem sofrer perda de homogeneidade.

Já Neville e Brooks (2013) e Metha e Monteiro (2014) definem trabalhabilidade como a quantidade de trabalho interno útil exigido para manipular e adensar o concreto fresco, com o mínimo de perda de homogeneidade.

É consenso entre os autores citados acima a influência da consistência do concreto na sua trabalhabilidade. Segundo Neville e Brooks (2013) a capacidade do concreto em manter sua forma ou a facilidade com que ele flui é algumas vezes associada à medida do grau de umidade. Dentro de certos parâmetros, concretos com maior quantidade de água são mais trabalháveis que concretos secos. Por outro lado, destaca que concretos com a mesma consistência podem apresentar trabalhabilidade diferente.

Para Petrucci (1998) fatores que interferem na trabalhabilidade podem ser internos, relacionados aos materiais, suas características e dosagens; ou externos, quando relacionados a agentes envolvidos no processo, como forma de mistura, tipo de transporte, lançamento e adensamento, bem como a característica das peças a serem moldadas. A seguir, alguns exemplos:

- internos:
  - a) consistência, que pode ser relacionada ao fator água/cimento ( $a/c$ ), ou ao teor de água/material seco ( $a/s$ );
  - b) proporção entre cimento e agregado (traço);

- c) proporção entre agregado graúdo e miúdo (Granulometria);
  - d) forma do grão do agregado (natural ou artificial);
  - e) aditivo plastificante.
- externos:
    - a) tipo de mistura (manual ou mecanizada);
    - b) tipo de transporte (quanto ao sentido, vertical ou horizontal ou quanto ao meio, como guinchos, calhas ou bombas);
    - c) tipo de lançamento, sendo de pequena ou grande altura;
    - d) tipo de adensamento;
    - e) dimensão e armadura da peça a executar.

Metha e Monteiro (2014) consideram mais apropriado o estudo dos fatores que afetam a consistência e a coesão, visto que estes dois componentes da trabalhabilidade podem sofrer interferência de formas opostas, pela modificação de uma variável específica.

Os autores destacam ainda, que manualmente, a trabalhabilidade das misturas de concreto é afetada pelo consumo de água ou de cimento, pela granulometria do agregado, e suas características físicas, pelos aditivos, adições, e pela perda de abatimento, conforme descrito a seguir.

- a) Consumo de água: para uma dimensão máxima característica do agregado graúdo, independente de outros fatores, como granulometria do agregado e consumo de cimento, a consistência ou o abatimento do concreto está diretamente relacionado com a quantidade de água da mistura. Misturas muito fluídas tendem a segregar ou exsudar, enquanto consistências muito secas podem ser difíceis de lançar e adensar, ocorrendo segregamento do agregado graúdo no lançamento.
- b) Consumo de cimento: para uma determinada quantidade de água, a diminuição considerável do consumo de cimento pode gerar concretos

- c) ásperos com acabamento irregular. Por outro lado, misturas com elevado consumo de cimento, ou alta proporção de finos, produz concreto com excelente coesão, porém com viscosidade elevada.
- d) Característica do agregado: tanto o tamanho como a forma dos agregados influencia na quantidade de água necessária para atingir determinada consistência. Segundo os autores, ao se fazer uso de areias muito finas e angulosas (areia industrializada), faz-se necessário aumentar em 2 a 3% o volume do agregado miúdo, e 5 a 10 kg/m<sup>3</sup> de água, comparando-se ao mesmo abatimento que seria atingido usando areia natural.
- e) Aditivos e adições: para uma quantidade de água constante, a introdução de aditivos redutores de água aumenta o abatimento, tornando o concreto mais fluído. Isto se dá pela incorporação de ar na pasta, o que aumenta seu volume, melhorando assim a consistência do concreto. A coesão melhora à medida que ocorre a diminuição da exsudação e da segregação. O efeito do aditivo se torna mais perceptível em misturas ásperas e de trabalhabilidade reduzida. As adições pozolânicas tendem a reduzir a exsudação e aumentar a coesão do concreto. Já o uso de cinzas volantes, em substituição parcial ao agregado miúdo, normalmente aumenta a consistência para um dado consumo de água.

Metha e Monteiro (2014) indicam a necessidade de relacionar a trabalhabilidade do concreto ao tipo de construção e o método de lançamento, adensamento e acabamento. Os autores exemplificam que um concreto que é adequado para uso em uma fundação maciça, sem segregar, poderá ser impróprio para uso em uma peça esbelta. Um concreto que pode ser trabalhado com o uso de vibradores mecanizados, pode não ser trabalhável manualmente.

Segundo Metha e Monteiro (2014) a complexidade das propriedades do concreto relacionadas à trabalhabilidade, assim como sua natureza composta, associada à dependência do tipo de construção e dos métodos construtivos, faz com que não se tenha hoje um método único para definir tal propriedade do concreto

resco. No entanto, o procedimento universalmente mais utilizado é o ensaio de abatimento de tronco de cone.

Os autores citam o uso do ensaio de Vebe, indicado para misturas mais secas, e o ensaio do fator de compactação, que procura avaliar a característica de compactabilidade de uma mistura de concreto.

### **2.2.2 Perda de abatimento**

A perda de abatimento é conceituada por Metha e Monteiro (2014), assim como por Petrucci (1998), como a perda de consistência do concreto fresco com o passar do tempo, e sem conseqüente enrijecimento.

Este é um fenômeno normal que ocorre com o concreto, sendo influenciado por fatores como tempo, temperatura, composição do cimento e dos aditivos ou adições presentes.

A perda de abatimento ocorre quando a água livre é consumida pela reação de hidratação, por adsorção na superfície dos produtos de hidratação e por evaporação. Nos primeiros 30 minutos, após a adição da água ao cimento, considerando-se condições normais, as reações de hidratação são pequenas, com perda de abatimento desprezível.

A partir disso, as reações se intensificam, gerando a perda de abatimento a uma determinada taxa, definida pelos fatores citados anteriormente. Segundo Petrucci (1998), uma temperatura mais elevada aumenta a perda de abatimento, reduzindo a sua trabalhabilidade.

Metha e Monteiro (2014) destacam o uso de técnicas desenvolvidas em campo, que consiste em estipular um abatimento inicial maior do que o necessário para a concretagem ou adicionar mais água, mantendo o a/c pré-definido, imediatamente antes de lançar e remisturar o concreto completamente.

Contudo, os autores destacam a necessidade de um rigoroso controle de canteiro de obra, pois a adição descontrolada de água é motivo de várias falhas de desempenho do concreto. No que diz respeito à perda de abatimento inicial, faz-se

necessário o estudo caso a caso, visto que segundo os autores, a perda de abatimento é proporcional ao abatimento inicial, o que em muitos casos, pode inviabilizar o uso desta técnica.

### **2.2.3 Segregação e exsudação**

Conforme Neville e Brooks (2013) e Metha e Monteiro (2014) a segregação consiste na separação dos componentes de uma mistura heterogênea de concreto fresco, de tal forma que sua mistura deixe de ser uniforme.

A segregação se dá normalmente em misturas de concretos secos ou muito fluído, onde ocorre a separação do agregado graúdo da argamassa.

Para Metha e Monteiro (2014), a exsudação trata-se de um tipo de segregação, que ocorre em concretos muito fluídos, motivado pela incapacidade dos sólidos presentes na mistura reterem a água de amassamento, acabando estes, direcionados para o fundo da fôrma, enquanto a água, com menor massa específica, tende a subir a superfície.

Parte desta água pode ficar retida sob o agregado graúdo ou até mesmo sob a armadura, causando perda de resistência nestas áreas. A exsudação interfere também na variação de resistência entre a parte superior e inferior de um mesmo elemento. A base de um pilar tende a ter mais resistência do que o topo, por exemplo.

Segundo os autores, outro aspecto negativo deste fenômeno se manifesta em laje de piso ou pavimento. Ao subir a superfície a água carrega consigo partículas mais finas de cimento, areia e argila, criando uma nata superficial, com elevada relação água cimento, sendo, portanto, porosa, mole e pouco resistente. Essa camada mole fica sujeita à pulverulência, carbonatação ao ar, e acaba por resultar em uma ligação fraca, pouco aderente com a próxima camada.

#### **2.2.4 Massa específica do concreto fresco**

Neville e Brooks (2013) destacam como comum a determinação da massa específica do concreto fresco, como forma de avaliação da trabalhabilidade ou do teor de ar. Obtém-se a massa específica através da pesagem do concreto fresco, compactado em um recipiente padrão de volume e massa conhecidos.

Uma vez conhecida a massa específica em  $\text{kg/m}^3$ , o volume de concreto pode ser definido a partir da massa dos ingredientes. Desta forma, é possível definir a produção de concreto por betonada.

#### **2.3 Propriedades do concreto endurecido**

Para Neville e Brooks (2013) e Metha e Monteiro (2014) tem-se por tendência considerar a resistência do concreto como sua principal característica, embora, dependendo do caso, características como durabilidade, impermeabilidade e estabilidade de volume possam ser definidas como mais importantes. A resistência pode transmitir uma boa ideia da qualidade do concreto, por estar diretamente relacionada à microestrutura da pasta de cimento.

Bastos (2002) apud Neville (1997), destaca a aderência entre o agregado e a pasta de cimento como de fundamental importância na determinação da resistência do concreto, em especial, a resistência à flexão. Destaca que mesmo não sabendo ao certo a origem desta aderência, sabe-se que está relacionada em parte, à aspereza da superfície da partícula do agregado.

Logo, superfícies mais ásperas, geram maior aderência. A qualidade desta aderência é de difícil determinação. Bastos (2002) destaca que quando a aderência for satisfatória, o corpo de prova rompido deve apresentar algumas partículas de agregado rompido. Por outro lado, se muitas partículas estiverem rompidas, será um indicador de baixa resistência do agregado.

Segundo Petrucci (1998) pode-se elaborar concretos com elevada resistência à compressão, porém, quando comparado a resistência à tração e flexão, o concreto perde muita eficiência. A capacidade de resistir à tração pode chegar a 10% do valor

da resistência à compressão, enquanto a resistência à flexão fica em aproximadamente 20% de compressão.

Para o autor, os seguintes fatores são determinantes para a resistência do concreto:

- a) relação  $a/c$ ;
- b) idade;
- c) forma e graduação dos agregados;
- d) tipo de cimento;
- e) forma e dimensão dos corpos de prova;
- f) velocidade de aplicação da carga de ensaio;
- g) duração da carga.

De modo geral, pode-se dizer que a resistência do concreto é inversamente proporcional à relação  $a/c$ , sendo consenso que este fator é o principal agente que interfere no processo de resistência.

Metha e Monteiro (2014) destacam que embora seja de conhecimento comum a significância da interferência do  $a/c$  na obtenção de uma resistência específica de concreto, outros fatores devem ser considerados, como adensamento e condições de cura, mineralogia e dimensões do agregado, tipos de aditivos, adições, condições de umidade e geometria do corpo de prova, tipo de tensão e velocidade de carregamento. Os autores relacionam ainda a interferência da porosidade dos componentes da microestrutura do concreto, que podem se tornar um limitante da resistência.

Em paralelo, indicam uma relação inversa entre porosidade e resistência dos materiais sólidos. No entanto, ressaltam que no caso do concreto, a situação é mais complicada, visto a presença de microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz, tornando a definição da relação porosidade/resistência complexa e imprecisa.

A Zona de transição é destacada por Metha e Monteiro (2014), assim como por Aïticin (1938) e Neville e Brooks (2013) como a fase limitante da resistência do concreto. Aïticin (1938) destaca que devido ao “efeito parede” localizado, existe acúmulo de porção de água na superfície da parede do agregado, implicando no aumento proporcional do a/c nesta região, em função de regiões mais afastadas. Desta forma, a zona de transição acaba por se caracterizar pela presença de grandes poros e grandes produtos cristalinos de hidratação. O autor sugere, que a redução da relação a/c, e o uso de sílica ativa tendem a diminuir a espessura e a debilidade da zona de transição, o que implica numa melhor transferência efetiva de tensões entre a pasta de cimento e o agregado. Desta forma, a zona de transição deixaria de ser a zona mais fraca do composto do concreto, não sendo a primeira a colapsar quando exposta às tensões crescentes.

