



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Produção de concreto com areia de granulometria ótima- obtida do resíduo da mineração de quartzo

Ouro Preto

2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Autora: Marina Bedeschi Dutra

Produção de concreto com areia de granulometria ótima- obtida do resíduo da mineração de quartzo

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Ouro Preto

Outubro de 2015

D978p

Dutra, Marina Bedeschi.

Produção de concreto com areia de granulometria ótima [manuscrito]: obtida do resíduo da mineração de quartzo / Marina Bedeschi Dutra. - 2015.
x, 76f.: il.: color; graf; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

1. Soluções em mineração. 2. Materiais granulados. 3. Concreto. 4. Minas e mineração - Resíduos. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

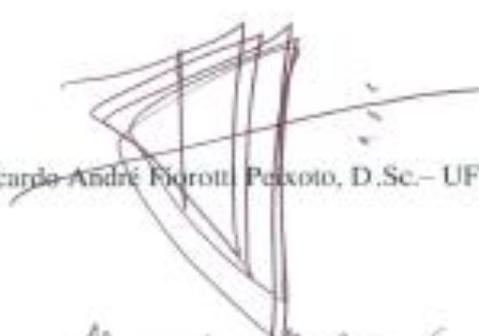
CDU: 622.2:62.665.9

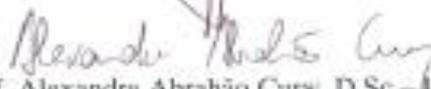
Catálogo: www.sisbin.ufop.br

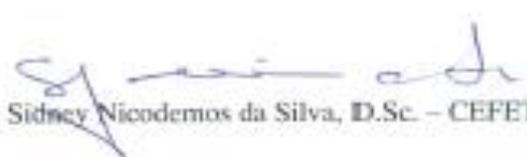
**PRODUÇÃO DE CONCRETO COM AREIA DE GRANULOMETRIA
ÓTIMA OBTIDA DO RESÍDUO DA MINERAÇÃO DE QUARTZO**

AUTORA: MARINA BEDESCHI DUTRA

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 02 de outubro de 2015, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:


Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, D.Sc. – UFOP (Presidente)


Prof. Alexandre Abrahão Cury, D.Sc. – UFJF


Prof. Sidney Nicodemos da Silva, D.Sc. – CEFET/MG

À minha mãe, Áurea.

Agradecimentos

Á Deus por nunca me desamparar, e estar comigo em todos os momentos.

A toda minha família, por ser uma base sólida na minha vida, em especial a minha mãe, por ser meu exemplo, por sempre me incentivar, nunca me deixar desanimar, por estar sempre do meu lado.

Ao Caio, pela paciência, ajuda, carinho e amor e, principalmente, por tornar a minha vida em Ouro Preto muito mais colorida e feliz.

Agradeço ao Prof. Ricardo Fiorotti, pelas orientações e ajuda durante toda minha passagem pelo grupo Reciclos, e também, ao Prof. Guilherme, pelas contribuições e grande colaboração com este trabalho.

Agradeço profundamente a todos que compõe o grupo de pesquisa Reciclos, em especial a Paula, por todo tempo dedicado a me ajudar, a Bárbara, por sua infinita disponibilidade sempre, a Ana Luiza, por sua amizade e companheirismo, ao Júnio, por todo auxílio, a Wanna, pelas orientações, ao Keoma, o Fabrício e a todos que de certa forma contribuíram na realização deste trabalho.

Agradeço a MinaSílicio, a Martin Lanna e a Inter Brasil, pelo fornecimento de materiais, que foram essenciais a este trabalho.

Agradeço aos laboratórios: Laboratório NanoLab do departamento de Metalúrgia da Escola de Minas/UFOP, Laboratório de Difração de Raios X do departamento de Geologia da Escola de Minas/UFOP e ao Laboratório de Ferrovias do departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas/UFOP.

Agradeço, também, ao PROPEC e todos seus professores pelos ensinamentos e por fim à CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

O impacto ambiental gerado pela atividade mineradora vem aumentando a cada ano, e associado a isso surge a necessidade, cada vez maior, de minimizar os impactos gerados pela extração de recursos minerais. Além da exploração propriamente dita, a disposição inadequada dos resíduos sólidos impactam seriamente o meio ambiente. Considerando essas questões, propõe-se a produção de areia com granulometria ótima, a partir da britagem e separação do rejeito da mineração de quartzo. A produção de agregado reciclado com qualidade técnica, e como alternativa que contribui no desenvolvimento de novos materiais e tecnologias, utilizáveis no setor da construção civil, tem como intuito reduzir a extração de areia natural e proporcionar a destinação ambientalmente correta dos resíduos da mineração. A areia produzida foi caracterizada física, química e mineralogicamente, através das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX). A título de comparação, foram caracterizadas também uma areia natural de rio (ANR) e uma areia industrial de gnaiss (AIG), ambas usualmente comercializadas no mercado da construção civil. A fim de avaliar o desempenho da areia ótima reciclada (AOR), produziram-se concretos utilizando todas as areias citadas anteriormente, ANR, AIG e AOR. Esses concretos foram dosados para três classes de resistência C20, C30 e C40 e, depois, foram submetidos aos ensaios de caracterização física, elasto-mecânica e de durabilidade, por intermédio dos ensaios de expansão na autoclave e de reatividade álcali-agregado. Dessa forma, pôde-se verificar satisfatório desempenho técnico da AOR que, em relação às demais areias, teve comportamento equivalente e, em alguns aspectos, melhor que a ANR, o que habilita a sua utilização como agregado miúdo para a construção civil.

Palavras chave: agregado miúdo; granulometria ótima; concreto; resíduos da mineração.

ABSTRACT

The environmental impact generated by mining industry grows every year, and the ways to reduce those impacts becomes a need. Besides the mineral extraction, the final disposal of wastes also seriously affects the environment. Considering the aforementioned problems, the production of sand with optimum granulometry from grinding and separation of silicon wastes is proposed. The production of recycled concrete aggregates of high quality aims to reduce the extraction of natural sand and provide an environmentally correct final destination to these mineral wastes. This alternative contributes to the development of new materials and new technologies in the construction industry. The produced sand was characterized physical, chemical and mineralogically through Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Fluorescence (XRF) and X-Ray Diffraction (XRD). The results for the produced sand were compared with the results obtained for two other samples: natural sand (NS) and industrial granite sand (IGS), both usually sold in the local construction industry. Aiming to evaluate the performance of the Optimum Recycled Sand (ORS) obtained, concrete samples were made using all the sands afore mentioned, that is NS, IGS, ORS. These concrete samples were dosed forthree strength classes: C20, C30, C40, and then were tested to determine their physical, elastomechanical and durability properties through the: Autoclave Expansion and Alkali-Silica Reaction tests. The results show that ORG has an equivalent performance compared to the other sands and even better than NS in some aspects, turning it feasible to be used as fine aggregate in the construction industry.

Key words: fine aggregate, optimum granulometry, concrete, mining industry rubbish

Lista de Figuras

2.1.	Impactos visuais gerados pela mineração em Guararema (SP).....	06
2.2.	Consumo de agregados por região.....	14
2.3.	A origem das características do agregado, relevantes na produção do concreto.....	16
2.4.	Módulos de elasticidade estático.....	21
3.1.	Mineração de quartzo da MinaSilício.....	23
3.2.	Resíduo da mineração de quartzo.....	24
3.3.	Mineração de gnaiss/granito Martins Lanna.....	25
3.4.	Esquematização dos ensaios elasto-mecânicos.....	31
3.5.	Dispositivo de compressão para CPs 5x10cm.....	32
3.6.	Determinação do módulo de elasticidade estático.....	33
3.7.	Equipamentos para a realização do ensaio de MEd.....	34
3.8.	Autoclave e as barras no suporte.....	36
3.9.	Barra padrão no relógio comparador digital.....	37
3.10.	Banho térmico.....	38
4.1.	Frações da areia ótima reciclada.....	39
4.2.	Fração retida na peneira 600 μ m.....	40
4.3.	FRX das frações > 150 μ m e < 150 μ m.....	40
4.4.	Granulometria agregados miúdos.....	41
4.5.	Teor de material pulverulento.....	42
4.6.	Massa específica.....	43
4.7.	Massa unitária.....	44
4.8.	Absorção de água.....	45
4.9.	Teor de umidade.....	45
4.10.	Impurezas orgânicas.....	47
4.11.	Difratograma – ANR.....	48
4.12.	Difratograma – AIG.....	49
4.13.	Difratograma – AOR.....	49
4.14.	MEV- 250x.....	50
4.15.	MEV- 1000x.....	50
4.16.	MEV- 5000x.....	51
4.17.	Imagens microscópio óptico-10x.....	51
4.18.	Imagens microscópio óptico-45x.....	52
4.19.	Curva granulométrica- Brita ₀ especial.....	52
4.20.	Slump concreto com ANR-C30.....	54
4.21.	Massa específica do concreto fresco.....	55
4.22.	Teor de ar incorporado.....	56
4.23.	Absorção de água por imersão.....	57
4.24.	Índice de vazios.....	57
4.25.	Massa específica real – concreto no estado endurecido.....	58
4.26.	Resistencia à compressão simples.....	59
4.27.	Resistência à tração por compressão diametral.....	60
4.28.	Módulo de elasticidade dinâmico.....	61
4.29.	Módulo de elasticidade estático.....	62
4.30.	Comportamento elástico dos componentes do concreto.....	63
4.31.	Expansão média obtida na autoclave.....	64
4.32.	Expansão média da reação álcali-agregado.....	65
4.33.	Estereoscopia dos concretos-10x.....	66

Lista de Tabelas

2.1. Impactos do processamento de minérios.....	07
2.2. Principais estatísticas brasileiras sobre o Quartzo.....	09
2.3. Aplicações e produtos das ligas e silício metálico fabricados em Minas Gerais.....	10
2.4. Classificação de resíduos sólidos das indústrias de ferroligas e silício metálico.....	11
2.5. Consumo per capite de materiais e previsão para o Brasil até 2030.....	13
2.6. Classificação dos agregados.....	15
2.7. Influência das características do agregado nas propriedades do concreto.....	17
2.8. Limites de substâncias deletérias presentes no concreto.....	19
3.1. Composição química do rejeito.....	24
3.2. Exigências físicas, mecânicas e químicas- cimento CP V-ARI.....	26
3.3. Traços C20, C30 e C40.....	29
4.1. Dimensão máxima característica e módulo de finura.....	42
4.2. Teor de Inchamento.....	46
4.3. Fluorescência de raios X das areias.....	47
4.4. Composição mineralógica- DRX.....	49
4.5. Caracterização física da brita ₀	53
4.6. Relação de consumo de cimento e relação água/cimento.....	53
4.7. Consumo de cimento e água dos concretos produzidos.....	54
4.8. Abatimento tronco de cone.....	55
4.9. Anova- Resistência à compressão simples.....	59
4.10. Anova- Resistência à tração.....	60
4.11. Anova- Módulo de elasticidade dinâmico.....	61
4.12. Anova- Módulo de elasticidade estático.....	63

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAFE	Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e de Silício Metálico
ABCP	Associação Brasileira de cimento Portland
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil
ANOVA	Análise de Variância
ANR	Areia Natural de Rio
AIG	Areia Industrial de Gnaisse
AOR	Areia Ótima Reciclada
ASTM	American Society for Testing and Materials
BZE	Brita zero especial
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CETESB	Companhia Ambiental do estado de São Paulo
CP	Corpo de prova
EC	Estereoscopia
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
EPUSP	Escola politécnica da USP
DMC	Dimensão máxima característica
DRX	Difração de raios X
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e estatística
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica
ME	Módulo de Elasticidade
MEe	Módulo de elasticidade estático
MEd	Módulo de elasticidade dinâmico
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MF	Módulo de finura
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma MERCOSUL
FEAM	Federação Estadual do Meio Ambiente
FRX	Fluorescência de raios X
PIB	Produto Interno Bruto
PRAD	Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
SE	Elétrons secundários
SINDIEXTRA	Sindicato da Indústria Mineral do Estado de Minas Gerais
SSS	Saturado superfície seca
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
VSI	Vertical Shaft Impactor
ZU	Zona utilizável

Sumário

Capítulo - 1	1
1.1. Justificativa	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo Geral:	4
1.2.2. Objetivos Específicos:	4
Capítulo – 2	5
2.1. Impactos da mineração	5
2.1.1. Mineração de Quartzo.....	8
2.1.2. Produção de ferroligas e silício metálico.....	9
2.2. Construção civil e a sustentabilidade.....	11
2.2.1. Consumo de agregados	13
2.2.2. Agregados	14
2.2.3. Propriedades dos agregados.....	17
2.2.4. Viabilidade econômica da produção de areia artificial a partir de rejeito da mineração.....	19
2.3. Ensaio especiais.....	20
2.3.1. Módulo de elasticidade	20
2.3.2. Ensaio de expansão na Autoclave do Cimento Portland (modificado).....	21
2.3.3. Reatividade álcali-agregado.....	22
Capítulo - 3	23
3.1. Materiais	23
3.1.1. Agregados miúdos	23
3.1.2. Agregados graúdos	25
3.1.3. Cimento.....	25
3.2. Métodos	26
3.2.1. Produção da areia ótima.....	26
3.2.2. Caracterização física dos agregados	27
3.2.3. Caracterização química, mineralógica e morfológica.....	27
3.2.4. Dosagem dos concretos	29
3.2.5. Propriedades do concreto no estado fresco.....	30
3.2.6. Propriedades do concreto no estado endurecido.....	30
Capítulo - 4.....	39

4.1.	Produção da areia.....	39
4.2.	Caracterização das areias	41
4.2.1.	Distribuição granulométrica	41
4.2.2.	Teor de material fino passante na peneira 0,075mm	42
4.2.3.	Massa Específica.....	43
4.2.4.	Massa Unitária	43
4.2.5.	Absorção de água.....	44
4.2.6.	Teor de umidade total	45
4.2.7.	Teor de Inchamento	46
4.2.8.	Impurezas orgânicas	46
4.3.	Caracterização química, mineralógica e morfológica das areias	47
4.3.1.	Fluorescência de raios X.....	47
4.3.2.	Difração de raios X	48
4.3.3.	Microscopia eletrônica de varredura.....	49
4.3.4.	Microscopia estereoscópica dos grãos	51
4.4.	Caracterização física da Brita	52
4.5.	Produção dos concretos	53
4.6.	Caracterização do concreto no estado fresco	54
4.6.1.	Ensaio de abatimento do tronco de cone	54
4.6.2.	Massa específica do concreto no estado fresco.....	55
4.6.3.	Teor de ar incorporado.....	56
4.7.	Caracterização do concreto no estado endurecido	57
4.7.1.	Índice de vazios, absorção de água e massa específica.	57
4.7.2.	Caracterização elasto-mecânica	58
4.7.3.	Ensaio de durabilidade	63
4.7.4.	Caracterização morfológica do concreto	65
Capítulo - 5	67
5.1.	Conclusões	67
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

CAPÍTULO - 1

1 INTRODUÇÃO

A produção de areia no Brasil, em 2001, era cerca de 150 milhões de metros cúbicos por ano; em relação à brita, a produção chegou à casa dos 100 milhões de metros cúbicos por ano, alcançando um total de agregados superior a 250 milhões de metros cúbicos por ano, segundo Tunes (2001). De acordo com dados de 2013, a produção de areia no Brasil foi cerca de 377 milhões toneladas (DNPM, 2014). O consumo de agregados no Brasil é em torno de 3,3t/hab/ano. Pode-se considerar esses valores baixos, pois o consumo per capita de agregados em países desenvolvidos está entre 5 e 15t/hab/ano, e segundo Texier (2001), a França que tem uma superfície territorial de 547.030 km², com 60 milhões de habitantes, produz e consome em torno de 6,5 t/hab/ano.