Segundo Metha e Monteiro (2014), a durabilidade do concreto está diretamente associada à zona de transição. A taxa de corrosão do aço está intensamente relacionada à permeabilidade do concreto.

Segundo o autor, a presença de microfissuras na zona de transição entre o aço e o agregado graúdo é o maior motivador para uma maior permeabilidade do concreto frente à pasta de cimento hidratada, ou a argamassa correspondente.

Neville e Brooks (2013) afirmam que a resistência da zona de transição pode aumentar com o tempo motivado pela reação tardia entre o  $\text{Ca(OH)}_2$ , que está presente na superfície do agregado, e pozolanas, como a sílica ativa, que possuem partículas mais finas que o cimento.

É comum utilizar a idade de 28 dias para o teste de resistência mecânica em corpos de prova, no entanto, é possível ter um indicativo confiável com testes em idades menores, como três e sete dias.

Petrucci (1998) indica as seguintes relações entre as resistências mecânicas e a compressão, onde:

a)  $f_{c28} = 1,25 \text{ a } 1,50 f_{c7}$ ;

b)  $f_{c7} = 1,35 \text{ a } 1,65 f_{c3}$ ;

c)  $f_{c28} = 1,70 \text{ a } 2,50 f_{c3}$ .

O autor destaca que o coeficiente varia inversamente conforme o valor da resistência do concreto, ou seja, concretos com maior resistência, tendem a ter uma resistência inicial proporcionalmente maior do que concretos de baixa resistência.

Para Metha e Monteiro (2014) o excesso de atenção sobre a relação a/c e resistência tem causado negligências como a desconsideração da influência do agregado no processo. Não diretamente pela influência direta da resistência do agregado, que normalmente é maior, salvo em casos de agregados leves, do que a resistência da matriz e sua interface com o agregado, mas sim, por outras características do agregado, como dimensão, forma, textura superficial, granulometria e mineralogia.

Estas características acabam, muitas vezes, influenciando no a/c. Na teoria, mesmo mantendo-se o a/c constante, a dimensão, forma, textura superficial e mineralogia das partículas do agregado terão impacto na zona de transição e na interface, afetando a resistência do concreto.

Aditivos incorporadores de ar têm efeito variado, no que diz respeito à resistência. Enquanto em concretos de baixa resistência (< 25 MPa), propiciam uma melhor trabalhabilidade, e conseqüente, um melhor adensamento, aumentando a resistência. Em concretos de maior resistência, causam efeito contrário, reduzindo a resistência pelo efeito do aumento do índice de vazios, que aumenta a porosidade do concreto.

Para um a/c determinado, a utilização dos aditivos redutores de água, melhoram a taxa de hidratação do cimento e o desenvolvimento da resistência inicial. Para Metha e Monteiro (2014), aditivos capazes de acelerar ou atrasar a hidratação de cimento certamente contribuem para o aumento da taxa de resistência.

Outro fator determinante na resistência são as condições de cura a que foi submetido o concreto. Para um determinado a/c, a porosidade de uma pasta de cimento está diretamente relacionada com a taxa de hidratação do cimento. Essa taxa de hidratação cai significativamente quando os produtos da hidratação

envolvem os grãos de cimento não hidratados. Metha e Monteiro (2014) afirmam que a hidratação do cimento ocorre plenamente sobre condições saturadas. Os autores sugerem o uso de técnicas como aspersão de água e molhagem, ou a cobertura da superfície do concreto com areia, serragem ou manta de algodão molhados com o objetivo de efetuar a cura úmida.

Tanto Neville e Brooks (2013), como Metha e Monteiro (2014), apontam que as altas temperaturas do concreto, nas primeiras idades, contribuem positivamente para o ganho de resistência em curto prazo, mas prejudicam a longo prazo. O primeiro autor explica que a rápida hidratação inicial gera uma desuniformidade de distribuição do gel de cimento, gerando uma estrutura física mais fraca, certamente mais porosa, do que em temperaturas comuns. Já Metha e Monteiro (2014), salientam que concretos moldados e curados em temperaturas significativamente baixas ( $<5^{\circ}\text{C}$ ), tendem a sofrer significativa perda de resistência em relação a concretos moldados e curados em temperaturas mais elevadas (entre  $21$  e  $46^{\circ}\text{C}$ ). Testes apontam que a exposição do concreto às temperaturas baixas durante os processos e tempos acima descritos, pode causar perda de resistência na ordem de 80%.

#### **2.4 Areia Industrializada**

Segundo Petrucci (1998), pode-se descrever a areia industrializada, também referenciada como areia artificial, o agregado miúdo, extraído de rochas, através do uso de trabalho mecânico aplicado por máquinas apropriadas, as quais realizam a fragmentação dos blocos maiores em partículas de menor tamanho. O autor destaca que as melhores areias artificiais são as provenientes de granitos e rochas com alto teor de sílica, sendo as provenientes de basalto constituídas geralmente por grãos em forma de placas ou agulhas, que tendem a produzir argamassas menos trabalháveis.

Para Oahshi (2006) apud Teodoro (2013) este agregado desconhecido tecnicamente por muitos profissionais não tem sua utilização iniciada recentemente, sendo usada desde os anos 40, no Brasil.

No entanto, por se tratar de um agregado extraído de rochas de características físico-químicas diferentes, e que sofrem processos de fragmentação com uso de maquinários distintos, faz-se necessário um intenso estudo caso a caso, pois como visto nos capítulos anteriores, as características do agregado podem interferir significativamente no concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Segundo Teodoro (2013) o elevado consumo de areia (aproximadamente 30% do volume do concreto é constituído por areia) no processo de fabricação de concreto e argamassa, principalmente nos grandes centros, aliado ao atual cenário de escassez e elevado custo da areia natural nestes locais, força o mercado a buscar soluções viáveis para a questão.

De acordo com Bastos (2002), países como Alemanha, Inglaterra e Japão sofrem com o esgotamento dos agregados, tendo que os transportar por via marítima de países vizinhos. No Brasil, este fenômeno pode ser observado na região metropolitana de São Paulo, maior consumidor de agregados do país.

O Quadro 7, expõe a representatividade do consumo de areia per capita no continente americano no ano de 2013, confirmando a elevada representatividade deste agregado, no que diz respeito à mineração.

Quadro 7 - Consumo *per capita* de minerais não metálicos na América em 2013



Fonte: Fensterseifer (2015).

Experimentos foram realizados por Bastos (2002), utilizando areia basáltica extraída na região de Campo Grande/MS. O estudioso elaborou traços com substituição de 15, 30, 50 e 70% de areia natural por industrializada, analisando a caracterização dos agregados, dosagem do concreto com manutenção de abatimento, resistência mecânica à compressão, à tração, à absorção de água e à profundidade de carbonatação. Abaixo, as conclusões do autor.

- Referente aos agregados:
  - a) a areia normalmente utilizada para confecção de concreto e argamassa na região de Campo Grande/MS, apresenta uma granulometria abaixo da zona muito fina;
  - b) a areia artificial basáltica utilizada no trabalho foi classificada como areia grossa (zona 4), de acordo com a norma NBR 7211:1983;
  - c) a substituição da areia natural pela artificial, em todas as faixas, trouxe melhorias na distribuição granulométrica, ficando a mistura com 70% de areia artificial, classificada de acordo com a norma NBR 7211:1983 como areia média (zona 3);
  - d) a utilização de agregados miúdos com classificação média (zona 3) apresentou o melhor desempenho em relação à resistência e durabilidade;
  - e) a areia natural apresentou um módulo de finura de 1,12 e com a substituição, este aumentou gradativamente, sendo que para 70% de substituição atingiu 2,63. Isso resultou em menor quantidade de água de mistura, motivada pela redução da superfície específica que está relacionada ao tamanho do agregado;
  - f) a areia natural apresentou um coeficiente de inchamento menor que da areia artificial, devido a menor quantidade de finos presentes neste agregado;

- g) o teor de material pulverulento dos agregados miúdos usados no concreto, ficou entre 3 e 5%, permitido pela NBR 7211:1983, que estava em vigor na época do experimento;
  - h) a brita 1, apresentou uma quantidade de material pulverulento acima do permitido pela norma, sendo o máximo de 1%.
- Referentes ao concreto fresco:
    - a) experimentos com até 50% de substituição de agregado natural não apresentaram redução do abatimento. Com 70% de substituição, ocorreu uma perda de 30% de abatimento;
    - b) ao utilizar 70% de substituição de areia artificial, a relação a/c foi reduzida em média de 10%;
    - c) a quantidade de ar incorporado foi inversamente proporcional ao teor de substituição de areia artificial, atingindo uma média de 19% em relação ao concreto de referência;
    - d) o consumo de cimento aumentou proporcionalmente ao teor de substituição do agregado.
  - Referentes ao concreto endurecido:
    - a) as resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral aumentaram à medida que se aumentou a substituição, chegando um aumento de 56% com substituição de 70% em relação ao traço de referência. O autor explica que esse efeito se deu devido ao aumento do consumo de cimento e redução da relação a/c;
    - b) a substituição gerou uma diminuição da absorção de água por imersão, da absorção de água por capilaridade, da ascensão capilar máxima de água e da profundidade de carbonatação. Segundo o autor, pela redução do a/c, e conseqüente redução da porosidade.

Pimenta (2012) também destaca o alto teor de finos encontrado na areia industrializada (17,35%), o que faz necessário interferir no a/c para manter o mesmo

abatimento alcançado, quando utilizada somente areia natural. Em experimento realizado pelo autor, substituindo 30% da areia natural por industrializada, constatou perda de abatimento e alteração no a/c para manter o abatimento constante. A alternativa escolhida para estabilizar esta alteração é incorporar aditivo plastificante à mistura. Em ambos os casos teve acréscimo na resistência à compressão, objetivo do seu estudo.

Um comparativo experimental realizado por Lang (2006) apontou que tanto areias industriais lavadas como não lavada, utilizadas nas misturas de concreto, apresentaram granulometria em desacordo com a norma em vigor da época.

O autor aponta que embora a areia não lavada, usada nos testes, tenha apresentado índice de finos acima do permitido pela norma, ela se comportou de forma mais satisfatória no que diz respeito à eficiência na produção de concreto, obtendo maior resistência à tração, consumindo menos aditivo plastificante e afetando menos a relação a/c.

## **2.5 Dosagem do concreto**

Normalmente, características como resistência e abatimento do concreto, são definidas pelo projetista da obra. Para que estas especificações mínimas sejam satisfeitas, faz-se necessário estipular traços de mistura para os componentes do concreto. Para Petrucci (1998), o traço é definido tendo-se como unidade o cimento, sendo este relacionado com as demais quantidades.

Para Neville e Brooks (2013, p.356) “dosagem pode ser definida como o processo de seleção dos componentes adequados e a determinação de suas proporções com o objetivo de produzir um concreto econômico, que tenha algumas propriedades mínimas, particularmente trabalhabilidade, resistência e durabilidade”.

Metha e Monteiro (2014) salientam que embora existam normas técnico-científicas que especifiquem os procedimentos de dosagem, inúmeros motivos fazem com que o processo não fique por completo no campo da ciência. Outro aspecto destacado pelos autores, trata-se do custo do concreto, que consideram óbvia a consideração de optar por materiais mais baratos, quando for constatado

igualdade de eficiência entre eles. Salientam também, que seja dado o devido enfoque à dosagem do cimento, em virtude de seu custo ser muito maior do que o agregado. Um cuidadoso estudo, com a aplicação de técnicas apropriadas que possibilitem reduzir a proporção de cimento na mistura, sem implicar na perda das características mínimas exigidas, provavelmente terá um impacto considerável no custo final do concreto.