A extração de areia dos leitos dos rios causa diversos impactos ambientais, dentre eles: a erosão das margens, a devastação da mata ciliar, a modificação e agressão das calhas. Esses impactos geram desequilíbrio hidrológico (CETEM, 2004), porém, segundo Texier (2001), ainda não se pensa, em nível mundial, na redução da extração de areia, pois além de ser o principal insumo da construção civil, ainda não possui um sucessor a altura.

A construção civil é responsável por grandes impactos ambientais devido ao alto consumo de agregados naturais para a produção de argamassas e concretos, tornando-os cada vez mais escassos. Junto a esse panorama, temos a mineração gerando cada vez mais resíduos e, assim, causando mais problemas ambientais. A mineração de areia e brita, por exemplo, é uma atividade extrativista do setor mineral de grande importância. Em 2010, a produção de agregados total no Brasil foi em torno de 556 milhões de toneladas, enquanto que no mesmo ano a produção total de minério de ferro foi algo em torno de 372 milhões de toneladas, sendo esse o principal produto mineral brasileiro (ALMEIDA & LUZ, 2012).

Devido aos impactos gerados, são cada vez maiores as restrições ambientais em relação à exploração de recursos minerais. Outro item relevante é a disponibilidade de areia natural de boa qualidade, que em muitos lugares é extremamente difícil, o que justifica o interesse do Brasil em desenvolver tecnologias alternativas e tornar o setor da construção civil um potencial consumidor de resíduos provenientes de outros setores como, por exemplo, os resíduos da mineração. São muitos os estudos que visam a substituição de agregados naturais por resíduos de diversas fontes, como pode ser visto nos trabalhos de Fontes (2013), que

substituiu agregados naturais por rejeito de minério de ferro para produção de argamassas; Giordani (2014) que utiliza o resíduo do beneficiamento do arenito em substituição ao agregado miúdo em argamassas; Russo (2011) que utilizou o rejeito da extração de quartzito como agregado para a construção civil.

Desta forma, propõe-se estudar a utilização de rejeito da mineração de quartzo para produção de areia com granulometria ótima a partir de seu processamento, de forma a substituir os agregados miúdos usualmente utilizados em concretos na construção civil em geral. O presente trabalho está estruturado de forma, que a importância do assunto e a justificativa para o tema está exposta no Capítulo 1, a contextualização do setor da construção civil e da mineração em relação à sustentabilidade, além da importância da mineração de quartzo no Brasil, o consumo de agregados e seus impactos no Capítulo 2. No Capítulo 3, serão apresentados os materiais e métodos, onde será exposto todo o processo de produção da areia ótima reciclada, a metodologia de caracterização das areias utilizadas, a produção dos concretos e todos os ensaios realizados com os concretos no estado fresco e endurecido. A discussão dos resultados será abordada no Capítulo 4, tratando cada um dos resultados obtidos, comparando e analisando o desempenho das três areias estudadas de forma a comprovar a qualidade técnica da areia ótima reciclada. E por fim, no Capítulo 5 serão feitas as conclusões sobre a utilização, na construção civil, da areia produzida a partir da reciclagem de resíduos sólidos da mineração de quartzo e, também, serão propostas sugestões para trabalhos futuros.

1.1. Justificativa

O setor de ferro-ligas e de silício metálico se destaca como o 6º segmento com maior superávit dos últimos quatro anos no Brasil, representando 7% da balança comercial, com exportações que totalizam cerca de R\$ 4,5 bilhões/ano (ABRAFE, 2014). A extração de quartzo em 2013, no Brasil, foi cerca de 10.696 ton (DNPM, 2014). Em torno de dois milhões de toneladas/ano de quartzo destinam-se à produção de silício e ferrosilício. Desse total extraído, cerca de 15% (300 mil toneladas) são descartados na forma de rejeito e lascas de quartzo, durante os processos de extração, separação, transporte e lavagem (ARGONZ, 2001).

Segundo a ABRAFE (2014), o Brasil, em 2010, teve a maior produção de ferrosilício dos últimos dez anos, atingindo 247 mil toneladas, com crescimento de 42% sobre 2009. Já a produção brasileira de silício metálico, em 2010, cresceu apenas 20% sobre o ano anterior e

atingiu 184 mil toneladas. Apesar deste crescimento, a produção de 2010 foi 16% menor que a de 2008. Porém, de acordo com estudos do Ministério de Minas e Energia prevê-se aumento, em 2030, de mais de 48% na produção de ferrosilício e de 49,5% na produção do silício metálico em relação a produção de 2010. Esses dados sugerem que a produção de rejeito advinda da mineração de ferrosilício e silício metálico são significativos.

Por outro lado, os agregados para construção civil estão entre as matérias primas mais consumidas no Brasil. A demanda por estes materiais subiu de 460 milhões de toneladas, em 1997, para 673 milhões de toneladas, em 2011. O crescimento foi em torno de 82,3%, e o setor quase não sofreu o impacto das crises internacionais de 2008/9 e 2011/12 (IBRAM, 2012).

Em relação ao consumo de agregados, tivemos o aumento dos investimentos nacionais em infraestrutura para a Copa do Mundo de 2014 e, ainda, as Olimpíadas em 2016, os quais poderiam induzir que a demanda por agregados continue em alta até 2022. A demanda por agregados estimada para 2022 é de 807 milhões de toneladas, o que representa um aumento de, aproximadamente, 72% em relação à demanda em 2011. A região sudeste é ainda onde ocorre a maior demanda e produção de agregados no país. Sua produção é em torno de 48,1% do total produzido, seguido do nordeste que produz 20,1% (IBRAM, 2012). O IBRAM ainda forneceu uma projeção que prevê um déficit entre a produção e a demanda de agregados no Brasil, para os próximos anos. Em 2022 é previsto uma diferença em torno de 400 milhões de toneladas entre a demanda prevista e a produção de agregados.

Cerca de 90% da produção nacional de areia natural no Brasil é obtida a partir da extração em leito de rios e os 10% restantes, de outras fontes (várzeas, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, pegmatitos e arenitos decompostos). A exaustão de áreas próximas aos grandes centros consumidores e a restrição desta atividade extrativa pelos órgãos de fiscalização ambiental, tem resultado na exploração de areia em locais cada vez mais distantes dos grandes centros urbanos, o que aumenta muito o preço final da areia natural, visto que a distância entre produtor e consumidor tem sido em média de 100 km. O custo de extração da areia e seu transporte aos centros consumidores consistem de importante fator que impulsiona soluções tecnológicas na busca por novos materiais. Outro fator que contribui para a substituição da areia natural pela areia artificial é a possibilidade de produzir agregados artificiais com características adequadas para utilização no concreto e na argamassa, ou seja, a areia artificial que geralmente apresenta suas partículas finas com um formato alongado ou

lamelar, pode ser obtida através de britadores VSI, com o formato muito próximo do ideal, que é o formato cúbico e arredondado (ALMEIDA & SILVA, 2005).

Dessa forma, este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de transformar rejeitos da mineração de quartzo em agregados para a produção de concreto de cimento Portland, por meio de estudos que avaliem sua viabilidade técnica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral:

Produzir areia com granulometria ótima (ABNT) a partir do processamento do rejeito da mineração de quartzo, que visa a obtenção de ferrosilício e silício metálico.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Realizar a caracterização física, química, morfológica e mineralógica da areia natural de rio (ANR), da areia industrial de gnaiss (AIG) e também da areia ótima reciclada (AOR).
- Determinar o comportamento de concretos no estado fresco, através dos ensaios de abatimento de tronco (slump), da massa específica e do teor de ar incorporado, para dosagens obtidas com areias reciclada (AOR) e industrial (AIG), comparativamente aos resultados obtidos para areia natural (ANR).
- Determinar o comportamento no estado endurecido para dosagens obtidas com areias reciclada (AOR) e industrial (AIG), comparativamente aos resultados obtidos para areia natural (ANR), segundo:
 - ✓ Resistência à compressão
 - ✓ Resistência à tração
 - ✓ Módulos de elasticidade estático e dinâmico
 - ✓ Reatividade álcali-agregado
 - ✓ Expansibilidade na autoclave
- Disponibilizar informações relacionadas à viabilidade técnica para o uso desse rejeito como areia ótima para concreto de cimento Portland.

CAPÍTULO – 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Impactos da mineração

O setor mineral tem grande importância social e econômica no país, atualmente esse responde por 4,2% do PIB e 20% das exportações brasileiras. Além disso, o setor é responsável por um milhão de empregos diretos (8% dos empregos da indústria) e também está ligado à base de várias cadeias produtivas (MME, 2010). Porém os impactos ambientais da mineração são inevitáveis, pois geram a devastação da vegetação, muitas vezes causando a impossibilidade de regeneração da mesma. Na maioria das minas a camada superficial, considerada mais fértil, é retirada deixando o solo remanescente exposto à erosão, que levam ao assoreamento dos rios e da região próxima a mina (MECHI & SANCHE, 2010). De acordo com Barreto (2001), a recuperação das áreas degradadas pela mineração com base no princípio da reconstituição é impossível, dado que foi retirado uma parte importante da constituição daquele solo, o minério, e esse não será ser repostado, sem contar a falta de matéria orgânica, que constitui um dos principais problemas da recuperação de áreas degradadas.

Segundo Bacci et al. (2006), a remoção da camada superficial e a alteração do regime de escoamento de água, torna a mineração uma fonte potencial de problemas físicos, químicos e biológicos. Os efeitos ambientais estão associados às várias fases de exploração da mineração, bem como a abertura da cava, ao uso de explosivos no desmonte de rocha, ao transporte e beneficiamento do minério, afetando o solo, a água e o ar.

A mineração movimentada grande volume de materiais e assim gera uma quantidade de resíduos que depende do processo de extração do minério, da concentração de mineral, da profundidade da jazida em relação à superfície. Existem dois tipos principais de resíduos sólidos gerados pela mineração: os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são os materiais escavados, gerados no decapeamento da mina, não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas. Já os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento dos minerais, esses processos têm a finalidade de padronizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final (CAVALCANTE et al, 1997).

As principais consequências da mineração no meio ambiente são: a degradação visual da paisagem, como pode ser visto na Figura 2.1, os ruídos e vibrações, principalmente durante o desmonte e também, decorrentes de equipamentos do processo de beneficiamento, além de poeiras e gases, que são um dos maiores incômodos sofrido pelos habitantes próximos a mineração, bem como a contaminação das águas e a disposição final de rejeitos e estéril (SILVA, 2007). Em relação a esses últimos itens é de fundamental importância que o estéril e o rejeito sejam armazenados de maneira adequada, de forma que possam ser utilizados posteriormente como reaterro nas áreas mineradas, no caso do estéril, e o rejeito possa ser aproveitado em outros setores, como na construção civil. É imprescindível que a mineradora, tenha essa preocupação com a estocagem dos rejeitos para que não haja contaminação desse material que possa torna-lo inadequado ao uso.



Figura 2.1: Impactos visuais gerados pela mineração em Guararema (SP)
Fonte: MECHI & SANCHES, 2010

Ainda segundo Cavalcante et al (2011), devido à complexidade e a diversidade de operações e tecnologias utilizadas nos processos da extração e beneficiamento dos minerais é difícil quantificar o volume de resíduos sólidos gerados. Porém sabe-se que as principais fontes de

degradação na atividade mineradora são a disposição inadequada de rejeitos, gerados do processo de beneficiamento, e de materiais do estéril, provenientes do decapeamento superficial da lavra. A Tabela 1.1, a seguir, relaciona alguns dos impactos gerados pelo processamento do minério.

Tabela 2.1: Impactos do processamento de minérios

Atividade	Aspectos	Impactos
Descarregamento do minério	Geração de poeira e ruído	Poluição do ar e sonora, desconforto aos trabalhadores.
Britagem da rocha	Geração de poeira e ruído	Poluição do ar e sonora, riscos de doenças pulmonares e desconforto aos trabalhadores.
	Riscos de acidentes	Perda de vidas e materiais
	Consumo de energia	Utilização de recursos naturais, eventuais acidentes, suspensão das partículas.
	Vibração dos equipamentos	Perda de rendimento
Umidificação das correias transportadoras	Consumo de água	Utilização de recursos naturais, eventuais acidentes, redução da suspensão das partículas.
Transferência de materiais	Escape/ perda de material	Riscos de acidentes, conforme o diâmetro do minério.
	Geração de poeira e ruído	Poluição do ar e sonora, desconforto dos trabalhadores.
Estocagem do produto	Geração de poeira, ruído e emissão de gases produzidos pelas máquinas.	Poluição do ar e sonora, intoxicação por gases

Fonte: Bacci et al, 2006

A mineração de agregados para a construção civil normalmente está inserida na malha urbana, ou muito próxima dela, devido principalmente aos custos de transporte. Com isso os conflitos são permanentes entre as comunidades do entorno e a mineração, por motivos de geração de particulados e ruídos. Assim se faz necessária dedicação total à gestão dos impactos socioambientais para minimizar esses conflitos (SILVA, 2012).

Entretanto, esses impactos podem ser reduzidos, se a atividade for planejada e executada dentro do conceito de sustentabilidade, impedindo a geração de passivo ambiental. Em alguns locais esse passivo ocasiona riscos, sobretudo nas minerações que foram abandonadas devido o esgotamento da jazida ou por razões econômicas.

Em 1989, instituiu-se que todos os empreendimentos de extração mineral em operação no país e dos novos empreendimentos do gênero apresentassem um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas – PRAD ao órgão ambiental competente, durante o processo de licenciamento

ambiental (BARRETO, 2001). Porém devido à falta de integração das instituições envolvidas no licenciamento ambiental e a complexidade desse procedimento acabam por transformar instrumentos técnicos, como o PRAD, em documentos puramente burocráticos, onde esses são apresentados apenas para o cumprimento das normas processuais, e não de forma a orientar o controle e a reparação das áreas devastadas. Os órgãos responsáveis pelo licenciamento muitas vezes, não conseguem analisar e fiscalizar todos os PRADs, deixando muitas vezes a cargo das empresas as disposições sobre a recuperação ambiental das áreas comprometidas (MMA, 1997).

2.1.1. Mineração de Quartzo

O óxido de silício é encontrado na natureza sob as formas polimorfas: quartzo, tridimita e cristobalita. Esses minerais sujeitos a agentes intempéricos, como a temperatura, sofrem uma transformação de fase, recebendo cada uma, a sua denominação específica. A tridimita e a cristobalita são metaestáveis em condições normais de temperatura e pressão, são mais facilmente encontrados em rochas vulcânicas (METHA & MONTEIRO, 2014). Os materiais compostos de sílica não cristalinos são denominados vidro. O quartzo é a forma mais comum, sua composição química é SiO_2 (sílica), na proporção Si=46,75% e O=53,25%, e em sua composição podem entrar também lítio, sódio, potássio e titânio (BATISTA et al, 2009). O quartzo está presente em grandes quantidades nas rochas ígneas do tipo ácidas (>65% de SiO_2) a exemplo os granitos e riolitos (METHA & MONTEIRO, 2014).

O Brasil é o país que possui as maiores reservas de quartzo do mundo. Porém, a extração do quartzo aqui no Brasil não possui base tecnológica para agregar valor e explorar toda a potencialidade de uso do mineral, pois muitas das empresas operam no regime de garimpo e de forma muito rudimentar. A lavra de quartzo no Brasil em sua maioria apresenta-se a céu aberto ou subterrâneas de pequena profundidade e a principal característica das jazidas de quartzo é a proporção extremamente pequena do material utilizável em relação ao quartzo existente no depósito. O quartzo límpido, que é o produto vendável, é algo em torno de 0,004% e o quartzo utilizado para fins piezoelétricos, o aproveitamento é de 0,025% (LOBATO, 2009).

A utilização de tecnologias mais avançadas na exploração de quartzo é complexa devido à necessidade de se preservar estrutura do cristal, evitando-se danos por quebra. Já no caso de extração de lascas, a mecanização pode se estender no caso das jazidas serem contínuas. O

quartzo pode ser utilizado para diversos fins, dependendo da sua qualidade. Os cristais de melhor qualidade destinam-se à indústria óptica, eletrônica e de instrumentação, que são os maiores consumidores, enquanto os de menor qualidade destinam-se à indústria em geral, como a indústria de abrasivos, cerâmica e metalúrgica. A produção brasileira de quartzo bruto teve significativo aumento de produção desde 2004 (LOBATO, 2009). O Brasil está entre os principais produtores mundiais, porém quase toda a produção é destinada a exportação, como pode ser visto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Principais estatísticas brasileiras sobre o quartzo

Discriminação		Unidade	2009	2010	2011
Produção	Quartzo cristal	t	11.588	13.024	17.657
Importação	Bens Primários (lascas e quartzo bruto)	t	333	466	670
		10 ³ US\$ FOB	616,00	794,00	888,00
	Manufaturados (Quartzo piezoelétrico)	kg	78,58	115,80	119,93
		10 ³ US\$ FOB	19	28	29
	Manufaturados (Cristais piezoelétricos)	t	90	129	147
		10 ³ US\$ FOB	21.760	27.451	34.000
Exportação	Bens Primários (lascas e quartzo bruto)	t	11.588	13.024	17.657
		10 ³ US\$ FOB	4.424	4.135	7.479
	Manufaturados (Cristais piezoelétricos)	t	1	5	2
		10 ³ US\$ FOB	593	485	731
Consumo aparente	Quartzo cristal	t	333	466	670
	Cristal cultivado	t	89	124	145
Preço	Lascas e quartzo bruto	US\$-FOB/ T	295	317	423
	Cristal cultivado barra bruta	US\$-FOB/ T	241	212	210
	Cristal cultivado barra usinada	US\$-FOB/ kg	199	144-900	20-900

Fonte: DNPM, 2011

2.1.2. Produção de ferroligas e silício metálico

Segundo a FEAM (2010) as ferroligas são produtos que necessitam de alta tecnologia na sua produção. São ligas concentradas de ferro e um ou mais metais, como silício, manganês, magnésio, nióbio, cálcio e outros, que tem por finalidade melhorar as propriedades dos aços (propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas ou anticorrosivas). O silício metálico é um semi-metal que geralmente é considerado pertencente ao grupo de ferroligas, mesmo não sendo uma liga, mas por ser processado industrialmente e ter aplicações semelhantes.

A produção das ferroligas e do silício metálico se dá por meio da fusão do quartzo, de determinada pureza, juntamente com coque ou carvão mineral e eletrodos de grafite. Ocorre a

redução de carbono dos óxidos metálicos quando são consumidos o carvão mineral e os eletrodos de grafite. O carbono se liga ao oxigênio dos óxidos metálicos formando o CO₂, enquanto que os minerais são reduzidos a metais básicos derretidos. Por conseguinte, os metais presentes combinam-se na solução (FEAM, 2010). O ferro silício é comumente utilizado nas indústrias siderúrgicas e fundições para a produção de aço, também serve como aditivo desoxidante e como elemento de liga, na Tabela 2.3 abaixo, ilustra algumas aplicações e produtos das ligas e do silício metálico.

Tabela 2.3: Aplicações e produtos das ligas e silício metálico fabricados em Minas Gerais

Liga	Aplicações	Produto
Silício metálico	Fabricação de ligas de alumínio, indústria química e de eletroeletrônica	Peças para automóveis e aeronaves, produção de resinas, silicones e lubrificantes e componentes eletrônicos.
Ferro silício	Siderurgias e fundições (desoxidante nos aços comuns e elemento de liga)	Produtos metalúrgicos em geral
Ferro manganês	Indústria siderúrgica (praticamente todos os tipos de aço e fundidos de ferro devido a propriedade de dessulfuração)	Peças para automóveis e peças para uso geral em engenharia mecânica
Ferro fósforo	Fundição (aumenta a fluidez do ferro fundido líquido)	Peças fundidas para automóveis e peças para uso geral em engenharia mecânica.
Ferro nióbio	Indústria da construção civil, automotiva, aeronáutica e espacial	Tubulações (grades, estruturas, gasodutos e oleodutos) e ferramentas de alta precisão
Ferro magnésio	Fundição de peças estruturais, fabricadas por processo de fundição e/ou conformação mecânica	Indústria automobilística, ferramentas manuais e equipamentos eletrônicos.
Cálcio silício	Indústria siderúrgica	Aços e ferros fundidos com baixo teor de oxigênio e enxofre.

Fonte: FEAM, 2010

É grande a relevância do setor de ferroligas na economia brasileira, pois está entre os principais produtores e exportadores mundiais. Segundo SINDIEXTRA (2014), a demanda interna de ferroligas é cerca de 94% e é totalmente suprida pela indústria nacional, que ainda exporta aproximadamente 55% de sua produção. Minas Gerais é um dos principais produtores de ferroligas do país, produz cerca de 50% da produção nacional.

Semelhante a todo processo industrial, a fabricação de ferroligas apresenta diversos impactos ambientais, a começar pelo consumo intensivo de matérias-primas e energia, mas também, à emissão de poluentes atmosféricos, à emissão de efluentes líquidos, à geração de resíduos sólidos, ruído e principalmente uso do carvão vegetal como redutor. Dentre os resíduos sólidos produzidos estão os finos de quartzo, que nada mais são do que quartzo em granulometria menor do que a necessária ao processo, gerados no peneiramento. Em relação à

quantidade os principais resíduos são além dos finos de quartzo, os finos de carvão vegetal, pó do filtro de mangas do forno e escória (FEAM, 2010).

Os resíduos sólidos produzidos na fabricação das ferroligas de diversas empresas situadas em Mina Gerais, foram submetidos as análises ambientais prescrita pela NBR 10004/04, que os classificou como resíduos não perigosos, mas mesmo assim podem gerar danos ao meio ambiente quando não gerenciados de maneira adequada, a Tabela 2.4, abaixo é mostrado a classificação obtida para esses resíduos, de acordo com laudos fornecidos em visitas técnicas a diversos empreendimentos do setor no Estado de Minas Gerais, em relatório produzido pelo FEAM (2010).

Tabela 2.4: Classificação de resíduos sólidos das indústrias de ferroligas e silício metálico

Resíduo	Classificação
Finos do carvão	IIA
Finos de quartzo	IIB
Escória	IIA/IIB
Pó do filtro de mangas do forno	IIA

Verifica se, através da tabela, que todos os resíduos não são perigosos, porém com exceção dos finos de quartzo os resíduos mostram-se não inertes, ou seja, requerem cuidados ao serem estocados, não podendo ser armazenados diretamente no solo.

2.2. Construção civil e a sustentabilidade

A construção civil está presente maciçamente na vida das pessoas e em todas as regiões habitadas pelo homem no planeta, a cadeia produtiva da construção civil é muito provavelmente uma das maiores na economia mundial, conseqüentemente é, também, o maior gerador de impactos ambientais do mundo, pois é o principal consumidor de energia e recursos naturais, além de maior gerador de resíduos, seu impacto é diretamente proporcional a seu papel social (JOHN, 2000).

Segundo John (2000), o desenvolvimento sustentável é aquele que atende as necessidades básicas da população garantindo a todos a oportunidade de satisfazer suas necessidades, de forma a ter uma vida com qualidade, sem comprometer a capacidade das próximas gerações de atenderem suas próprias necessidades. De forma geral o desenvolvimento sustentável requer a produção de bens, utilizando se da menor quantidade possível de recursos naturais e causando a menor poluição.

Uma das maneiras de tornar o setor da construção civil menos impactante é reduzir a utilização de matérias primas naturais não renováveis, substituindo os por outros materiais, que os substituam sem diminuição da qualidade técnica e principalmente que sejam provenientes de processos menos impactantes ao meio ambiente. Uma boa opção é a utilização de resíduos provenientes de processos de setores como a mineração e siderurgia.

É enorme o potencial reciclador do setor da construção, pois a variedade de matérias que ele consome vem aumentando para diferentes aplicações e graus de industrialização e exigências técnicas, ou seja, são muitas as opções para se aplicarem na construção civil principalmente os diversos resíduos produzidos pela indústria. Existe uma grande flexibilidade na busca de materiais para esse setor, um exemplo são os diversos resíduos que podem substituir os agregados, sem perda de qualidade. Sabe-se que o setor é o maior consumidor de materiais siliciosos e que a sílica é a espécie atômica mais comum do planeta, ou seja, é muito provável que existam diversos resíduos silicosos que podem ser utilizados, sem perda de qualidade.

No Brasil ainda é pequeno o nível de reciclagem de resíduos na indústria da construção civil, salvo algumas exceções como as indústrias cimenteiras, onde se utilizam de escórias, na produção de alguns cimentos Portland, gerando a redução do consumo de clínquer, (mistura de calcário, argila e componentes químicos como silício, alumínio e ferro) e o aumento da utilização de escórias, que são um resíduo da metalurgia (JOHN, 2000). Segundo Takano et al (2000), no Brasil, 63% da escória de alto forno é reciclado nas indústrias cimenteiras. Apesar da pouca aplicação, existem diversos estudos que visam a reciclagem como alternativa para materiais utilizados na construção civil, como pode ser visto nos trabalhos de Peixoto et al (2014), Januzzi (2012), França et al (2013), Okada (2013) e Santos et al (2014).

O setor da construção civil vem cada vez mais buscando incentivar e investir em edificações sustentáveis e no desenvolvimento de produtos tecnicamente sustentáveis. Apesar das dificuldades de se obter um desempenho equivalente entre os materiais convencionais e os chamados “produtos verdes”. O grande desafio da indústria é encontrar e fornecer produtos menos impactantes ao ambiente e economicamente viáveis, dado que no conceito de sustentabilidade é importante considerar o fator econômico (CUNHA JÚNIOR, 2012). Uma medida importante tomada no âmbito da sustentabilidade foi a promulgação, em 1999, da Lei nº10.311 do Estado de São Paulo, que designa o Selo Verde a estabelecimentos que comprovadamente executem medidas de preservação do meio ambiente de acordo com as normas ambientais, concedido pelo CETESB (JOHN, 2000). Hoje já é comum a certificação

verde de edifícios, e muitas empresas têm se esforçado para obter esse “selo verde”, objetivando valorizar seus produtos, de forma que atualmente em uma mesma região um apartamento com selo verde é muito mais valorizado que um sem o selo.

2.2.1. Consumo de agregados

O consumo de agregados, utilizados na construção civil, é utilizado como parâmetro importante para indicar a situação econômica e social de um país. Segundo Valverde (2001), enquanto os EUA consomem anualmente cerca de 7,5 ton/habitante de agregado, a Europa Ocidental, em torno de 5 a 8 t/habitante/ano, o Brasil consome em torno de 2,5 t/habitante/ano. A Tabela 2.5 apresentada a seguir, mostra o consumo per capita de agregados e cimento, bem como a previsão de consumo dos mesmos no Brasil até 2030.