Estudo comparativo entre métodos de dosagem, realizado por Boggio (2000), indicam o método IPT/USP, este sendo o mais indicado quando não se dispõe de grande quantidade de recursos laboratoriais e tempo. Oferecendo eficácia e rapidez para determinar, de forma experimental, traços com teor de argamassa e padrões de trabalhabilidade definidas para cada obra. O autor destaca ainda que se trata de um método que não exige grande quantidade de ensaios, tornando-se mais prático e de fácil execução. Baseia-se principalmente em conceitos como Lei de Abrams, que relaciona o  $a/c$  com a resistência, e a Lei de Lyse, que associa o  $a/c$  com o  $ag/c$  em massa.

Helene e Terzian (1993) apontam que o parâmetro mais importante do concreto é o  $a/c$ . Com esse parâmetro definido, em conjunto com certos materiais, a resistência e a durabilidade passam a ser únicas. Os autores destacam que quanto maior a dimensão máxima característica do agregado graúdo, mais econômico é o concreto.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O RB analisado foi fornecido por britagem localizada no município de Vespasiano Corrêa/RS (Figura 1). Essa areia é comercializada pela empresa com a denominação de pó de brita, e tem sua principal destinação para a pavimentação e a confecção de blocos de concreto, sendo pouco utilizada para a produção de concreto com fim estrutural. A própria empresa tem utilizado a areia em algumas obras para produção de concreto e argamassa, mas sem fazer um estudo prévio aprofundado, optando por dosagens empíricas.

Figura 1 – Britagem localizada em Vespasiano Corrêa/RS



Fonte: Do autor (2016).

- Processo de industrialização

O RB é extraído do Riodacito, conhecido também como Basalto Carijó, sendo classificado dentro do grupo dos basaltos. Trata-se de uma rocha acinzentada clara (Figura 2), com provável teor de sílica elevado, em virtude de se tratar de rocha ácida.

Figura 2 - Rocha de Riodacito (Basalto Carijó) encontrada na britagem localizada em Vespasiano Corrêa/RS



Fonte: Do autor (2016)

O processo de mineração da rocha segue o seguinte roteiro:

- a) desencaxe da rocha do seu local de origem, sendo utilizado o uso de explosivos introduzidos em planos de furos, para a liberação dos blocos de pedra;
- b) carregamento e transporte dos blocos, de forma mecânica, até o complexo de britagem (Figura 3);

Figura 3 - Carregamento dos blocos de rocha na jazida



Fonte: Do autor (2016).

- a) introdução dos blocos de rocha na calha que alimenta o britador, sendo descarregado diretamente pelo caminhão caçamba (Figura 4);

Figura 4 - Caminhão caçamba alimentando o britador



Fonte: Do autor (2016).

- b) fragmentação primária da rocha realizada por britador tipo Mandíbula, Bocal 80 x 50 cm, marca BRIMAQ, modelo BR 80 50 (FIGURA 5),

- c) originando um material de maior granulometria, com algum teor de finos, denominada rachão, pela empresa (Figura 6);

Figura 5 - Britador de mandíbula fragmentando blocos



Fonte: Do autor (2016).

Figura 6 – Fragmento denominado “Rachão” pela empresa



Fonte: Do autor (2016).

- d) esse material é transportado por esteira até um britador de cone, Marca Barber Greene, modelo 365 (Figura 7), onde é realizada a britagem secundária, que executa fragmentação com dimensão final mais reduzida;

Figura 7 - Britador de cone que realiza a britagem secundária



Fonte: Do autor (2016).

- e) esses fragmentos menores são transportados por esteira para peneira vibratória 3 decks (Figura 8), que possibilita classificar o material em “pó de brita” (material passante), Brita 0, Brita1 e Brita 2. Atualmente, a Brita 2 não é produzida pela empresa, sendo o material grosso retido e vendido para outra empresa da região para ser usado como sub-base para pavimentação (Figura 9);

Figura 8 - Peneira vibratória 3 decks.



Fonte: Do autor (2016).

Figura 5 - Classificação do material produzido na empresa



Fonte: Do autor (2016).

- f) o material retido pela peneira, quando necessário, retorna para o sistema, sendo reprocessado em um britador de cone, marca *Barber Greene*, modelo 245 (Figura 10). O material gerado neste britador é transportado novamente para o peneiramento, gerando um ciclo fechado.

Figura 6 - Britador de cone para reprocessamento

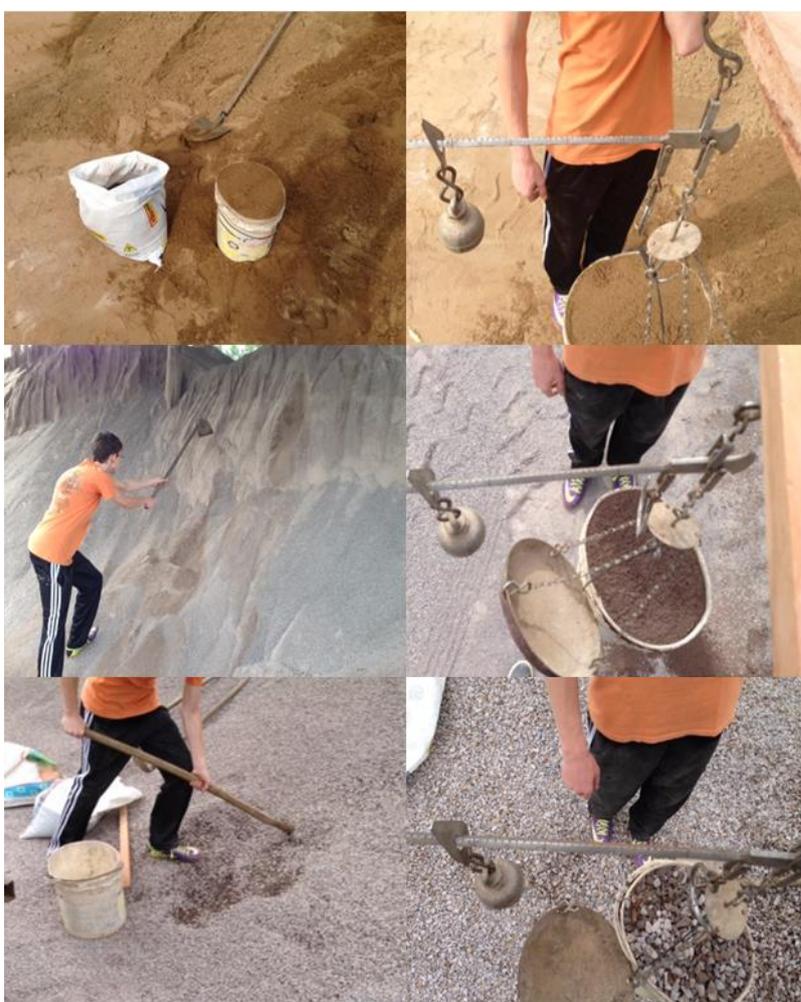


Fonte: Do autor (2016).

### 3.1 Amostragem

Parte do material utilizado, como brita, AN e RB, foram coletados diretamente no depósito da empresa de britagem (Figura 11), sendo observado o procedimento descrito pela NBR NM 26, tendo assim nas amostras, uma representatividade adequada.

Figura 11 – Sequência de imagens referente à coleta de material no pátio da empresa



Fonte: Do autor (2016).

Foram coletados no pátio da empresa 375 kg de AN, 392 kg de RB, 298 Kg de Brita 0 e 315 kg de Brita 1. Toda a AN, assim como o RB, foram secos ao sol (Figura 12) de forma a não se observar mais a umidade superficial. A brita não foi submetida ao processo de secagem. Optou-se também por não efetuar a lavagem da brita, visto que na análise em questão, esta variável seria comum para todos os traços.

Figura 12 – Secagem do material ao sol



Fonte: Do autor (2016).

A redução das amostras seguiu o quarteamento descrito pela NBR NM 27:2001, conforme Figura 13.

Figura 13 – Quarteamento do agregado miúdo



Fonte: Do autor (2016).

O cimento utilizado foi o do tipo CP IV 32, marca Cimpor, fornecido pela mesma empresa que forneceu os agregados, já classificado e embalado.

A água foi coletada do sistema de distribuição do Laboratório de Tecnologia de Construção (Latec), que é abastecido pela rede pública.

### 3.2 Caracterização dos agregados

Todos os materiais foram encaminhados para o laboratório da UNIVATES, onde foram feitas as caracterizações destacadas abaixo.

#### 3.2.1 Granulometria do agregado graúdo e miúdo

Para determinação granulométrica dos agregados foram seguidos os passos prescritos pela norma NBR NM 248: 2003, conforme Figura 14.

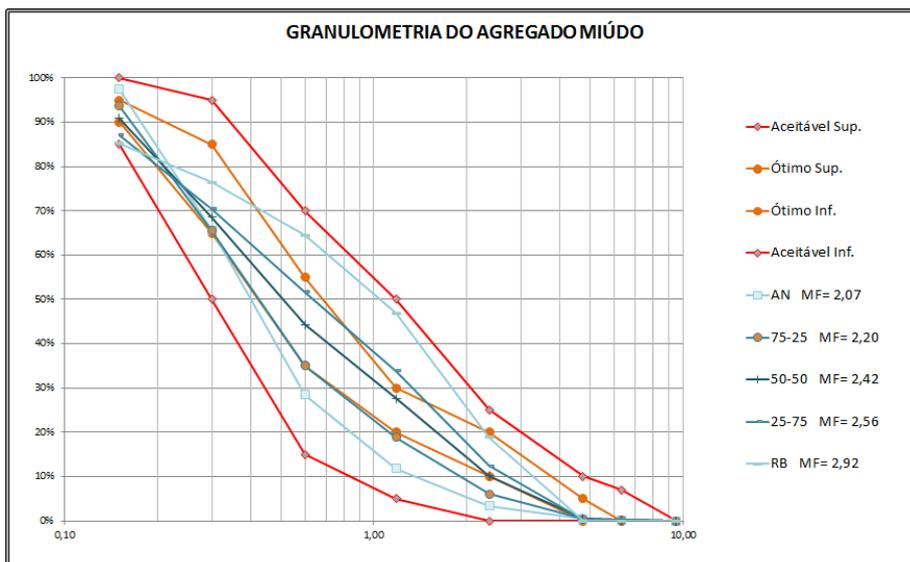
Figura 14 – Processo de determinação da granulometria



Fonte: Do autor (2016).

Constatou-se um valor de módulo de finura (MF) da AN de 2,07, contra 2,92 do RB. Embora constatada uma diferença grande de MF, a faixa granulométrica dos dois agregados miúdos ficou dentro do aceitável pela norma, próximo dos limites mínimo e máximo, respectivamente. No entanto, a mistura da AN com o RB, acarretou no deslocamento da faixa para uma zona ótima, definida pela norma, sendo esta mistura na proporção de 50% AN/50% RB. Com essa proporção de mistura, o MF do agregado miúdo ficou em 2,42. O Gráfico 1 demonstra a evolução do valor do MF com o aumento do valor da proporção de mistura de RB a AN.