Tabela 2.5: Consumo per capita de materiais e previsão para o Brasil até 2030

	Europa	EUA	China	Índia	Mundo	Brasil			
Material	2008				2008	2008	2015	2022	2030
Agregados (ton)	6,0-10,0	9,0	n.d.	n.d.	3,5	2,5	3,6	5,1	7,0
Cimento (kg)	400-1200	425	900	136	393	270	372	521	726

Fonte: MME, 2010

O consumo baixo se dá devido a uma demanda reprimida por agregados e pela inexistência de obras adequadas de infraestrutura e habitação (ALMEIDA & LUZ, 2012).

Os agregados para construção civil são considerados, relativamente, bens com baixo valor unitário, porém com grandes volumes físicos de comercialização dentre todos os produtos da indústria mineral. Em 2010, segundo a pesquisa feita por Lacerda Júnior (2011), o consumo de agregados total no Brasil foi de 631.740.387 toneladas, a distribuição desses valores pode ser vista na Figura 2.2. Levando em consideração os preços do IBGE para cada estado e sem considerar o frete, o faturamento de agregados foi de R\$ 22.590.071.817,00 e equivale a 0,615% do PIB brasileiro.

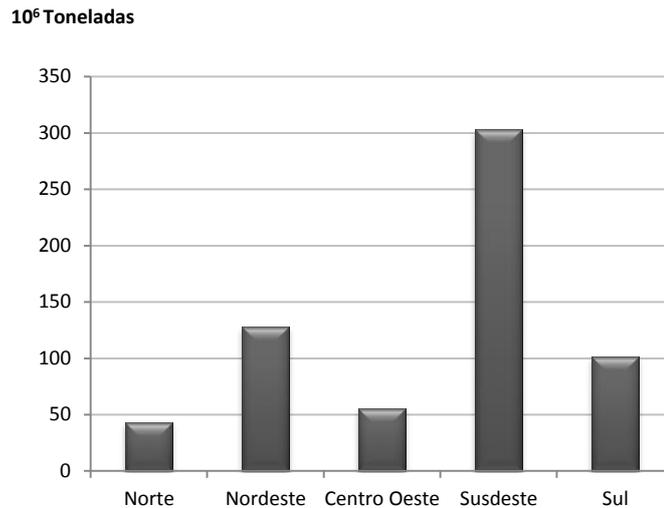


Figura 2.2: Consumo de agregados por região

A localização das jazidas para extração do agregado é um dos itens mais importantes, pois ela deve estar próxima ao mercado consumidor em função do elevado custo de frete. Desde 2000, que o preço do frete brasileiro vem aumentando e dessa forma aumentando também o valor dos agregados. Devido às restrições ambientais dos órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente estarem cada vez mais rígidas, em relação à extração de areia realizada nas várzeas e leitos de rios, o que tem provocado a migração dos mineradores para locais cada vez mais distantes dos centros consumidores, aumentando assim o preço final do produto, esse aumento chega próximo de 75% do preço final da areia e 30% do valor da brita (ALMEIDA & SILVA, 2005).

2.2.2. Agregados

Os agregados compõem grande parte do volume total dos concretos e argamassas, desempenhando dessa forma um importante papel no custo total dos mesmos, além de influenciarem de maneira positiva, diminuindo a retração das pastas constituídas de cimento e água e ainda contribuirão significativamente para o aumento de resistência mecânica e ao desgaste superficial das argamassas e concretos (RIBEIRO et al, 2002).

Segundo a NBR 9935/11 os agregados são definidos como material granular, comumente inerte, que apresentam propriedades e dimensão ajustadas para a produção de argamassas e concretos. Como principais funções têm-se a redução de custos, pois são materiais com custo unitário mais baixo, quando comparados ao cimento, e ocupam um volume significativo nos concretos, esse volume atinge cerca de 90% do volume total (METHA & MONTEIRO,

2014). Além de contribuírem tecnicamente com estabilidade dimensional e maior durabilidade, quando comparado à pasta de cimento pura (NEVILLE, 1997).

Segundo Giordani (2014) existem diversas formas de classificar os agregados, a NBR 9935/11 adota algumas terminologias que podem ser divididas: em relação à natureza, a dimensão e a densidade, ilustradas na Tabela 2.6, abaixo:

Tabela 2.6: Classificação dos agregados

Natureza	Naturais, onde são retirados da natureza e podem ser lavados, classificados ou britados.
	Artificiais, resultado de processos industriais (alteração mineralógica, química ou físico-química).
	Reciclados, são os materiais reciclados de resíduos ou subprodutos industriais.
Dimensões	Agregado graúdo são os grãos retidos na peneira com 4,75 mm e passantes na peneira com 75 mm
	Agregado miúdo são os grãos retidos na peneira com 0,15 mm e passantes na peneira com 4,75 mm
Densidade	Densidade normal com valores entre 2.000 e 3.000 kg/m ³
	Leves (exemplos; argilas expandidas, vermiculita e outros).
	Pesados (exemplos: barita, magnetita, limonita e outros).

Metha & Monteiro (2014) definem que algumas das características mais relevantes dos agregados para a produção dos concretos são: a granulometria, a porosidade, a forma e textura superficial, a resistência à compressão, a absorção de água, a presença de substâncias deletérias (terra, argila, húmus, cloretos acima de 0,02% e sulfatos acima de 1%), a estabilidade e o módulo de elasticidade.

Devido a grande influência do agregado no desempenho do concreto, é necessário que haja uma seleção adequada dos mesmos, observando-se a aplicação (tipo de concreto) e o ambiente que será inserido as peças de concreto. Nos últimos anos houve grande evolução dos traços de concreto, de forma que utiliza-se teores cada vez maiores de argamassas, como objetivo de produzir traços mais trabalháveis e assim evidenciando a importância dos agregados miúdos na qualidade e economia do traço. De forma a analisar não só a granulometria, mas também a sua mineralogia, considerando a influência nas propriedades reológicas do concreto como a coesão e o ângulo de atrito interno e a trabalhabilidade (ISAIAS, 2011).

As características dos agregados relevantes na produção dos concretos, como descrito na Figura 2.3 a seguir, são decorrentes do material de origem, da microestrutura, das condições que estão expostos e a elementos relacionados ao processo de produção desse agregado, sendo que essas características influenciam não somente na dosagem do concreto, mas também, no seu comportamento nos estados fresco e endurecido (METHA & MONTEIRO, 2014).



Figura 2.3: A origem das características do agregado, relevantes na produção do concreto.

Os agregados devem apresentar propriedades que cumpram a função desejada na edificação, durante o período estipulado em projeto, e que possam ser manipulados e manuseados satisfatoriamente durante os processos da construção (transporte, estocagem, mistura dos agregados com o ligante, aplicação da mistura, compactação e cura), conforme apresentado na Tabela 2.7, a seguir.

Tabela 2.7: Influência das características do agregado nas propriedades do concreto

Propriedades do concreto	Características relevantes dos agregados
Resistência mecânica	Resistência mecânica
	Textura superficial
	Limpeza
	Forma dos grãos
	Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade
	Forma dos grãos
	Textura superficial
	Limpeza
	Dimensão máxima
Massa unitária	Massa específica
	Forma dos grãos
	Granulometria
	Dimensão máxima
Economia	Forma dos grãos
	Granulometria
	Dimensão máxima
	Beneficiamento requerido
	Disponibilidade

2.2.3. Propriedades dos agregados

2.2.3.1. Granulometria

A granulometria dos agregados pode aumentar a porosidade dos concretos e até mesmo o seu custo de produção, além de influenciar a compacidade e as propriedades mecânicas. Em geral as areias muito grossas geram misturas de concreto ásperas e com baixa trabalhabilidade enquanto as muito finas aumentam o consumo de água, e conseqüentemente, o consumo de cimento para manter uma dada relação água/cimento, ou seja, a utilização de agregados miúdos com granulometria inadequada geram misturas de concreto antieconômicas (ISAIAS, 2011).

Para se obter uma mistura de concreto econômica, com boa trabalhabilidade e ainda produzir uma estrutura menos porosa é importante que a areia tenha uma distribuição granulométrica equilibrada e preferencialmente contínua. Básilio (1995, apud MENOSSI, 2004), considera que uma areia possui granulometria ótima quando para uma mesma consistência e mesma relação água/cimento, obtém-se o menor consumo de cimento. Menossi (2004) ainda cita que inicialmente acreditava-se que a melhor granulometria seria a que gerasse o máximo de

compacidade, porém isso requeria uma granulometria descontínua e acabava por afetar a trabalhabilidade, em seguida verificou-se que a granulometria contínua seria a melhor opção em relação à trabalhabilidade das misturas cimentícias. De acordo com Lobo Carneiro (1953, apud MENOSSI, 2004), concluiu que a granulometria contínua variava com a proporção cimento/agregado e que deve-se utilizar a menor porcentagem de finos possível.

2.2.3.2. Massa específica e massa unitária

Para os agregados miúdos definem-se dois tipos de massa específica, a real e unitária. (PETRUCCI, 1982 apud, MARTINS, 2008). A massa unitária tem grande importância na produção de concretos e argamassas, pois é por meio dela que obtemos os traços em peso ou volume.

2.2.3.3. Absorção de água e umidade superficial

A absorção representa o volume de poros existentes no agregado em que a água pode penetrar, ou mais especificamente, determina a quantidade de água requerida para alterar a condição do agregado de seco ao ar a condição SSS (saturado superfície seca). A unidade superficial se define com a quantidade de água no agregado, além da quantidade necessária para alcançar a condição SSS. Devido ao fenômeno de inchamento, em que o agregado miúdo absorve água e modifica seu volume, é de grande importância controlar a umidade presente no agregado de forma a corrigir o traço em relação à quantidade de água e também do agregado miúdo, no caso de traço em volume (ISAIAS, 2011).

2.2.3.4. Forma e textura superficial

O formato dos grãos e a sua textura superficial influenciam nas propriedades do concreto tanto no estado fresco como no endurecido. No caso de agregados que se apresentem com o formato alongado e superfície áspera é comum a necessidade de aumentar a quantidade da pasta cimentícia, elevando assim o custo de produção, além de prejudicar a trabalhabilidade da mistura. Porém agregados com superfícies muito lisas podem gerar a redução da aderência entre a pasta e o agregado, podendo diminuir a resistência à flexão do concreto (METHA & MONTEIRO, 2014).

Segundo Neville (1997), em agregados miúdos a forma e a textura interferem mais sobre a quantidade de água de amassamento, enquanto que nos agregados graúdos, o formato lamelar apresenta efeitos positivos na trabalhabilidade do concreto.

2.2.3.5. Substancias deletérias

As substancias deletérias, são substancias que podem estar presentes na constituição de agregados graúdos e miúdos e podem causar prejuízo a trabalhabilidade, ao endurecimento e a durabilidade do concreto.

De acordo com Neville (1997) existem três grupos de substâncias deletérias, que podem afetar os processos citados acima são elas: as impurezas que alteram a hidratação do cimento, que impedem a aderência entre a pasta de cimento e os agregados e as partículas fracas. Na Tabela 2.8 a seguir apresentam-se as substancias e os teores máximos considerados nos agregados utilizados em concreto e argamassas.

Tabela 2.8: Limites de substâncias deletérias presentes no concreto

Substancia	Possíveis efeitos deletérios sobre o concreto	Teor máximo permitido (% em massa)	
		Miúdo	Graúdo
Material passante na peneira n°200 (abertura 75µm)	Afeta a trabalhabilidade e aumenta a demanda de água	-	
Concretos sujeitos a abrasão		3,0	1,0
Todos os outros concretos		5,0	-
Torrões de argila e partículas friáveis	Afetam a trabalhabilidade e a resistência à abrasão	-	
Carvão mineral e lignita	Afetam a durabilidade e causam manchas	-	
Concreto aparente		0,5	0,5
Todos os outros concretos		1,0	-
Chert (massa específica menor que 2400 kg/m³)	Afeta da durabilidade	-	5,0

Fonte: METHA & MONTEIRO, 2014.

2.2.4. Viabilidade econômica da produção de areia artificial a partir de rejeito da mineração

A produção de agregados para a construção civil a partir do co-processamento de rejeitos da mineração consiste em atividade economicamente viável segundo Gonçalves et al (2015).

Considerando os custos do processo de obtenção de agregados a partir do rejeito da mineração de quartzo, propõe-se planta industrial constituída por um conjunto de britadores, peneiradores e correias transportadoras inseridas no pátio de rejeito. Essa alternativa elimina custos com estocagem, destinação final e transporte do rejeito bruto.

Contudo uma análise mais detalhada deve ser conduzida em relação a viabilidade econômica para a utilização do rejeito da mineração de quartzo como agregado para a construção civil.

2.3. Ensaios especiais

2.3.1. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é um parâmetro importante para aplicação de materiais, uma vez que está ligado às propriedades mecânicas, como tensão de escoamento, a tensão de ruptura, variação de temperatura que causam trincas, como o choque térmico, e essas propriedades são intrínsecas do material e estão relacionadas com sua composição química, sua microestrutura e seus defeitos, como a porosidade (COOSOLINO & PEREIRA, 2010). O módulo é necessário para verificar a estabilidade da estrutura, e assim também verificar a deterioração do concreto ao longo do tempo (ODELSON et al, 2007). De acordo com Andriolo (1989), os fatores que interferem nos módulos de elasticidade do concreto são a quantidade e a qualidade dos agregados, o tipo e a quantidade de cimento, a idade, assim como também, a porosidade do concreto.

Existem dois tipos de módulos de elasticidade, o estático e o dinâmico. O módulo estático é obtido a partir da curva de tensão x deformação, seguindo a normatização NBR 8522/08. Nessa norma verificamos que há três tipos de módulo de elasticidade estático são eles: o tangencial a origem, o módulo tangente e o módulo secante, ilustrados na Figura 2.4. O módulo tangencial a origem é o coeficiente angular da reta a qualquer ponto da curva tensão x deformação, geralmente na origem. O módulo de elasticidade secante é obtido pelo coeficiente angular da reta que une um ponto da curva com a origem. E o módulo tangente é definido por dois pontos quaisquer da curva, onde obtém-se o coeficiente angular da reta, de acordo com a NBR 8522/08, as tensões adotadas para concretos são 0,5MPa e a tensão de 30% da carga de ruptura advinda do ensaio de compressão simples.

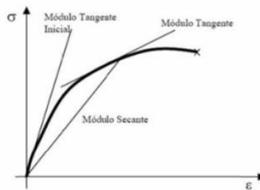


Figura 2.4: Módulos de elasticidade estático.

Já o módulo de elasticidade dinâmico é um método, não destrutivo, que através da aplicação de ondas de ultrassom, nos fornece o módulo elástico dinâmico. O ensaio segue a ASTM C 597/09, pois não existe normatização brasileira.

Segundo Pacheco et al (2014) o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico é aplicado na verificação da homogeneidade do concreto, da qualidade da concretagem, na espessura de fissuras, espaços vazios, entre outros aspectos. É também muito utilizado para analisar tensões em estruturas que sofrem com terremotos ou impactos (Metha & Monteiro, 2014).

2.3.2. Ensaio de expansão na Autoclave do Cimento Portland (modificado).

Segundo a ASTM C-151, o ensaio tem como objetivo verificar a expansão das barras de cimento e água, quando expostas a alta temperatura e pressão. Essas expansões podem ser causadas devido a reações de cal livre, magnésio e sulfato de cálcio, presentes na pasta de cimento. O ensaio de expansão em autoclave fornece uma indicação da expansibilidade em longo prazo da expansão devido ao magnésio e a cal livre (BROOKS & NEVILLE 2013). O ensaio consiste na confecção de barras de pasta de cimento pura com comprimento conhecido. Porém no ensaio modificado, produz se barras de argamassa de acordo com a NBR 15577/08, que determina que os corpos de prova devem ser prismáticos, de seção quadrada, com 2,5cm de lado e 28,0cm de comprimento. Eles devem conter dois pinos, um em cada extremidade, para a medição das dimensões e suas variações em extensômetro digital. A argamassa deve ser feita com o cimento CPV-ARI e água destilada seguindo a relação $a/c=0,47$ e traço: 1; 2,25; 0,47.

Os corpos de prova são submetidos à cura úmidos por 24 horas, e então desenformados e medidos seu comprimento inicial e em seguida são colocados na autoclave, que através do vapor d'água atinge alta pressão e altas temperaturas, que devem ser mantidas constantes por 3 horas. Depois de retiradas, as barras vão para água fria até atingirem a temperatura em torno de 23°C. E por fim são feitas as medições novamente, de forma a verificar a porcentagem de expansão.

2.3.3. Reatividade álcali-agregado

As reações álcali-agregado ocorrem entre agregados reativos e os álcalis do cimento, que são liberados durante as reações de hidratação do cimento, as reações álcali-agregado podem produzir um gel expansivo, causando fissuras nas estruturas de concreto, além de perda de resistência, elasticidade e durabilidade do concreto (CATOIA, 2007). O gel expansivo, é formado nos poros existentes nos agregados, ou na sua superfície, geralmente onde se encontra a sílica. Quando produzido na superfície dos agregados leva a perda de aderência entre a pasta e o agregado (NEVILLE, 1997).

Para a ocorrência dessas reações é necessário, não somente, agregados reativos, mas também, concentração elevada de álcalis na zona de transição agregado/pasta e umidade em torno de 80 a 85% (SANCHEZ, 2008).

Existem três tipos de reação álcali-agregado (RAA), a reação álcali-sílica, a reação álcali-silicato e a reação álcali-carbonato, devido a semelhança dos processos a reação álcali-silicato pode ser considerada um tipo específico da reação álcali-sílica. A reação álcali-carbonato não são muito comuns no Brasil, devido a isso essa reação não é tratada na norma brasileira, de modo que vamos focar na reação álcali-sílica.

Segundo Dent Glasser & Kataoka (1981 a,b), quimicamente, a reação álcali-sílica ocorre de duas formas, a primeira é a reação do tipo ácido-base, os íons hidroxilas (OH^-) atacam a superfície da sílica reativa do agregado (grupo silanol: Si-OH) carregada negativamente (Si-O^-). Em seguida ocorre atração dos cátions presentes no meio (Na^+ e K^+), equilibrando as cargas negativas e formando um gel sílico-alcalino. O grupo siloxano (Si-O-Si) também é atacado pelos íons hidroxilas levando a ruptura das ligações, de acordo com o nível de cristalinidade da sílica, a reação pode ser mais superficial (com boa cristalinidade) ou mais interna (pouco cristalina).

A reatividade álcali-agregado é medida através do método acelerado de barras, que consiste da produção de barras de argamassas, que após desmoldadas ficam por 24h no banho térmico, imersas em água 80°C , após esse período é feita a leitura inicial, que servirá como referencia. As barras retornam ao banho térmico, que agora contem uma solução de hidróxido de sódio, a 80°C , são feitas leituras aos 16 e 30 dias, de forma a verificar a expansão em relação a leitura inicial.

CAPÍTULO - 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Agregados miúdos

3.1.1.1. Resíduo da mineração

Utilizou-se para produção de areia um rejeito da mineração de quartzo, que visa a produção de ferro silício, silício metálico, cálcio silício, ferro silício manganês, dentre outras ligas. O rejeito é proveniente das operações de beneficiamento de minérios para a siderurgia, esses são gerados pelo processo de beneficiamento, e consistem nos materiais fora de faixa granulométrica e do grau de pureza adequado.

O rejeito é gerado pela mineradora MinaSilício - GMA Mineradora Ltda, localizada a, aproximadamente, 77Km de distância de Belo Horizonte, na Rodovia MG 238, km 4, em Jequitibá, região de Sete Lagoas, Minas Gerais, ilustrada na Figura 3.1.



Figura 3.1: Mineração de quartzo da MinaSilício

Fonte: MinaSilício GMA Mineradora Ltda

O material utilizado foi coletado da mina Topázio, Figura 3.2, de forma representativa segundo a NBR 10007, armazenado em bombonas de 240L, fechadas hermeticamente, com granulometria variando de 2,36mm a 12,5mm. A granulometria variada gerou a necessidade de separação do material antes de iniciar o processamento da areia. Dessa forma, o material

foi segregado nas frações retida e passante da peneira 4,8mm. Sendo que a fração passante foi utilizada primeiro e, posteriormente, a fração mais grossa.



Figura 3.2: Resíduo da mineração de quartzo

O material coletado apresenta-se como quartzo, com teores superiores a 99% de SiO₂, e menos que 0,5% de Fe, como pode ser visto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição química do rejeito

Sample ID	Al ₂ O ₃ (%)	BaO (%)	CaO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	CuO (%)	Fe (%)	HfO ₂ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	Mn (%)	Na ₂ O (%)	NiO (%)	P (%)	SiO ₂ (%)
TOPAZIO	0.14	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	0.417	<0.010	<0.010	<0.10	<0.008	<0.10	<0.010	<0.004	99.33
TOPAZIO	0.12	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	0.451	<0.010	<0.010	<0.10	<0.008	<0.10	<0.010	0.005	99.20

Fonte: MinaSilicio GMA Mineradora Ltda.

3.1.1.2. Areia Industrial de Gnaisse

Utilizou-se como areia industrial de gnaisse (AIG) material fornecido pela Martins Lanna, empresa que atua na extração, beneficiamento e comercialização de agregados derivados de Gnaisse/Granito para construção civil no mercado nacional, ilustrada na Figura 3.3, localizada na Estrada da Pedreira - Granja Ouro Branco, Contagem, Minas Gerais. Segundo a empresa o material fornecido é uma areia média lavada e possui 100% do material passante na peneira n.8 (2,4 mm).



Figura 3.3. Mineração de gnaiss/granito Martins Lanna

3.1.1.3. Areia natural de rio

Utilizou-se como areia natural de rio lavada (ANR), material adquirido na região metropolitana de Belo Horizonte, da empresa Interbrasil Ltda, localizada na Rodovia BR 040 - KM 19,5 - N° 995, Vale do Sol em Nova Lima, Minas Gerais.

3.1.2. Agregados graúdos

3.1.2.1. Brita₀ especial (VSI)

Utilizou-se como agregado graúdo para produção das matrizes cimentícias, brita zero especial (BZE), fornecida pela Martins Lanna. A BZE caracteriza-se por apresentar forma arredondada, em função do processo industrial de produção, apresenta-se como material com dimensões entre 12,5 mm e 8,5 mm. A BZE é obtida de processo de britagem diferenciado, em britador VSI (Impacto de Eixo Vertical), que proporciona formato mais cúbico, arredondado, e assim mais eficiente para produção de concreto. Embora houvesse indicação da graduação para esses agregados, o material foi segregado para correção de sua granulometria e redução do teor de finos.

3.1.3. Cimento

O cimento utilizado foi CPV-ARI (NBR 5733), sem adições, a fim de que pudesse ser observado o comportamento do rejeito utilizado como agregado miúdo nas matrizes de cimento Portland, com a menor interferência possível. Na Tabela 3.2 são ilustradas as exigências para o cimento CP V-ARI.

Tabela 3.2: Exigências físicas, mecânicas e químicas- cimento CP V-ARI

ENSAIOS FÍSICOS			ENSAIOS QUÍMICOS		
Blaine (cm ² /g)	≥3000	NBR NM 76	Perda ao fogo (%)	≤4,5	NBR 5743
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65	Resíduo insolúvel (%)	≤1,0	NBR 5744
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65	Trióxido de enxofre – SO ₃ (%)	≤3,5	NBR 5745
Finura na peneira # 200 (%)	≤6,0	NBR 11579	Óxido de cálcio livre – CaO Livre (%)	-	NBR 7227
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202	Óxido de magnésio – MgO (%)	≤6,5	NBR 9203
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582	Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43	Óxido de silício – SiO ₂ (%)	-	NBR 9203
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	≥14,0	NBR 7215	Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	-	NBR 9203
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥24,0	NBR 7215	Óxido de cálcio – CaO (%)	-	NBR 9203
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥34,0	NBR 7215	Equivalente alcalino (%)	-	-
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	-	NBR 7215	-	-	-

Fonte: ABCP, 2002

3.2. Métodos

3.2.1. Produção da areia ótima

Todo rejeito coletado foi segregado granulometricamente em duas frações; uma retida na peneira de 4,8mm e outra passante nesta mesma peneira.

Para o desenvolvimento experimental proposto, foram utilizadas, primeiramente, as massas passantes na peneira de 4,8mm. Esse material foi processado no britador de mandíbulas, marca Retsch - modelo BB200. Após a britagem, o processo de segregação granulométrica do material, no peneirador da Solotest, repetiu-se até que fosse obtida uma areia que se

enquadrasse na zona ótima, faixas estabelecidas pela NBR 7211/09. Para obtenção da areia ótima, o rejeito de mineração de ferro silício foi proporcionado conforme os limites:

- ❖ 13%- material passante na 4,8mm e retido na 2,4mm;
- ❖ 16%- material passante na 2,4mm e retido na 1,2mm;
- ❖ 22%- material passante na 1,2 mm e retido na 600 μ m;
- ❖ 26%- material passante na 600 μ m e retido na 300 μ m;
- ❖ 20%- material passante na 300 μ m e retido na 150 μ m.

Nota-se a falta de 3% na composição da areia, isso se dá porque não é incluído o material fino, retido no fundo do jogo de peneiras e também agregado aos grãos.

A frações retidas nas peneiras 4,8mm e 2,4mm foram reprocessadas alterando-se a configuração das mandíbulas segundo aberturas 6mm; 5,5mm; 4,5mm; 4mm; 3,5mm; 3mm; 2,5mm; 2mm; 1mm; até que todo o material se estivesse enquadrado nas granulometrias: 2,4mm, 1,2mm, 0,60mm, 0,30mm e 0,15mm.

3.2.2. Caracterização física dos agregados

Para a caracterização das amostras foram conduzidas as seguintes análises para agregados miúdos e graúdos: granulometria - NBR 7217/87, teor de umidade - NBR 9939/12, determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem - NBR NM 46/03; massa específica - NBR NM 52/09; massa unitária - NBR MN 45/09, absorção de água - NBR NM 30/01, inchamento - NBR 6467/0 e impurezas orgânicas - NBR NM 49/01.

3.2.3. Caracterização química, mineralógica e morfológica.

3.2.3.1. Fluorescência de raios X

A preparação das amostras dos materiais submetidos à fluorescência de raios X (FRX) foi conduzida a partir da cominuição das amostras em jarros de aço inox no moinho de esferas de alta eficiência, modelo PM100 - RESTCH, com tempo de processamento de 5min, com rotação de 300rpm.

Para determinação da composição química das amostras da areia natural (ANR), da areia industrial de gnaiss (AIG) e da areia proveniente do rejeito da mineração de quartzo (AOR), utilizou-se método de determinação por fluorescência de raios X em câmara à vácuo e com

tempo de análise de 100s.

O equipamento utilizado foi o modelo Rainy EDX 720, Shimadzu. As análises foram realizadas no NanoLAB - Laboratório do Departamento de Metalurgia, Escola de Minas/UFOP

3.2.3.2. Difração de raios X

A preparação das amostras dos materiais submetidos à difração de raios X (DRX) foi conduzida a partir da cominuição das amostras em jarros de aço inox no moinho de esferas de alta eficiência, modelo PM100 - RESTCH, com tempo de processamento de 5min, com rotação de 300rpm.

Para determinação da composição mineralógica das amostras da areia natural (ANR), da areia industrial de gnaiss (AIG) e da areia proveniente do rejeito da mineração de quartzo (AOR), utilizou-se método de determinação por difração de raios X, com radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 45KV, corrente 40mA, com passo angular de 0,02 e tempo por passo de 20 segundos com ângulo 2θ percorrido entre 4-80°.

O equipamento utilizado foi o modelo Empyrean, fabricante Panalytical. As análises foram realizadas no Laboratório de Difração de raios X - Departamento de Geologia, Escola de Minas/UFOP.