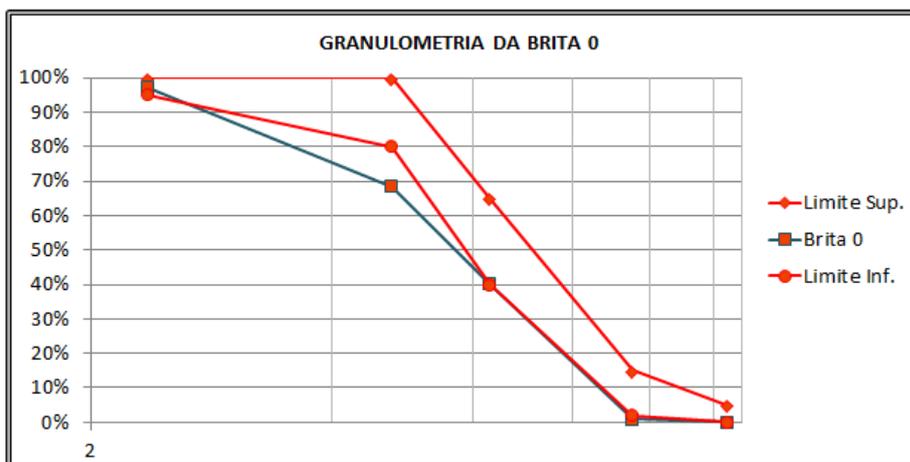
Gráfico 1 – Faixas granulométricas dos agregados miúdos



Fonte: Do autor (2016).

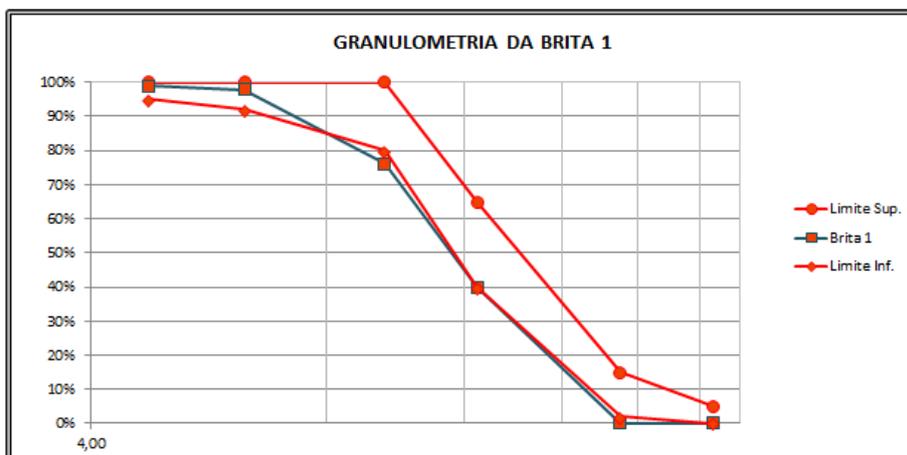
Os dois agregados caracterizados tiveram sua faixa granulométrica determinada fora dos limites estipulados pela norma, predominando seu desvio abaixo do limite inferior aceitável, tanto para a Brita 0 como para a Brita 1, como pode ser observado no Gráfico 2 e no Gráfico 3.

Gráfico 2 – Faixas granulométricas da brita 0



Fonte: Do autor (2016).

Gráfico 3 – Faixas granulométricas da brita 1



Fonte: Do autor (2016).

### 3.2.2 Determinação da massa específica do agregado miúdo

A massa específica do agregado miúdo foi determinada conforme NBR NM 52:2009 e NBR NM 27:2001, o que podemos observar na Figura 15.

Figura 15 – Processo de determinação da massa específica do agregado miúdo



Fonte: Do autor (2016).

Os valores calculados das massas específicas da AN e do RB foram muito parecidos, sendo 2628 kg/m<sup>3</sup> e 2658 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

### 3.2.3 Determinação da massa específica do aglomerante

A massa específica do cimento foi estipulada por pesquisa bibliográfica realizada no site da empresa Itambé, ficando definida em  $2820\text{kg/m}^3$ . Para a massa específica da água adotou-se o valor de  $1000\text{ kg/m}^3$ .

### 3.2.4 Determinação da massa específica do agregado gráúdo

Foram seguidos os passos prescritos pela NBR NM 53: 2009 (Figura 16), sendo que as britas apresentaram valores de  $2815\text{ kg/m}^3$  para Brita 0,  $2824\text{ kg/m}^3$  para Brita 1, e Brita Graduada 40/60.

Figura 16 – Processo de determinação da massa específica do agregado gráúdo



Fonte: Do autor (2016).

### 3.2.5 Determinação da massa unitária e índice de vazios

Foram seguidos os passos prescritos pela NBR NM 45:2006 (Figura 17).

Figura 17 – Processo de determinação da massa unitária dos agregados miúdo e graúdo



Fonte: Do autor (2016).

A massa unitária do cimento foi determinada conforme descrito no site da empresa Cimento Itambé, ficando definida em  $1400\text{kg/m}^3$ .

A AN apresentou massa unitária de  $1648\text{ kg/m}^3$ , enquanto o RB foi determinado em  $1677\text{ kg/m}^3$ .

Determinou-se a massa unitária da Brita 0 em  $1335\text{ kg/m}^3$ , da Brita 1 em  $1363\text{ kg/m}^3$ , e da Brita Graduada 40/60 em  $1453\text{ kg/m}^3$ .

### 3.2.6 Índice de vazios

Os índices de vazios foram calculados segundo a equação x.

$$E_v = \frac{100 \times [(d_1 \times \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 \times \rho_w} (\%)$$

Onde:

$E_v$  = índice de volume de vazios nos agregados, em porcentagem;

$d_1$  = massa específica relativa do agregado seco em g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_w$  = massa específica da água, em kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_{ap}$  = massa unitária média do agregado, em kg/m<sup>3</sup>.

Os valores calculados foram os seguintes:

AN: 37,34%

RB: 40,53%

Brita 0: 52,58%

Brita 1: 51,73%

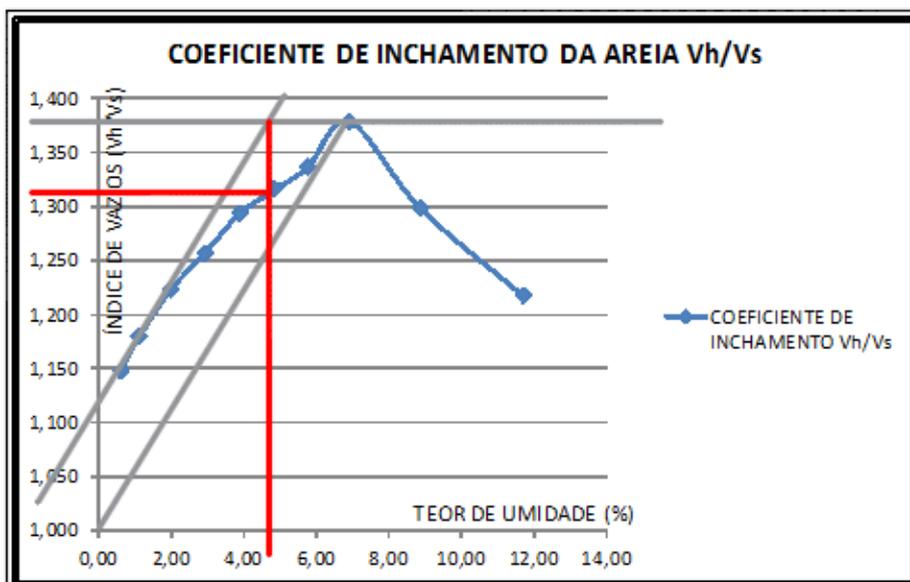
Brita graduada 40/60: 48,54%

### 3.2.7 Determinação do inchamento do agregado miúdo

É fato que a entrega de agregado miúdo na obra, quase que na sua totalidade, é feita com o material em estado úmido. Estando o valor de compra do agregado miúdo relacionado ao seu volume (R\$/m<sup>3</sup>), fez-se necessário estudar o inchamento, tanto da AN quanto do RB. Os métodos utilizados neste processo foram os indicados pela NBR 6467:2009.

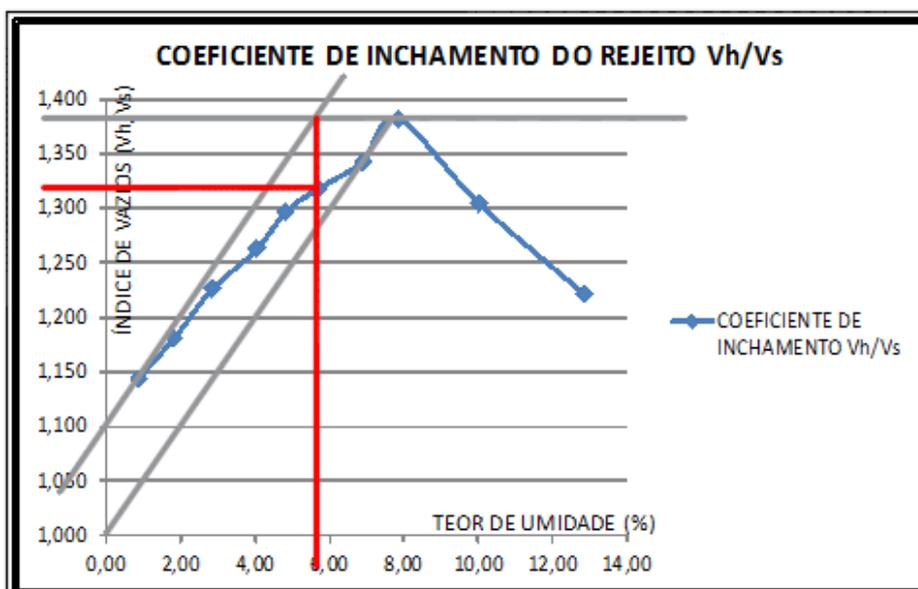
O valor coeficiente de inchamento médio obtido para AN e RB foi o mesmo, 1,32. No entanto, o valor da umidade crítica diferiu entre os dois, ficando em 4,7% para a AN e 5,7% para o RB, conforme se observa nos gráficos 4 e 5.

Gráfico 4 – Coeficiente de inchamento e teor de umidade crítica da AN



Fonte: Do autor (2016).

Gráfico 5 – Coeficiente de inchamento e teor de umidade crítica do RB



Fonte: Do autor (2016).

### 3.3 Classificação do RB

Após a caracterização, foi possível classificar o RB quanto à origem, massa, dimensão, classificação Petrográfica, forma e textura. Essa classificação foi de fundamental importância para compreender alguns comportamentos do concreto, tanto no estado fresco como endurecido.

Como foi constatado em pesquisa bibliográfica, é de fundamental importância conhecer a classificação do agregado, para entender certos comportamentos do concreto, tanto no estado fresco como endurecido. Neste trabalho foi definido apenas a classificação do RB, por se tratar da única variável de dosagem com classificação desconhecida.

### **3.3.1 Origem**

Quanto à sua origem, segundo Bastos (2002), o RB estudado neste trabalho é classificado como artificial, visto a necessidade de beneficiamento para realizar sua fragmentação. No entanto, Metha e Monteiro (2014) apontam sua classificação como natural, com base na sua origem e por se tratar junto à natureza. Optou-se por definir a classificação do RB em questão como artificial.

### **3.3.2 Massa**

O valor da massa unitária definida na caracterização ( $1677 \text{ kg/m}^3$ ) classifica o RB como agregado normal.

### **3.3.3 Dimensão**

A análise granulométrica indica a classificação do RB como agregado miúdo, sendo enquadrado dentro da faixa utilizável, segundo a NBR NM 248:2003.

### **3.3.4 Classificação Petrográfica**

O RB, que tem como rocha-mãe o Riodacito (Figura 2), pertence ao Grupo basalto, segundo Neville e Brooks (2013).

### **3.3.5 Forma**

A forma do fragmento do RB é predominantemente lamelar e alongada, conforme se observa na Figura 18.

Figura 18 – Forma do RB



Fonte: Do autor (2016).