3.2.3.3. Microscopia eletrônica de varredura e Estereoscopia

A preparação das amostras submetidas à microscopia eletrônica de varredura e microscopia ótica (estereoscopia) foi conduzida a partir do polimento de fragmentos retirados de corpos de prova de concreto endurecido, com idade de 28 dias. As amostras foram polidas em politriz metalográfica, modelo PLF, marca Fortel, com sequência de lixas (de alumina) 180-220-360 mesh, a fim de que todas as ranhuras superficiais fossem eliminadas, considerando que o polimento com alumina é feito através do arrancamento dos materiais menos duros, formando certas ondulações na superfície. As amostras utilizadas para obtenção das imagens via MEV, tiveram sua superfície metalizada. As amostras utilizadas na estereoscopia foram apenas polidas.

Para determinação da morfologia e microestrutura das matrizes produzidas a partir da areia natural (ANR), areia industrial de gnaiss (AIG) e da areia proveniente do rejeito da

mineração de quartzo (AOR) utilizou-se a estereoscopia (EC) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A determinação da morfologia da matriz por estereoscopia se processou por leitura direta no estereoscópio, Coleman- modelo XTB-3AT, com aumentos de 10x a 45x. Para a determinação da morfologia das matrizes via microscopia eletrônica de varredura, a leitura se deu em câmara hermética com atmosfera controlada no microscópio eletrônico modelo Vega 3, marca Tescan. As análises em MEV foram realizadas no NanoLAB - Laboratório do Departamento de Metalurgia, Escola de Minas/UFOP

3.2.4. Dosagem dos concretos

Os concretos foram dosados segundo método de dosagem IPT/ EPUSP através do Software Especialista para Dosagem de Misturas Cimentícias (SOARES, 2009). Foram projetados traços, em massa, com classes de resistência, C20, C30 e C40 com o intuito de avaliar o desempenho dos modelos AOR, comparativamente aos modelos ANR e AIG, utilizados convencionalmente. Os traços podem ser observados na Tabela 3.3.

O método IPT/EPUSP foi escolhido por considerar variações possíveis para o teor de argamassa no concreto, e também, por desconsiderar as características físicas dos agregados miúdos. Para os concretos produzidos adotou-se teor de argamassa de 56%. A dosagem dos traços utilizados nesse experimento foi projetada considerando que as matrizes ANR, AIG e AOR apresentassem as mesmas características no estado fresco, com SLUMP da ordem de 70(\pm 10)mm.

Tabela 3.3: Traços C20, C30 e C40.

Material	Traço	a/c (teórico)	a/c (corrigido)	Slump
C20	1: 1,8: 2,2	0,48	0,570	70 \pm 10mm
C30	1: 1,24: 1,76	0,37	0,457	70 \pm 10mm
C40	1: 0,68: 1,32	0,29	0,384	70 \pm 10mm

Os concretos foram misturados na betoneira portátil, da marca CSM- modelo L130 D. Adicionou-se primeiro a brita e 1/3 da água dada no traço e misturou-se por 30 segundos. Depois, adicionou-se o cimento e mais 1/3 da água, misturando por mais 30 segundos. Finalmente, adicionou-se a areia e o 1/3 restante da água e misturou por mais 30 segundos. Após esse processo, foi feito o ensaio de abatimento de tronco, de forma a avaliar a

necessidade de adicionar mais água. E, quando necessário, foi adicionado mais água até se obter o slump desejado. Os corpos de prova foram moldados e vibrados na mesa vibratória, da marca Contenco- modelo I 3042, por 20 segundos, de forma a expulsar as bolhas de ar. O procedimento de moldagem e cura para todos os tratamentos foi conduzido segundo NBR 5738/03. Logo após a moldagem, os CPs foram acondicionados em câmara úmida, marca Equilam modelo SS600UM, com umidade e temperatura controladas. Após 24h foram desmoldados e mantidos na câmara úmida com temperatura de 25°C e UR = 98% até a idade da realização dos ensaios.

3.2.5. Propriedades do concreto no estado fresco

As matrizes produzidas com ANR, AIG e AOR foram caracterizadas segundo suas propriedades no estado fresco conforme sua consistência pelo abatimento do tronco de cone – SLUMP test (NBR NM 67/98), massa específica (NBR 9833/09) e teor de ar incorporado (NBR NM 47).

3.2.6. Propriedades do concreto no estado endurecido

As matrizes produzidas com ANR, AIG e AOR foram caracterizadas segundo suas propriedades no estado endurecido, conforme sua absorção de água (NBR 9778/05), índice de vazios (NBR 9778/05) e massa específica (NBR 9778/05).

O planejamento experimental para caracterização dos concretos ANR, AIG e AOR, no estado endurecido, segundo suas propriedades elasto-mecânicas, foi proposto considerando nove tipos de concretos, três para cada areia (ANR, a AIG e AOR). Para cada tipo de areia, foram produzidos concretos com três classes de resistência diferentes (C20, C30 e C40), como pode ser visto no esquema da Figura 3.4.

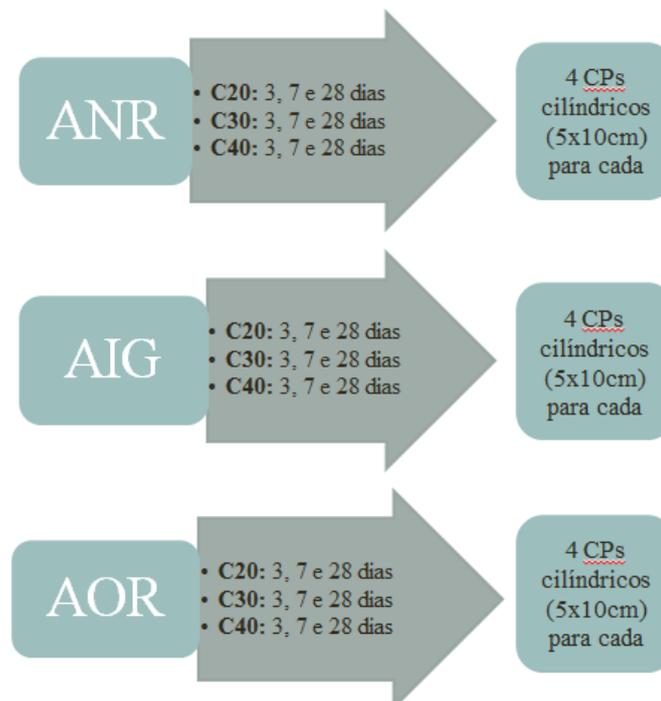


Figura 3.4: Esquematização dos ensaios elasto-mecânicos

A escolha do CP cilíndrico 5x10cm ocorreu devido à quantidade de material disponível. De acordo com a NBR 5738/03, a dimensão básica do CP deve ser no mínimo quatro vezes maior que a dimensão máxima do agregado graúdo, que, como será visto mais a frente, apresenta dimensão máxima de 9,5mm.

3.2.6.1. Resistência à compressão simples

Inicialmente, garantiu-se que as superfícies dos corpos de prova estivessem regularizadas, através do capeamento dos CPs com enxofre, a fim de que fossem eliminadas quaisquer excentricidades. Utilizou-se dispositivo RILEM para aplicação das cargas, ilustrado na Figura 3.5 (NBR 5739/07). Para a determinação da resistência à compressão simples, foi utilizada prensa servo-controlada, modelo DL 20000-EMIC com célula de carga de capacidade 200 KN, com velocidade de aplicação de carga de 0,45(\pm 0,15) MPa/s. A resistência à compressão foi determinada através da equação 3.1 e, posteriormente, obteve-se a média das repetições.



Figura 3.5: Dispositivo de compressão para CPs 5x10cm

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Onde :

R_c = resistência à compressão em MPa;

P = carga de ruptura em kN;

A = área transversal do corpo de prova em m^2 .

3.2.6.2. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi determinada segundo prescrições da NBR 7222/11. O carregamento foi aplicado continuamente, com acréscimo de tensão de 0,05 MPa/s. Para a determinação da resistência à tração na flexão, foi utilizada prensa servo-controlada, modelo DL 20000-EMIC com célula de carga de capacidade 200 KN.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada através da equação 3.2, mostrada abaixo:

$$f_{cd} = \frac{2 * F}{\pi * d * L} \quad (3.2)$$

f_{cd} = resistência a tração por compressão diametral (MPa)

F = carga máxima obtida no ensaio (kN)

d = diâmetro do corpo-de-prova (m)

L = comprimento do corpo-de-prova (m)

3.2.6.1. Módulo de elasticidade estático

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático foi conduzido segundo NBR 8522/08. Foi utilizada prensa servo-controlada, modelo DL 20000-EMIC, com célula de carga de capacidade 200 KN, e CPs com idade de 28 dias de cura.

O equipamento de ultrassom utilizado foi o modelo TICO, fabricado pela Proceq, conforme ilustrado na Figura 3.6, apresentada a seguir. Foram produzidos 4 CPs para cada classe de resistência (C10, C20, C40) e para cada tipo de agregado miúdo ANR, AIG e AOR, para idade de 28 dias de cura.

O carregamento foi aplicado de forma regular a uma taxa de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, até que se atingisse 30% da resistência à compressão em ciclos de 60 segundos. As deformações relativas aos ciclos de carga e descarga foram medidas com extensômetro acoplado ao corpo de prova, conforme ilustrado pela figura 3.6 apresentada a seguir.



Figura 3.6. Determinação do módulo de elasticidade estático

Os resultados para o módulo de elasticidade estático foram determinados pela equação 3.3, apresentada a seguir.

$$MEe = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} * 10^{-3} = \frac{(\sigma_b - \sigma_a)}{(\epsilon_b - \epsilon_a)} * 10^{-3} \quad (3.3)$$

Onde:

MEe=módulo de elasticidade tangencial inicial

σ_b =tensão maior ($\sigma_b=0,3f_c$)

σ_a = tensão menor ($\sigma_a=0,5\text{MPa}$)

ϵ_b =deformação específica média sob a tensão maior

ϵ_a =deformação específica média sob a tensão básica

3.2.6.2.Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi conduzido segundo ASTM C 597/09. O equipamento de ultrassom utilizado foi o modelo TICO, fabricado pela Proceq, conforme ilustrado na Figura 3.7, apresentada a seguir. Foram produzidos 4 CPs para cada classe de resistência (C10, C20, C40) e para cada tipo de agregado miúdo ANR, AIG e AOR, para idade de 28 dias de cura.



Figura 3.7: Equipamentos para a realização do ensaio de MEd

O módulo de elasticidade é obtido como função da propagação da onda ultrassônica, conforme equação 3.4, mostrada a seguir. Adicionalmente, ainda pode-se avaliar a compacidade e homogeneidade dos CPs, através da NBR 8802/13.

$$v = \sqrt{\frac{MEd(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (3.4)$$

v-velocidade da onda

MEd-módulo de elasticidade dinâmico

μ -coeficiente de Poisson

ρ -densidade do material

3.2.6.3. Ensaio de Durabilidade

3.2.6.4. Ensaio de expansão na Autoclave do Cimento Portland (modificado)

Este ensaio propõe a verificação da expansão do cimento, porém, no presente trabalho, procurou-se avaliar não a expansão do cimento, que foi a mesma em todas as argamassas, mas sim, o comportamento dos diferentes agregados quando submetidos a alta temperatura e pressão. Para a determinação da expansão das barras de argamassa em autoclave, seguiu-se as prescrições da ASTM C-151. A confecção do traço utilizado nas argamassas foi definido na NBR 15577/08. Foram produzidas três argamassas com cada agregado, o ANR, o AIG e AOR. Após cura por 24h na câmara úmida, as barras foram desmoldadas e, em seguida, determinadas leituras iniciais no relógio comparador digital, marca Pantec, com precisão de leitura de 0,0001mm. Após a leitura, os corpos de prova foram acomodados na autoclave, marca Matest, com termômetro digital e capacidade para acomodar 12 corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 3.8. A temperatura inicial para a determinação do parâmetro de expansibilidade em autoclave foi de 28°C, alcançando ao final do ciclo, 216°C em um período de 75min. A variação de temperatura se deu sob pressão de 2000,0 KPa.

As barras foram mantidas à temperatura de 216°C, em autoclave, à pressão de 2000,0 KPa, por um período de 3 horas. Decorrido esse período, a pressão e a temperatura na câmara foram reduzidas gradativamente, até o equilíbrio com ambiente para a retirada das barras. As barras retiradas da autoclave devem ser acondicionadas em recipiente com água fria, até que a temperatura atinja 23°C e, em seguida, devem ter seu comprimento determinado novamente pelo relógio comparador digital.



Figura 3.8: Autoclave e as barras no suporte

A expansão é determinada pela equação 3.5, apresentada a seguir. O resultado foi determinado pela média dos valores de expansão de três barras, expresso em percentual para variações de comprimento relativamente ao efetivo comprimento da barra padrão, que é ilustrada na Figura 3.9.

$$E = \frac{(L_i - L_f)}{L_i} \quad (3.5)$$

Onde:

E= expansão de cada barra (mm)

L_i = comprimento inicial da barra (mm)

L_f =comprimento final da barra (mm)



Figura 3.9: Barra padrão no relógio comparador digital

3.2.6.5. Reatividade álcali-agregado

O potencial reativo dos agregados miúdos foi determinado de acordo com NBR 15577/08, avaliando-se a variação do comprimento das barras de argamassa produzidas com cimento CPV-ARI, água destilada, fator $a/c=0,47$, imersas em solução de hidróxido de sódio, em solução aquecida a 80°C . Foram produzidos CPs ANR, AIG e AOR, para análise comparativa da ocorrência de reatividade álcali-agregado.

Aos corpos de prova prismáticos, de seção quadrada, com 2,5 cm de lado e 28,0 cm de comprimento, foram solidarizados pinos de aço inox, em cada extremidade, para determinação da variação de comprimento das barras pelo relógio comparador digital, marca Pantec, com precisão de leitura de 0,0001mm.

Os corpos de prova foram desmoldados com 24h e mantidos em câmara úmida. Após a desforma, realizou-se leitura inicial com relógio comparador. Após a leitura inicial, as barras foram acondicionadas no banho térmico, apenas com água a 80°C , por um período de 24h. Após esse período, foi realizada leitura zero. Após essa leitura, os CPs foram imersos em uma solução de hidróxido de sódio com 4% de concentração e temperatura de 80°C , conforme ilustrado na Figura 3.10, apresentada a seguir. Foram conduzidas leituras para determinação da variação de comprimento das barras com 16 dias e 30 dias e três leituras intermediárias.



Figura 3.10: Banho térmico

A expansão para cada CP foi determinada em cada idade. A variação de comprimento das barras foi calculada segundo a diferença entre seu comprimento na idade analisada e seu comprimento inicial (leitura zero). Os resultados para expansão foram expressos em porcentagem relativamente ao comprimento efetivo, sendo esse resultado expresso como a média dos valores obtidos para 3 CPs, em cada idade relacionada.

CAPÍTULO - 4

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos, além das análises dos mesmos. Os resultados elasto-mecânicos apresentados foram explorados com o auxílio da análise de variância (ANOVA- fator único), através do software Microsoft Excel 2010. Por meio da ANOVA, foram analisadas variáveis de forma comparativa entre os agregados em estudo, verificando se possuíam ou não efeitos significativos sobre os resultados, com intervalo de confiança de 95%, desconsiderando os valores espúrios.

4.1. Produção da areia

Na Figura 4.1 são ilustradas a areia ótima reciclada, bem como as frações que a compõem. Durante o processo de produção da areia reciclada, pôde-se notar uma quantidade significativa de material fino, abaixo da peneira 150 μ m, que surgiu durante a repetição do processo de britagem e separação das frações, ou seja, quanto maior o número de vezes que o material era processado, maior a quantidade de finos. A cada 1000g de material, processado pelo menos 5 vezes, ficava retido no fundo, do conjunto de peneiras, 242,3g, ou seja, cerca de 24% do material processado não foi utilizado na composição da areia ótima. Pode-se atribuir a presença desses finos a certa friabilidade do material, que se desagrega quando submetido repetidas vezes ao processo de britagem.

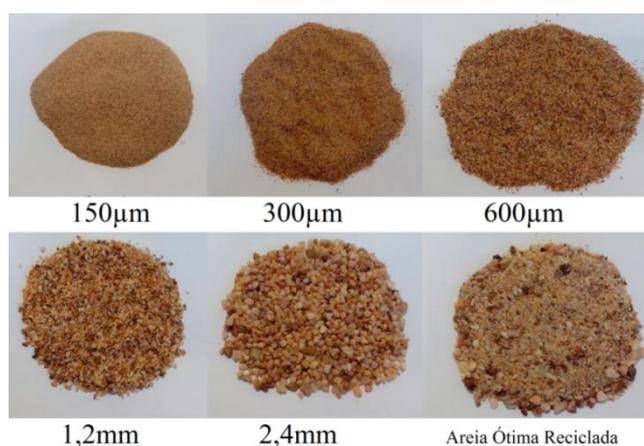


Figura 4.1: Frações da areia ótima reciclada

Outro detalhe importante notado durante a fabricação da areia foi a alteração da coloração do material. Conforme era processado, esse se tornava mais claro, variando de marrom-avermelhado ao branco, como pode ser visto na Figura 4.2, onde pode-se observar a variação

de coloração na fração retida na peneira com abertura de 600 μ m. Observa se que há três colorações, a mais marrom, a mais clara e a intermediária, que é a mistura das duas anteriores. O material quase branco, muito provavelmente é o quartzo, que ao passar diversas vezes no britador se desagrega dos outros minerais, que estão presentes no material bruto. Já o material mais marrom seria o quartzo incrustado com outros minerais, que contenham principalmente ferro, conforme análise posterior de fluorescência de raios X. O material mais escuro é também o material que apresenta menos finos, pois foi processado poucas vezes, já o material mais claro quando passado na peneira apresenta mais finos.



Figura 4.2: Fração retida na peneira 600 μ m

De acordo com Dutra (2013), a análise elementar feita através da fluorescência de raios X, ilustrada na Figura 4.3, desse mesmo rejeito, confirma que os finos são muito possivelmente minerais contendo ferro.

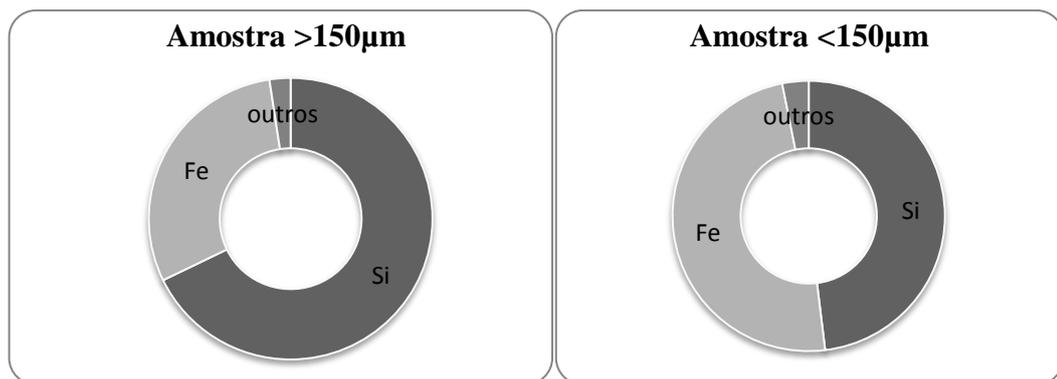


Figura 4.3: FRX das frações > 150 μ m e < 150 μ m

Considerando as frações de diâmetro abaixo de 150 μ m e retida nesta mesma peneira, pode-se supor que realmente ocorre a desagregação superficial de partículas de minerais contendo ferro que estão agregados ao quartzo. Há maior quantidade de ferro na fração passante na peneira de 150 μ m, ou seja, nos finos, material mais marrom e, possivelmente, formado por compostos de ferro.

4.2. Caracterização das areias

4.2.1. Distribuição granulométrica

A partir das amostras ensaiadas dos agregados miúdos, obtiveram-se as curvas granulométricas, ilustradas na Figura 4.4, onde pode-se observar que os três agregados miúdos encontram-se muito próximos da faixa ótima e totalmente dentro da faixa utilizável. Deve-se levar em conta que a faixa ótima nada mais é que a busca por uma proporção em relação ao tamanho das partículas que promova maior empacotamento das partículas, de forma que as partículas menores preencham os vazios entre partículas maiores (CATOIA, 2007).

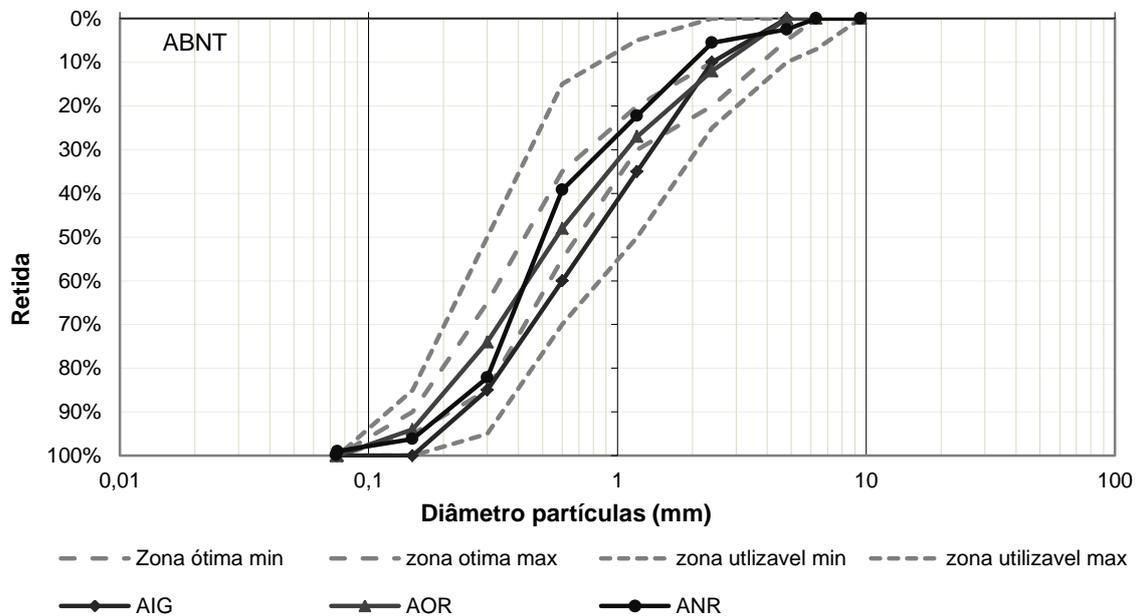


Figura 4.4: Granulometria agregados miúdos

De acordo com o proposto neste trabalho, a areia produzida com o resíduo da mineração encontra-se centralizada na zona ótima, que é definida na NBR 7211/09. A ANR está em torno de 90% dentro da zona ótima, tendo apenas sua fração 1,2mm fora. E a AIG, apesar de não se encontrar totalmente dentro da zona ótima, está tão próxima que, quando calculado seu módulo de finura, verifica-se que ela se classifica como pertencente à zona ótima.

Através da granulometria podemos calcular a dimensão máxima característica (DMC) e também o módulo de finura (MF) de cada uma das areias, como pode ser visto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dimensão máxima característica e módulo de finura

	ANR	AIG	AOR	Limites MF		
DMC	4,8mm	4,8mm	4,8mm	ZU inferior.	Zona Ótima	ZU superior.
MF	2,47	2,90	2,55	1,55 a 2,20	2,20 a 2,90	2,90 a 3,50

A dimensão máxima característica foi de 4,8mm para todas, lembrando que a DMC se refere a maior abertura em que 5% ou menos do material fica retido. Ou seja, podemos dizer que, em todas as areias, a fração retida na peneira 4,8mm é nula ou apresenta muito pouco material, garantindo assim que sejam classificadas como agregados miúdos. Em relação ao MF, que é a soma das porcentagens das frações retidas acumuladas nas peneiras da série normal divididas por 100, de acordo com os limites dados para cada zona, podemos concluir que todas as areias podem ser consideradas na zona ótima. E, de forma geral, analisando comparativamente os agregados miúdos estudados, podemos dizer que são granulometricamente iguais, ou seja, em relação à granulometria, espera-se um desempenho equivalente e apropriado ao uso na construção civil.

4.2.2. Teor de material fino passante na peneira 0,075mm

O teor de material pulverulento dos agregados pode ser visto na Figura 4.5.

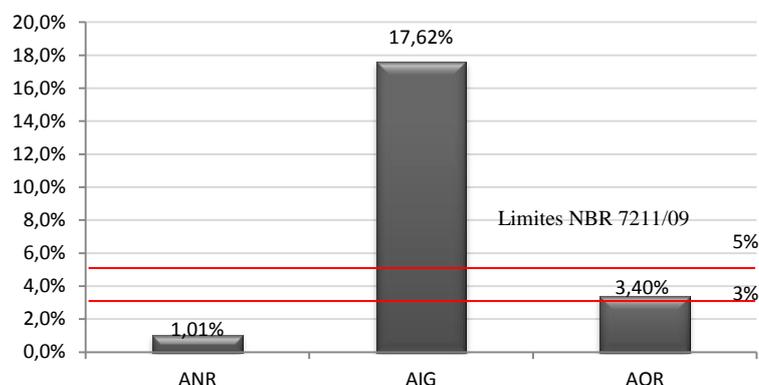


Figura 4.5: Teor de material pulverulento

Segundo a NBR 7211/09, para a produção de concreto de cimento Portland, são admitidos limites que variam de 3% a 5% de material pulverulento. A AOR, apesar de ter apresentado 3,4% de teor de finos, pode ser utilizada em todos os tipos de concretos de cimento Portland, exceto os concretos que necessitem de resistência a abrasão superficial, pois o limite para esse tipo de concreto é de 3%. Levando em consideração que o valor obtido para a AOR está muito próximo do limite normativo e que ela não passou por processo de lavagem, se

houvesse a necessidade de ser utilizada nesse tipo específico de concreto, bastaria a sua lavagem para estar apta ao uso. A NBR 7211/09 coloca, também, que os limites podem ser aumentados de 3 para 10% e de 5 para 12% para grãos gerados durante a britagem da rocha, como no caso da AOR e da AIG, porém deve ser comprovado que os finos não interferem nas propriedades do concreto, através da apreciação petrográfica (NBR 7389). Em relação à ANR, que apresentou apenas 1,01%, de acordo com a norma, ela pode ser utilizada em qualquer tipo de concreto. Já a AIG apresentou elevado teor de finos, que pode ser justificado pelo processo de fabricação do agregado, por britagem, onde já se espera maior quantidade de finos, entretanto, ela não se enquadra nos limites normativos. Se o processo de lavagem desse material for mais eficiente associado a uma possível alteração no processo de moagem dessa areia, de forma a diminuir a quantidade de finos, é muito provável que ela possa se adequar a norma.

4.2.3. Massa Específica

No ensaio de massa específica, os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.6, e pode-se observar que os agregados miúdos mostraram-se com valores muito semelhantes entre si.

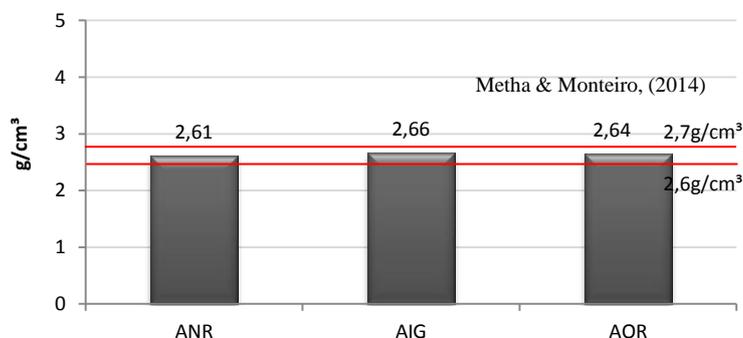


Figura 4.6: Massa específica

Com diferenças pouco significativas a AOR apresenta valor intermediário entre a ANR e a AIG, sendo que a ANR apresenta-se um pouco menos densa que as demais e a AIG a com a maior densidade. As massas específicas encontrada para as areias estão de acordo com os valores obtidos para rochas que são normalmente utilizadas na construção civil, que apresentam a massa específica variando entre 2,6 a 2,7 g/cm³ (Mehta & Monteiro, 2014). Lembrando que a massa específica dos agregados exerce influência nas propriedades do concreto fresco, como coesão e massa específica.