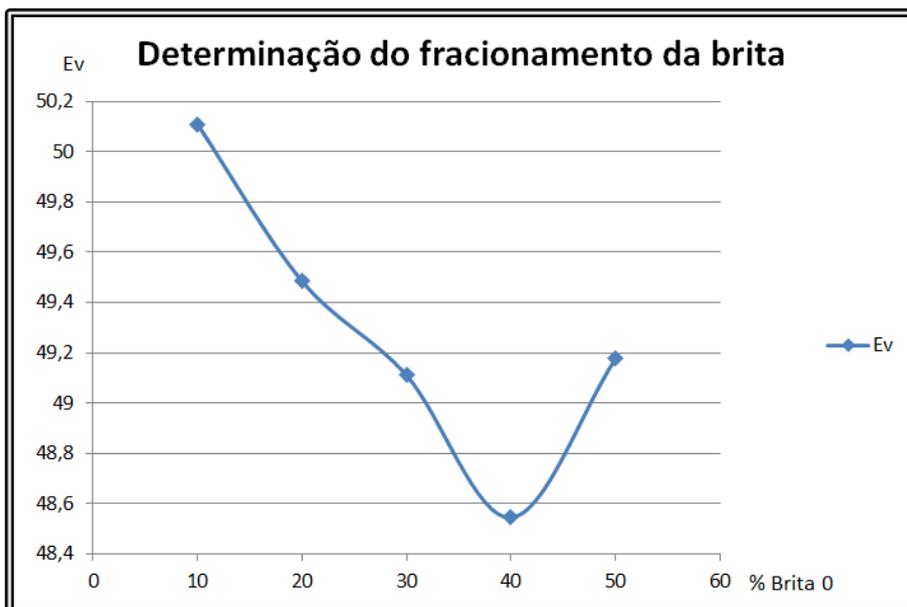
### **3.3.6 Textura**

O RB possui textura áspera, característica de rochas basálticas.

### **3.4 Determinação do fracionamento da brita**

Com o objetivo de reduzir o índice de vazios ( $E_v$ ) do agregado graúdo, e consequentemente minimizar o percentual de argamassa necessário para a mistura de concreto, realizou-se misturas fracionadas de Brita 0 e Brita 1, variando o percentual de 10 em 10%, até atingir o menor índice de vazios. Para esta determinação é o que rege a NBR NM 45:2006, e o percentual encontrado foi de 40% de Brita 0 e 60% de Brita 1, conforme Gráfico 6.

Gráfico 6 – Gráfico de Ev em função da mistura da brita



Fonte: Do autor (2016).

### 3.5 Mistura de concreto

Após a classificação e adequação dos materiais, foram feitos os cálculos de dosagem do concreto. Este trabalho se apoiou no método IPT/USP (descrito também por algumas literaturas como EPUSP/IPT ou IPT/EPUSP) para determinar a dosagem do concreto utilizado no estudo.

#### 3.5.1 Parâmetros para dosagem do traço referência

Os parâmetros utilizados na dosagem experimental do traço referência, sendo o agregado miúdo composto apenas de AN, foram os seguintes:

- cimento utilizado: CP IV 32;
- agregado miúdo: 100% AN;
- traço unitário (Intermediário): 1:5,0;
- resistência de dosagem aos 28 dias ( $f_{d28}$ ): 30 Mpa;

- dimensão máxima do agregado graúdo: 19mm.;
- teor de argamassa: 45%;
- abatimento: 100 +/- 20 mm..

### 3.5.2 Determinação do traço inicial

Usando como referência os parâmetros estipulados no subcapítulo 3.5.1, foram realizados os cálculos para determinação do traço intermediário 1:5,0. As proporções de cada material foram definidas em função do cimento.

Embora, pelo método IPT/USP, a relação a/c seja confirmada durante a definição do abatimento, optou-se por estimar um valor inicial para o a/c, seguindo o sugerido por Helene e Terzian (1993). Desta forma, se fez uso da seguinte equação:

$$x = 1,11 \log(92,8/f_{d28})$$

Onde:

X= a/c;

$f_{d28}$ = Resistência de dosagem aos 28 dias.

Considerando-se um  $f_{d28}$  de 30 Mpa, se obteve um valor de a/c correspondente a 0,54.

Em seguida, calculou-se a proporção de agregado miúdo do traço, tendo como referência a seguinte fórmula:

$$a = \alpha(1 + m) - 1$$

Onde:

a = fração de agregado miúdo do traço;

$\alpha$  = teor de argamassa;

m = relação agregado seco/cimento em massa.

O valor da proporção de agregado miúdo em função do cimento calculado foi de 1,70.

Para determinação da fração de agregado graúdo do traço usou-se a equação a seguir:

$$b = m - a$$

Onde:

b = fração do agregado graúdo.

Aplicando-se a equação obteve-se a proporção de 3,30 de brita em relação ao cimento.

Foi adotada a massa de brita de 20 kg correspondente à proporção de brita para a produção de uma betonada pequena de concreto (capacidade entre 90 e 100 litros) para realizar os ensaios necessários para a aprovação do traço.

Relacionando a massa de brita com a sua fração do traço se determinou as massas dos demais materiais, utilizando-se as equações a seguir:

$$C = \frac{B}{b}$$

Onde:

C = massa de cimento da betonada;

B = massa de agregado graúdo da betonada.

$$A = a\left(\frac{B}{b}\right)$$

Onde:

A = massa de agregado miúdo da betonada.

$$X = x \left( \frac{B}{b} \right)$$

Onde:

X = massa de água da betonada.

Definido o a/c (0,54) e o traço (1:1,7:3,3), foram calculadas as massas a serem usadas na mistura experimental, sendo as que seguem:

- cimento: 6,06 kg;
- agregado miúdo: 10,30 kg;
- brita (pré-determinado): 20,00 kg;
- água: 3,30 kg.

### 3.5.3 Mistura experimental

Com o objetivo de testar o teor de argamassa de estimado (45%), foi realizada a primeira mistura experimental. Os materiais, secos e devidamente acondicionados (Figura 19), foram pesados conforme os valores calculados no subcapítulo 3.4.3. A massa de brita foi submetida ao fracionamento estipulado no subcapítulo 3.3.

Figura 19 – Materiais utilizados para a mistura experimental



Fonte: Do autor (2016).

Foi utilizada uma massa aproximada de 6 kg de concreto, traço 1:2:3, para imprimação da betoneira (Figura 20).

Figura 20 – Imprimação da betoneira



Fonte: Do autor (2016).

Após a imprimação, os materiais foram adicionados à betoneira na seguinte ordem: brita (total), água (parcial), cimento (total), areia (total) e por fim, o saldo da água. Após aproximadamente 3 minutos de mistura e controle dos materiais aderidos de forma acumulada nas paredes da betoneira, a mesma foi desligada para que se avaliasse a eficiência do teor de argamassa estimado.

#### **3.5.4 Definição do teor de argamassa**

Através da mistura experimental constatou-se que o teor de argamassa de 45% foi suficiente para preencher os vazios dos agregados graúdo, gerando um acabamento satisfatório. No entanto, em virtude de perdas de argamassa geradas pelo transporte e lançamento do concreto, decidiu-se por aumentar em 2% este parâmetro de dosagem. Para isso, fez-se necessária a realização de novo cálculo do traço, seguindo os passos vistos anteriormente, sendo que foi considerado um novo teor de argamassa de 47%.

Com os novos valores calculados foi realizada nova mistura, e assim, constatada a eficiência da alteração (Figura 21), ficando definido o teor de argamassa para o traço referencial.

Figura 21 – Teste do teor de argamassa



Fonte: Do autor (2016).

### **3.5.5 Determinação dos traços auxiliares**

Na sequência fez-se necessário produzir mais dois traços auxiliares, necessários para a elaboração dos diagramas de dosagem. Estes traços possuem uma variação de uma unidade e meia no teor de agregado total, para mais e para menos, em relação ao traço 1:5,0, sendo que se mantém fixo o teor de argamassa definido no traço de referência.

A definição dos traços unitários individuais rico (1:3,0) e pobre (1:6,5), seguiram a mesma metodologia de cálculo do traço intermediário.

### **3.5.6 Ajuste do abatimento e determinação da relação água/cimento**

Após a definição do teor de argamassa, buscou-se ajustar o abatimento do concreto produzido com cada traço, sendo sua medição realizada seguindo o

indicado na NBR NM 67:1998 (FIGURA 22). Conforme sugere o método IPT/USP, foi definido

um abatimento a ser alcançado, neste caso  $100 \pm 20$  mm. Para alcançar esta marca, foram feitas alterações no a/c pré-determinado, adicionando água ou materiais secos à mistura, conforme a necessidade de aumentar ou diminuir o abatimento, respectivamente.

Figura 22 – Medição do abatimento do concreto



Fonte: Do autor (2016).

### 3.5.7 Definição dos traços com proporção de RB

Todas as etapas seguidas na definição dos traços pobre, intermediário e rico, de referência, foram seguidos para a elaboração dos traços que eram compostos por substituição de RB. Essa substituição teve teores de 25, 50, 75 e 100% de RB na fração de agregado miúdo da mistura de concreto. Foi necessário corrigir o teor de argamassa para os traços com proporção de RB, visto que quanto mais percentual deste agregado miúdo era adicionado, mais o concreto mostrava deficiência neste aspecto. Desta forma, definiu-se teores de argamassa de 57, 59, 61, 63 e 65% para valores respectivos de 0, 25, 50, 75 e 100% de substituição de RB.

### 3.6 Definição da tabela de traços

Após todos os traços definidos, com os respectivos ajustes de teor de argamassa e abatimento realizados, foi elaborada uma tabela de dosagem (Tabela 1) com todos os traços devidamente referenciados.

Tabela 1 – Tabela de dosagem do concreto

Identificação			Traço Concreto				
Nome	Tipo	Numeração	Cimento	Areia (a)	Rejeito(a)	Brita (p)	a/c
AN	1-3,5	1	1,00	1,12	0,00	2,39	0,51
	1-5,0	2	1,00	1,82	0,00	3,18	0,57
	1-6,5	3	1,00	2,52	0,00	3,97	0,71
AN75 - RB 25	1-3,5	4	1,00	0,90	0,31	2,30	0,53
	1-5,0	5	1,00	1,46	0,49	3,06	0,62
	1-6,5	6	1,00	2,01	0,68	3,83	0,77
AN 50 - RB 50	1-3,5	7	1,00	0,65	0,65	2,20	0,53
	1-5,0	8	1,00	1,04	1,04	2,92	0,67
	1-6,5	9	1,00	1,43	1,43	3,64	0,86
AN 25 - RB 75	1-3,5	10	1,00	0,35	1,06	2,12	0,57
	1-5,0	11	1,00	0,55	1,66	2,82	0,71
	1-6,5	12	1,00	0,74	2,27	3,53	0,86
RB	1-3,5	13	1,00	0,00	1,50	2,03	0,61
	1-5,0	14	1,00	0,00	2,34	2,70	0,82
	1-6,5	15	1,00	0,00	3,18	3,38	1,03

Fonte: Do autor (2016).

### 3.7 Moldagem e cura dos corpos-de-prova.

Com os traços definidos para um abatimento constante, foram moldados dez corpos-de-prova (CPs) para cada traço definido, totalizando 150 CPs (Figura 23). Todos os CPs tiveram seu volume e massa medidos e registrados, sendo estes dados necessários para a determinação da massa específica do concreto fresco. Na sequência, os CPs foram desmoldados, acondicionados e curados seguindo-se o indicado na NBR 5738:2015.

Figura 23 – Moldagem e cura dos corpos-de-prova



Fonte: Do autor (2016)

### 3.8 Determinação da resistência à compressão

Na sequência do estudo, parte dos CPs moldados foi submetida a um ensaio de resistência mecânica à compressão, conforme descrito na NBR 5739:2007. Após serem retificados, os CPs foram submetidos à ruptura nas idades de 7, 28 e 56 dias, sendo rompidos dois CPs para cada idade e traço elaborado (Figura 24). Optou-se por adotar como resultado o maior valor de resistência mecânica a compressão obtido entre os CPs testados, considerando-se assim a resistência potencial do concreto.

Figura 24 – Ensaio de resistência mecânica à compressão



Fonte: Do autor (2016).

### 3.9 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

Em paralelo, foi determinada a resistência mecânica à tração pelo método da compressão diametral, conforme NBR 7222:2011 (Figura 25). Este ensaio foi realizado aos 28 e 56 dias, sendo rompidos dois CPs para cada idade, onde foi considerado o maior valor de resistência mecânica a compressão diametral de cada traço e idade.

Figura 25 – Ensaio de resistência mecânica à tração



Fonte: Do autor (2016).

### 3.10 Elaboração dos diagramas de dosagem

Após determinar a resistência do concreto para cada traço, foi possível elaborar os diagramas de dosagem. Foram construídos cinco diagramas, um para cada teor de substituição testado (Anexo A, B, C, D e E).

### 3.11 Comparativo de custo do concreto

De posse dos diagramas elaborados, foram definidos traços para a mistura de concreto de 15, 20 e 25 Mpa. Tendo como referência o consumo de cimento por m<sup>3</sup> para cada traço, pode-se estimar o consumo dos demais materiais, multiplicando a massa de cimento pela fração de cada traço. Com as massas definidas, foram feitas as conversões para o volume da AN, do RB e da brita, visto que seus custos estavam relacionados ao m<sup>3</sup> de cada material. Estes valores foram definidos através da seguinte equação:

$$V = m/\rho_{ap}$$

Onde:

V= volume do agregado em m<sup>3</sup>;

m= massa do agregado em kg;

$\rho_{ap}$ = massa unitária do agregado em kg/m<sup>3</sup>.

Optou-se também por corrigir o valor do custo do agregado miúdo em função do coeficiente de inchamento médio. Para isso, usou-se a seguinte equação:

$$VLRas = VLRau \times \left(\frac{Vh}{Vs}\right)$$

Onde:

VLRas= valor do agregado seco em R\$/m<sup>3</sup>;

VLRau= valor do agregado úmido em R\$/m<sup>3</sup>;

Vh/Vs= coeficiente de inchamento do agregado.

Desta forma foi possível estimar o consumo de material para elaboração de concreto e conseqüente o custo do m<sup>3</sup>. Como referência de custo dos materiais utilizou-se valores praticados pela empresa que os forneceu, no mês de maio de 2016. Os valores foram considerados, levando-se em conta a entrega em obra no município de Vespasiano Corrêa/RS. Segue relação:

- Cimento CP IV 32= R\$ 29,00 ao saco de 50 kg;
- AN (umidade variável)= R\$ 95,00 ao m<sup>3</sup>;
- AN (seca)= R\$ 125,40 ao m<sup>3</sup>;
- RB (umidade variável)= R\$ 45,00 ao m<sup>3</sup>;
- RB (seco)= R\$ 59,40 ao m<sup>3</sup>;
- Brita 0: R\$ 45,00 ao m<sup>3</sup>;

- Brita 1: R\$ 45,00 ao m<sup>3</sup>.

Destaca-se que foram considerados apenas os custos que envolvem materiais, não considerando, desta forma, custos decorrentes da mão de obra envolvida.

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Propriedades do concreto fresco**

Foi possível manter a trabalhabilidade e a coesão do concreto fresco em níveis adequados, no entanto, foi necessária a alteração no traço de dosagem para se manter as propriedades pré-definidas.

#### **4.1.1 Trabalhabilidade**

Fez-se necessário ajustes no teor de argamassa, para manter a trabalhabilidade e a coesão do concreto, conforme aumentou a proporção de mistura de RB ao traço de dosagem de concreto. Em todos os traços testados conseguiu-se alcançar trabalhabilidade satisfatória, dentro da faixa pré-determinada.

#### **4.1.2 Perda de abatimento**

Mesmo não realizando testes específicos relacionados a esta propriedade, não foi observado perda de abatimento significativa entre diferentes traços de dosagem.

#### 4.1.3 Segregação e exsudação

Durante os testes de abatimento, assim como durante a moldagem dos CPs, não se observou segregação nem exsudação. Inclusive nos traços mais ricos em RB, que demandaram maior relação água/materiais secos (H).

#### 4.1.4 Massa específica

Constatou-se variação no valor da massa específica do concreto fresco à medida que se adicionava RB à mistura. Com exceção do traço rico, o aumento da proporção de RB na mistura diminuiu gradativamente a massa específica do concreto fresco, conforme se observa na Tabela 2.

Tabela 2 – Massa específica relacionada ao traço

Nome	<b>Traço Concreto 1:3,5</b>					Massa Específica do concreto fresco (kg/m <sup>3</sup> )
	Cimento	Areia(a)	Rejeito(a)	Brita (p)	a/c	
AN	1,00	1,12	0,00	2,39	0,51	2304
AN75 - RB 25	1,00	0,90	0,31	2,30	0,53	2282
AN 50 - RB 50	1,00	0,65	0,66	2,21	0,53	2304
AN 25 - RB 75	1,00	0,35	1,06	2,12	0,57	2236
RB	1,00	0,00	1,50	2,03	0,61	2243
Nome	<b>Traço Concreto 1:5,0</b>					Massa Específica do concreto fresco (kg/m <sup>3</sup> )
	Cimento	Areia(a)	Rejeito(a)	Brita (p)	a/c	
AN	1,00	1,82	0,00	3,18	0,57	2318
AN75 - RB 25	1,00	1,46	0,49	3,06	0,62	2317
AN 50 - RB 50	1,00	1,03	1,05	2,94	0,67	2317
AN 25 - RB 75	1,00	0,55	1,66	2,82	0,71	2273
RB	1,00	0,00	2,34	2,70	0,82	2251
Nome	<b>Traço Concreto 1:6,5</b>					Massa Específica do concreto fresco (kg/m <sup>3</sup> )
	Cimento	Areia(a)	Rejeito(a)	Brita (p)	a/c	
AN	1,00	2,52	0,00	3,97	0,71	2336
AN75 - RB 25	1,00	2,01	0,68	3,83	0,77	2330
AN 50 - RB 50	1,00	1,41	1,44	3,68	0,86	2313
AN 25 - RB 75	1,00	0,74	2,27	3,53	0,86	2259
RB	1,00	0,00	3,18	3,38	1,03	2233

Fonte: Do autor (2016).

## 4.2 Propriedades do concreto endurecido

Os resultados de resistência à compressão do concreto tiveram considerável decréscimo em função do aumento da adição de RB à mistura de concreto. Isso fica evidente na Tabela 3, onde se observa uma tendência, principalmente nos traços unitários pobres, de maior ganho de resistência mecânica à compressão entre os 28 e os 56 dias para concretos com maior teor de mistura de RB.

Tabela 3 – Resultados de resistência mecânica à compressão

Identificação			Traço Concreto					Resistência à Compressão (MPa)		
Nome	Tipo	Numeração	Cimento	Areia (a)	Rejeito(a)	Brita (p)	a/c	7 dias	28 dias	56 dias
AN	1-3,5	1	1,00	1,12	0,00	2,39	0,51	21,38	29,40	32,89
	1-5,0	2	1,00	1,82	0,00	3,18	0,57	15,08	22,70	28,63
	1-6,5	3	1,00	2,52	0,00	3,97	0,71	7,69	11,19	15,23
AN75 - RB 25	1-3,5	4	1,00	0,90	0,31	2,30	0,53	15,38	25,50	29,74
	1-5,0	5	1,00	1,46	0,49	3,06	0,62	10,08	17,35	21,89
	1-6,5	6	1,00	2,01	0,68	3,83	0,77	6,51	10,45	15,64
AN 50 - RB 50	1-3,5	7	1,00	0,65	0,65	2,20	0,53	14,96	23,49	29,56
	1-5,0	8	1,00	1,04	1,04	2,92	0,67	8,49	15,83	20,33
	1-6,5	9	1,00	1,43	1,43	3,64	0,86	5,12	9,31	14,34
AN 25 - RB 75	1-3,5	10	1,00	0,35	1,06	2,12	0,57	13,13	21,29	26,84
	1-5,0	11	1,00	0,55	1,66	2,82	0,71	8,42	14,31	18,05
	1-6,5	12	1,00	0,74	2,27	3,53	0,86	4,59	7,63	10,24
RB	1-3,5	13	1,00	0,00	1,50	2,03	0,61	12,59	18,62	24,98
	1-5,0	14	1,00	0,00	2,34	2,70	0,82	6,44	10,83	14,96
	1-6,5	15	1,00	0,00	3,18	3,38	1,03	3,09	5,89	8,57

Fonte: Do autor (2016).

O comportamento dos valores de resistência à tração encontrados, não tiveram a mesma tendência que os de resistência à compressão. Houve uma variação pequena entre as resistências obtidas aos 28 dias, sendo a maior resistência medida em concretos com teor de 50% de RB incorporado ao agregado miúdo. Aos 56 dias, concretos com traço pobre e maior proporção de mistura tiveram uma maior evolução no ganho de resistência, conforme se observa na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de resistência mecânica à tração

Identificação			Resistência à Tração (MPa)			
Nome	Tipo	Numeração	28 dias	% comp.	56 dias	% comp.
AN	1-3,5	1	2,26	7,69	2,28	6,92
	1-5,0	2	1,97	8,66	2,13	7,45
	1-6,5	3	1,32	11,79	1,49	9,79
AN75 - RB 25	1-3,5	4	2,22	8,72	2,63	8,83
	1-5,0	5	1,73	9,99	2,41	11,03
	1-6,5	6	1,43	13,66	1,72	10,99
AN 50 - RB 50	1-3,5	7	2,58	10,97	2,81	9,50
	1-5,0	8	1,81	11,46	2,20	10,84
	1-6,5	9	1,81	19,49	2,20	15,36
AN 25 - RB 75	1-3,5	10	2,24	10,51	2,31	8,61
	1-5,0	11	1,72	12,05	1,65	9,13
	1-6,5	12	0,97	12,66	1,35	13,14
RB	1-3,5	13	1,99	10,68	2,21	8,85
	1-5,0	14	1,25	11,57	1,59	10,65
	1-6,5	15	0,62	10,56	1,49	17,41

Fonte: Do autor (2016).

### 4.3 Diagramas de dosagem

A elaboração dos diagramas de dosagem permitiu, além de elaborar novos traços intermediários, visualizar limitações para misturas com teores específicos de RB.

### 4.4 Comparativo de custo do concreto

O considerável aumento do consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto, associado à perda de resistência gerada em função do aumento da proporção de rejeito na mistura, acabou por gerar custos mais elevados em concretos com mistura de RB. Os percentuais de aumento no custo do m<sup>3</sup> de concreto para as faixas de resistências relacionadas variam de 0,46% a 4,97%, conforme se observa na Tabela 5.

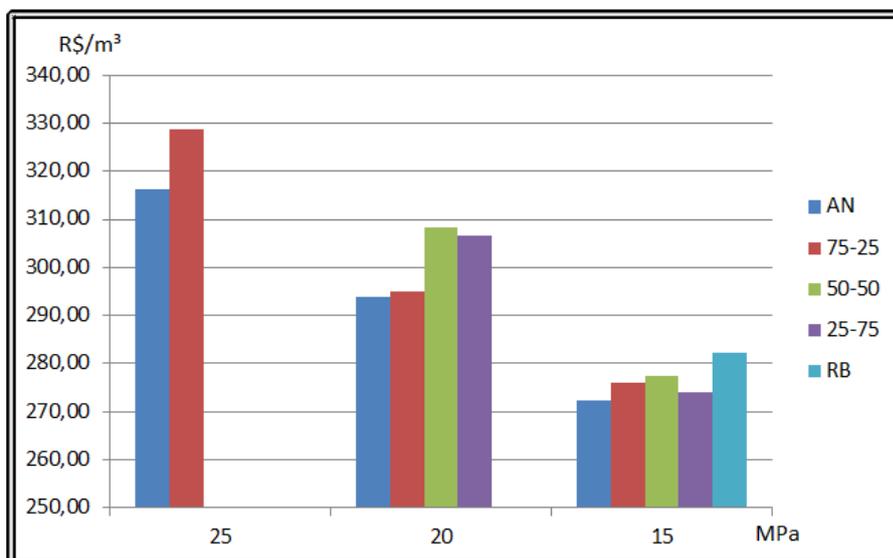
Tabela 5 – Comparativo de custo do concreto

Nome	Consumo de cimento por m <sup>3</sup> (kg)	Traço para concreto (25 MPa)					Custo / m <sup>3</sup> (R\$)	Variação do custo (%)
		Cimento	AN(a)	RB(a)	Brita (p)	a/c		
AN	402,00	1,00	1,49	0,00	2,81	0,55	316,36	
AN75 - RB 25	440,00	1,00	0,98	0,33	2,40	0,53	328,69	3,90
AN 50 - RB 50								
AN 25 - RB 75								
RB								
Nome	Consumo de cimento por m <sup>3</sup> (kg)	Traço para concreto (20 MPa)					Custo / m <sup>3</sup> (R\$)	Variação do custo (%)
		Cimento	AN(a)	RB(a)	Brita (p)	a/c		
AN	354	1,00	1,87	0,00	3,23	0,60	293,71	
AN75 - RB 25	375	1,00	1,27	0,42	2,80	0,59	295,06	0,46
AN 50 - RB 50	408	1,00	0,80	0,80	2,50	0,59	308,32	4,97
AN 25 - RB 75	420	1,00	0,39	1,16	2,25	0,59	306,67	4,41
RB								
Nome	Consumo de cimento por m <sup>3</sup> (kg)	Traço para concreto (15 MPa)					Custo / m <sup>3</sup> (R\$)	Variação do custo (%)
		Cimento	AN(a)	RB(a)	Brita (p)	a/c		
AN	312	1,00	2,24	0,00	3,65	0,66	272,20	
AN75 - RB 25	332	1,00	1,60	0,53	3,27	0,68	276,10	1,44
AN 50 - RB 50	346	1,00	1,06	1,06	2,99	0,70	277,31	1,88
AN 25 - RB 75	355	1,00	0,52	1,56	2,73	0,69	273,91	0,63
RB	388	1,00	0,00	1,81	2,30	0,70	282,32	3,72

Fonte: Do autor (2016).

O Gráfico 8 possibilita uma melhor visualização das limitações de resistência mecânica de cada proporção de mistura de rejeito, com a respectiva variação de custo do material.

Gráfico 8 – Comparativo de custo do concreto associado à resistência de 15, 20 e 25 MPa



Fonte: Do autor (2016)

## **5 CONCLUSÃO**

Os resultados obtidos com a realização do estudo possibilitaram chegar às conclusões descritas a seguir.

### **5.1 Quanto à caracterização física dos agregados**

No que diz respeito à faixa granulométrica, tanto a AN quanto o RB ficaram classificados dentro dos limites determinados pela NBR NM 248:2003. No entanto, observou-se uma diferença significativa entre os módulos de finura dos dois agregados, ficando determinados em 2,07 para a AN e 2,92 para o RB. A proporção de mistura 50/50 gerou o deslocamento da curva granulométrica para dentro da faixa ótima.

Tanto a Brita 0 como a Brita 1 tiveram suas curvas granulométricas locadas ligeiramente abaixo da faixa determinada pela NBR NM 248:2003. O fato de ter-se realizado a mistura das britas, possibilitou reduzir o índice de vazios da mistura. Este aspecto tem relação direta com o consumo de argamassa das misturas, e conseqüentemente com o custo final do concreto.

Quanto às massas específica e unitária, não se observou grandes variações entre os dois agregados miúdos utilizados. Por outro lado, o índice de vazios do RB (40,53%) superou o da AN (37,34%), resultado este associado à forma lamelar e alongada do RB.

Quanto ao inchamento do agregado miúdo, constatou-se a paridade do coeficiente de inchamento entre a AN e o RB. Os dois agregados se diferenciaram apenas nos valores de umidade crítica. Esta diferença está associada ao menor módulo de finura da AN, o que implica em um maior inchamento para uma mesma quantidade de água adicionada.

Quanto à classificação do RB, foram obtidos resultados compatíveis com os pesquisados na bibliografia. A classificação do agregado como lamelar e alongado tem associação direta com o mecanismo utilizado para a fragmentação da rocha, no caso, Britador de Mandíbula.

## **5.2 Quanto às propriedades do concreto fresco**

Os aspectos que mais interferiram nas propriedades do concreto fresco foram à aspereza e a forma dos grãos do RB. Se constatou que à medida que se aumentou a proporção de mistura de RB a AN, houve uma demanda maior de água para se manter um abatimento constante. Este efeito está diretamente relacionado ao maior travamento entre os grãos lamelares e ásperos, como ao maior teor de finos constituintes do RB. O efeito de travamento gerado pelo RB interferiu no teor de argamassa necessário nas misturas. Houve necessidade de aumento do teor em 2% para cada faixa de acréscimo da proporção de mistura de RB a AN.

Embora o RB possua a característica de gerar maior travamento ao concreto fresco, não se observou perda significativa de trabalhabilidade e acabamento no concreto fresco entre os traços. Isso foi possível pelo aumento da relação a/c que proporcionou uma melhor lubrificação entre as partículas dos agregados.

A variação da massa específica do concreto fresco se deve em função do aumento de proporção de mistura de RB, e conseqüentemente ao aumento da relação a/c. Quanto maior a proporção de RB, menor a massa específica do concreto fresco medida.

### **5.3 Quanto às propriedades do concreto endurecido**

Como era esperado, o aumento da relação a/c necessário para se manter o abatimento e trabalhabilidade, acabou por interferir negativamente nos resultados de resistência mecânica do concreto.

No que diz respeito à resistência mecânica à compressão, houve significativa perda de resistência à medida que se adicionou RB a mistura. Esse efeito foi mais significativo nas primeiras idades, tendendo a diminuir para as medições feitas nas outras duas idades pré-determinadas, de 28 e 56 dias. A determinação do motivo desta evolução demanda um estudo mais aprofundado em virtude de envolver aspectos não estudados no presente trabalho.

Faz-se necessário, em paralelo, uma avaliação mais detalhada no que diz respeito a durabilidade do concreto, dada a elevada relação a/c determinada para alguns traços definidos no presente estudo. Concretos elaborados com relação a/c elevada, tendem a ser mais porosos. Esta característica do concreto acaba por agilizar a despassivação da armadura por carbonatação e ação de cloretos.

Os resultados obtidos na determinação da resistência mecânica à tração na idade de 28 dias e 56 dias apontam para um diferencial menor entre concretos produzidos apenas com AN, e concretos com percentuais de RB na mistura. O traço rico (1:5,0) com 50% de RB na mistura de agregado miúdo chegou a superar o resultado obtido no traço rico constituído de 100% de AN. Segundo Neville e Brooks (2013) e Metha e Monteiro (2014), o ganho de resistência à tração quando comparado à resistência à compressão, para concretos constituídos de RB, está relacionado a textura áspera do agregado, que segundo os autores gera maior aderência da pasta do cimento ao agregado.

### **5.4 Comparativo de custo dos concretos**

O comparativo de custo realizado para faixas de resistência de 15, 20 e 25 MPa indicaram um diferencial nas variações dos valores entre as resistências. Concretos de 25 Mpa tiveram variações maiores de custo entre concretos com

diferente proporção de RB do que concretos de 15 MPa. Isso se dá pela menor interferência do RB nos resultados de resistência mecânica à compressão em concretos com traços mais pobres, quando comparados a traços mais ricos. Para traços mais ricos, o consumo de cimento sofre maior alteração em misturas com proporções diferentes de mistura de RB.

O baixo percentual de variação de custo, não ultrapassando 5% na pior situação, associado ao considerável aumento no ganho de resistência para concretos com idades superiores a 28 dias, acaba sendo um indicativo da necessidade de um estudo mais aprofundado sobre o uso do RB na produção de concreto.

### **5.5 Sugestão para trabalhos futuros**

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- analisar e controlar o material pulverulento existente no RB;
- testar outros tipos de cimento nas misturas;
- elaborar concretos com diferentes abatimentos e a/c constante;
- utilizar aditivos plastificantes nos traços de dosagem com a finalidade de reduzir o consumo de água;
- testar a durabilidade do concreto, mensurando a profundidade de carbonatação e absorção de água por capilaridade.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto**: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estrutura de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26: **Agregados** – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 27: **Agregados** - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: **Agregado miúdo** - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: **Agregado graúdo** - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregado para concreto** — Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: **Concreto e argamassa** — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

BASTOS, Sandra Regina Bertocini. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para produção de concreto convencional**. Florianópolis: UFSC, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/84274/212200.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 set. 2015.

BOGGIO, Aldo J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concreto de cimento Portland**. Porto Alegre: UFRGS, 2000. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12575/000628682.pdf?...1>>. Acesso em: 15 out. 2015.

CHEMIN, Beatris F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos: planejamento, elaboração e apresentação**. 3. ed. Lajeado: Univates, 2015. E-book. Disponível em: <[www.univates.br/biblioteca](http://www.univates.br/biblioteca)>. Acesso em: 03 nov. 2015.

CIMENTOITAMBE. Disponível em <http://www.cimentoitambe.com.br/itambe-apresenta-curiosidades-do-concreto-no-51%C2%BA-congresso-brasileiro-do-concreto-realizado-em-outubro-de-2009-na-cidade-de-curitiba/>. Acessado em 15/01/2016

CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 15., 2013, Belo Horizonte. Indústria de agregados do Brasil: Rumo a sustentabilidade, Belo Horizonte, AKIMOTO, Hércio, 2013. E-Book. Disponível em: <<http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/05/HAK-BH-CENTRALBUSINESS-FINAL.pdf>>. Acessado em: 01 nov. 2015.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. Ed. São Paulo. Atlas, 2007.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1. Ed. São Paulo. Pini, 1993.

LANG, Cesar Luiz. **Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e não lavada para utilização em concreto à base de cimento Portland**. Florianópolis: UFSC, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88806/234095.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 set. 2015.

MALHOTRA, Naresh K. **Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada**. 4. Ed. Porto Alegre. Bookman, 2006.

MARTINS, Rosilda Baron. **Metodologia Científica: como tornar mais agradável a elaboração de trabalhos acadêmicos**. 1. Ed. Curitiba. Juruá, 2010.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**. 2. Ed. São Paulo. IBRACON, 2014.

MEZZARROBA, Orides; MONTEIRO, Cláudia Servilha. **Manual da metodologia da pesquisa do direito**. 6. Ed. Saraiva, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. Ed. Porto Alegre. Bookman, 2013.

NOTAS DE AULA DA DISCIPLINA DE ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL, 2013B, Univates, Lajeado. **Tema nº 6 – Ambientes fluviais, mineração e aspectos legais: Estudos de caso**. Lajeado, FENSTERSEIFER, Henrique Carlos , 2015.

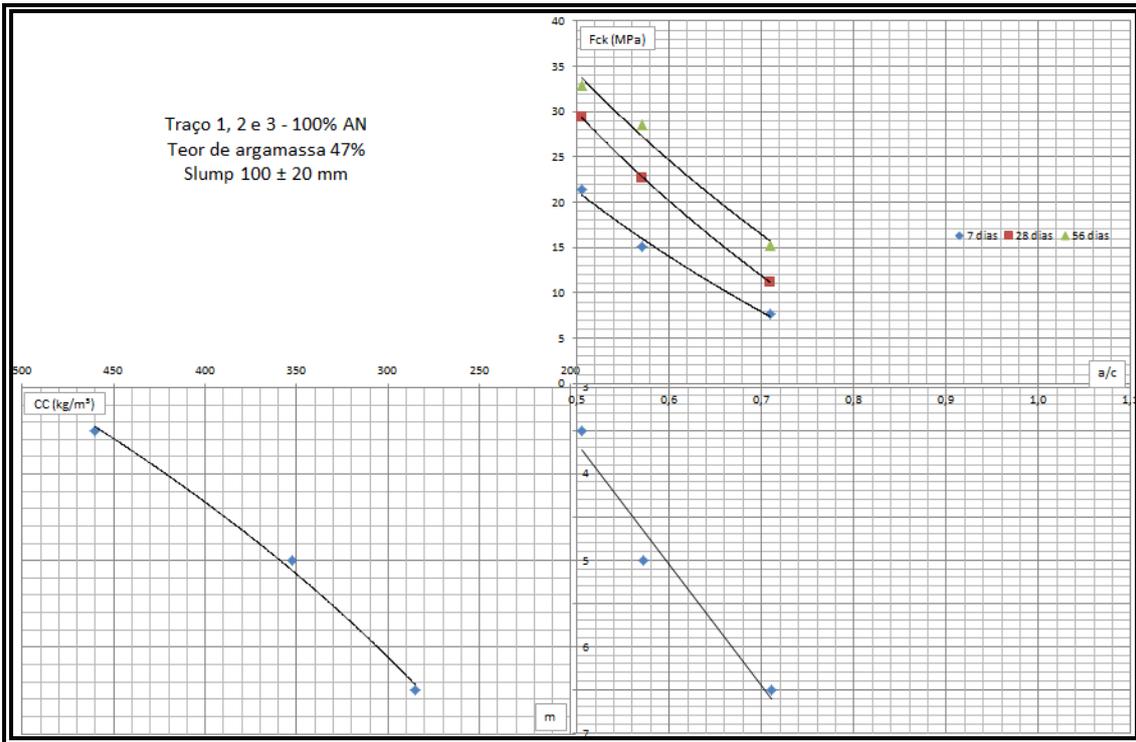
PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. Ed. São Paulo. Globo, 1998.

PIMENTA, Dhiego Saraiva. **Produção de concreto convencional com a utilização de pó de brita**. João Pessoa: UFPB, 2012. Disponível em: <[http://www.ct.ufpb.br/coordenacoes/ccgec/images/arquivos/TCC/TCC-Dhiego\\_Saraiva.pdf](http://www.ct.ufpb.br/coordenacoes/ccgec/images/arquivos/TCC/TCC-Dhiego_Saraiva.pdf)>. Acesso em: 13 set. 2015.

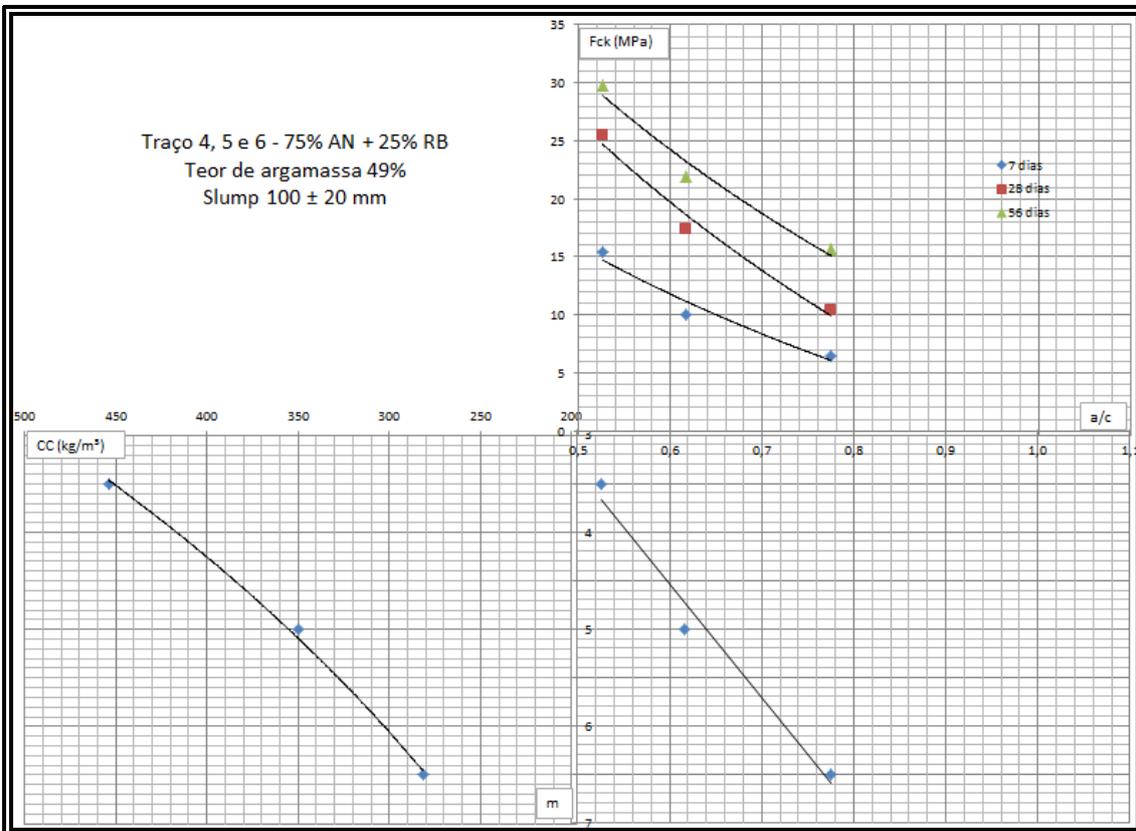
TEODORO, Sabrina Bastos. **Avaliação do uso da areia de britagem na composição do concreto estrutural**. Juiz de Fora: UFJF, 2013. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/engenhariacivil/files/2012/10/TCC-AVALIA%C3%87%C3%83O-DO-USO-DA-AREIA-DE-BRITAGEM-NA-COMPOSI%C3%87%C3%83O-DO-.pdf>>. Acesso em 13 set. 2015.

## **ANEXOS**

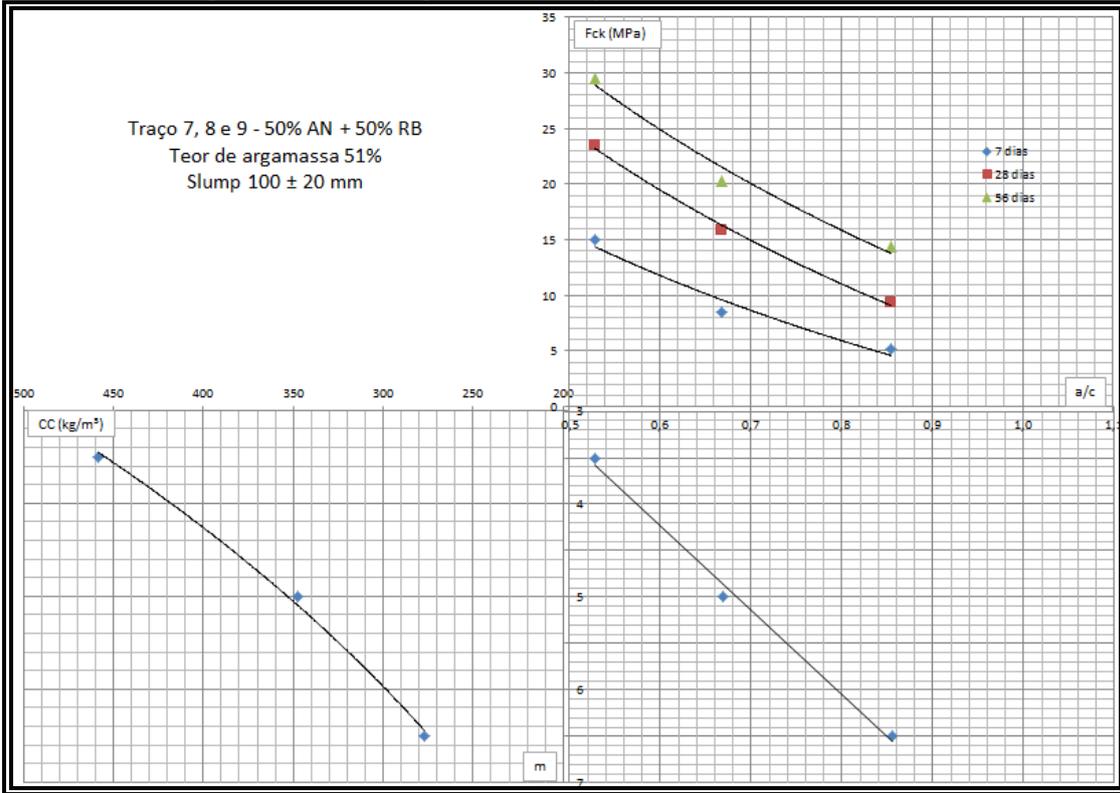
Anexo A – Diagrama de dosagem dos traços com 100% de AN



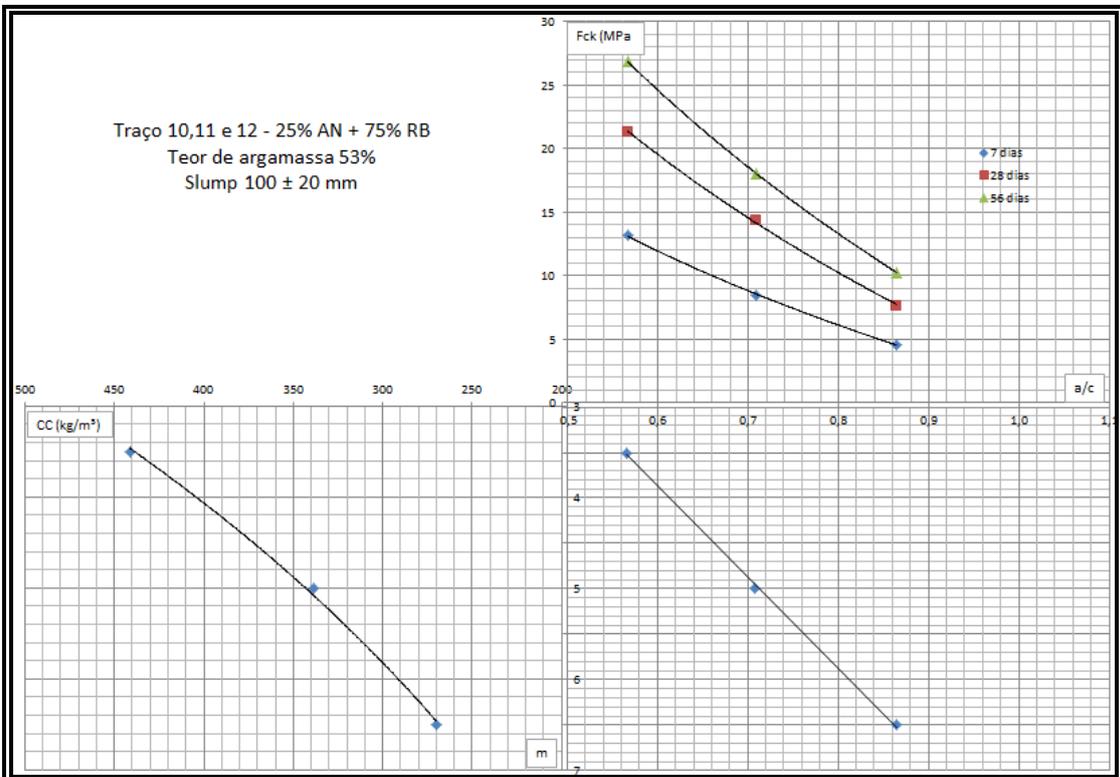
Anexo B – Diagrama de dosagem dos traços com 75% de AN e 25% de RB



Anexo C - Diagrama de dosagem dos traços com 50% de AN e 50% de RB.



Anexo D - Diagrama de dosagem dos traços com 25% de AN e 75% de RB



Anexo E - Diagrama de dosagem dos traços com 100% de RB