4.2.4. Massa Unitária

Os resultados da massa unitária, mostrados na Figura 4.7, também não apresentam diferença significativa entre os agregados miúdos.

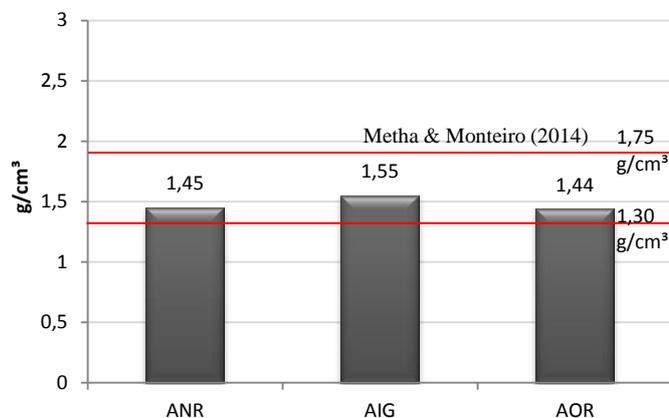


Figura 4.7: Massa unitária

Segundo Metha & Monteiro (2014), nos agregados comumente utilizados na construção civil o valor da massa unitária varia de 1,30 a 1,75 g/cm³, ou seja, todos os agregados avaliados se enquadram dentro dos valores mais comumente encontrados. De acordo com os resultados, AOR apresenta-se muito semelhante a ANR, de forma que podemos considerá-las com valores de massa unitária sem diferença significativa. A AIG, apresenta um valor um pouco maior (1,55g/cm³) concordando com o resultado anterior da massa específica, que também se mostrou relativamente maior que as demais amostras.

4.2.5. Absorção de água

A capacidade de absorção de um agregado pode ser utilizada para medir o grau aproximado de sua porosidade e resistência (METHA & MONTEIRO, 2014). Os dados de absorção de água são de grande importância para a correção da quantidade de água definida no traço, quando os materiais estão sujeitos a variações de umidade. As rochas consideradas de boa qualidade costumam apresentar valores de absorção de até 1%, já as rochas mais porosas ou modificadas pelo intemperismo geralmente apresentam valores acima de 3% (ISAIAS, 2011). Como ilustrado na Figura 4.8, todas as areias obtiveram resultados abaixo de 1%, sendo classificadas como advindas de rochas de boa qualidade.

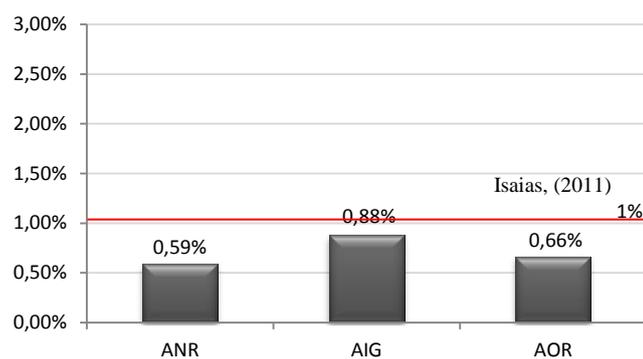


Figura 4.8: Absorção de água

A amostra AOR apresentou valor intermediário (0,66%) entre a ANR e a AIG, porém, mais próximo do valor apresentado pela ANR (0,59%). Segundo Metha e Monteiro (2014), a absorção de água é um aumento da massa decorrente do preenchimento dos poros permeáveis do agregado. Verifica-se que a amostra AIG apresentou valor mais alto, 0,88%, e que isso está relacionado à sua superfície específica maior, ou seja, à quantidade de material pulverulento, que por sua vez retém mais água entre os grãos, justificando, também, a amostra AOR obter valor maior que a ANR, já que areia advinda do rejeito apresenta maior quantidade de finos.

4.2.6. Teor de umidade total

O teor de umidade para os agregados miúdos tem grande relevância, pois a umidade pode interferir, de modo a modificar o traço do concreto, através do fenômeno de inchamento, que será abordado no próximo item. Ou seja, é importante fazer determinações periódicas nos agregados miúdos durante a execução de uma obra. Na Figura 4.9, podemos observar que os valores de teor de umidade que as amostras apresentaram após 24 horas expostas à umidade do ambiente, variaram de 67 a 76%.

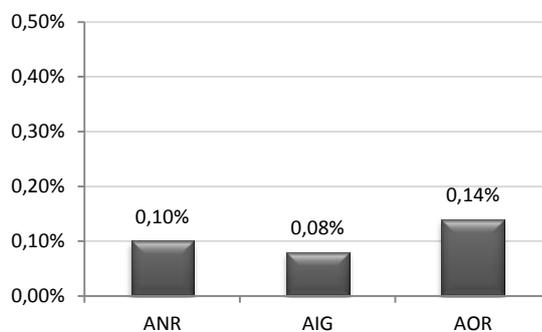


Figura 4.9: Teor de umidade

A AOR obteve um teor de umidade muito próximo ao valor da ANR. Isso se deve, também, ao fato de ambas apresentarem capacidade de absorção de água muito semelhante. Já a AIG,

obteve um valor de umidade total de 0,08%, que pode ser atribuído ao procedimento do ensaio, que diferente do ensaio de absorção de água, em que a amostra é imersa em água e seca a temperatura ambiente, a amostra deve absorver a umidade do ambiente, o que não ocorre expressivamente na amostra AIG.

4.2.7. Teor de Inchamento

O inchamento é um fenômeno próprio dos agregados miúdos, onde ocorre a variação do volume aparente do agregado devido à absorção de água, e se relaciona diretamente com a superfície específica dos grãos, quanto maior a superfície, maior pode ser o inchamento, além de interferir no valor da massa unitária. A curva de inchamento é expressa em função do volume e da umidade e o coeficiente de inchamento é dado pela relação do volume final úmido e o volume inicial seco. A umidade crítica é quando o coeficiente de inchamento torna se constante (MARTINS, 2008, apud HELENE & TERZIAN, 1992).

Os valores do coeficiente de inchamento estão ilustrados na Tabela 4.2, onde nota-se que a amostra AIG, por conter mais finos, absorve mais a água que é adicionada durante o ensaio, logo seu coeficiente de inchamento é maior que das outras duas amostras.

Tabela 4.2: Teor de Inchamento

	ANR	AIG	AOR
Coef. de Inchamento	1,35	1,53	1,27
Umidade crítica	4,82	5,48	6,53

Já a amostra AOR apresentou o valor mais baixo, confirmando sua capacidade de absorção mais baixa em relação a AIG, apesar de sua umidade crítica ter sido a maior em relação à AIG e ANR, o que sugere que a amostra AOR apresenta superfície mais lisa que, de certa forma, é menos drenante que as demais amostras, conforme poderá ser visto na Figura 4.15, no ensaio de MEV.

4.2.8. Impurezas orgânicas

De acordo com Neville (1982), as impurezas orgânicas encontradas nos agregados miúdos são prejudiciais, pois podem interferir nas reações químicas de hidratação do cimento, levando à perda de resistência. A análise que determina a presença de impurezas orgânicas no agregado é feita a partir da comparação colorimétrica das soluções, que estão ilustradas na Figura 4.10.

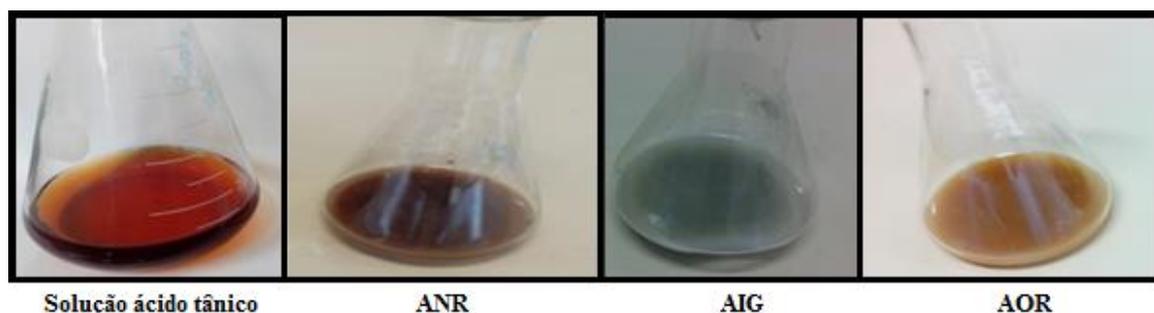


Figura 4.10: Impurezas orgânicas

As soluções que continham as amostras AOR e AIG podem ser consideradas com o teor de material orgânico dentro do limite estabelecido pela norma, pois exibem coloração mais clara que a solução padrão de ácido tânico. Já a ANR não é possível afirmar que está dentro do limite, pois as duas soluções obtiveram coloração parecidas. Seria necessário outras análises para comprovar se a ANR está dentro dos padrões normativos.

4.3. Caracterização química, mineralógica e morfológica das areias

4.3.1. Fluorescência de raios X

As análises dos resultados de fluorescência, ilustradas na Tabela 4.3, são qualitativas, mas, a partir dos resultados, podemos ter uma noção sobre os principais óxidos que constituem as amostras.

Tabela 4.3: Fluorescência de raios X das areias

	FRX-ANR	FRX- AIG	FRX - AOR
SiO ₂	85,6%	67,9%	85,2%
Fe ₂ O ₃	6,0%	1,9%	9,8%
K ₂ O	4,2%	3,6%	-
SO ₃	2,2%	0,9%	2,3%
TiO ₂	1,6%	0,3%	-
CaO	0,3%	1,9%	-
Al ₂ O ₃	-	23,3%	2,1%
Cr ₂ O ₃	-	-	0,4%
Cs ₂ O	-	-	0,2%
outros	0,1%	0,2%	0,1%

Verifica-se que as amostras ANR e AOR são compostas basicamente por sílica (SiO₂) e um pouco de óxido de ferro (Fe₂O₃) e apresentam apenas traços de outros óxidos. Em relação à amostra AIG, é predominantemente composta de sílica, porém em porcentagem mais baixas

que nas outras (67,9%). Sua porcentagem de óxido de ferro, também, é bem menor, de apenas 1,9%, porém apresenta significativa porcentagem de alumina (Al_2O_3), com 23,7%. Em relação aos álcalis, observa-se que a ANR e AIG apresentam, respectivamente, 4,16 e 3,6% de óxido de potássio (K_2O), já a AOR não apresentou álcalis em valores significativos. De forma geral, podemos verificar que existe considerável semelhança na composição química da amostra AOR com a ANR.

4.3.2. Difração de raios X

Por meio da difração de raios X, juntamente com o método de refinamento Rietveld, foi possível obter uma análise semi quantitativa da composição mineralógica das areias em estudo. Nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, podemos observar os difratogramas das amostras ANR, AIG e AOR, respectivamente.

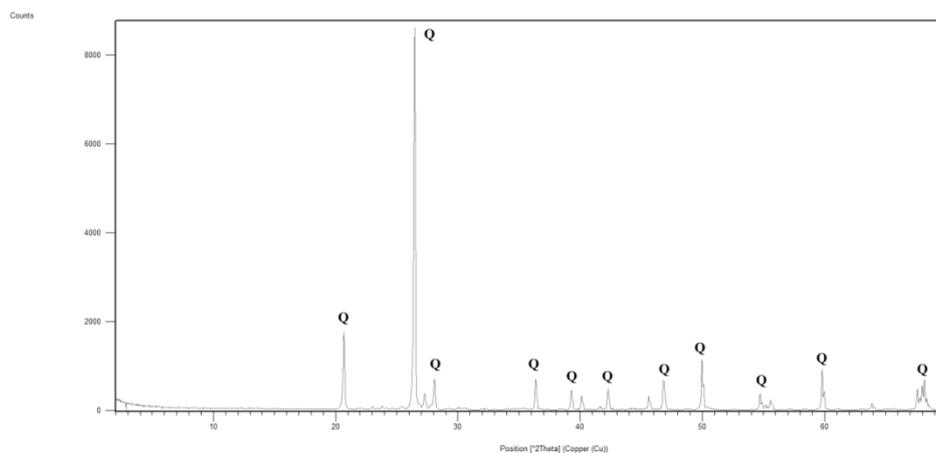


Figura 4.11: Difratograma – ANR. Q: quartzo

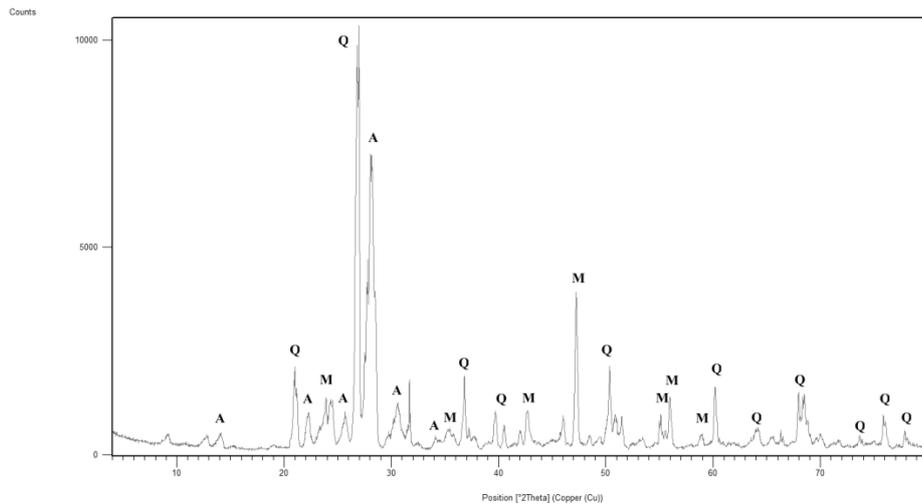


Figura 4.12: Difratoograma – AIG. Q: quartzo; M: microclínio; A: albita

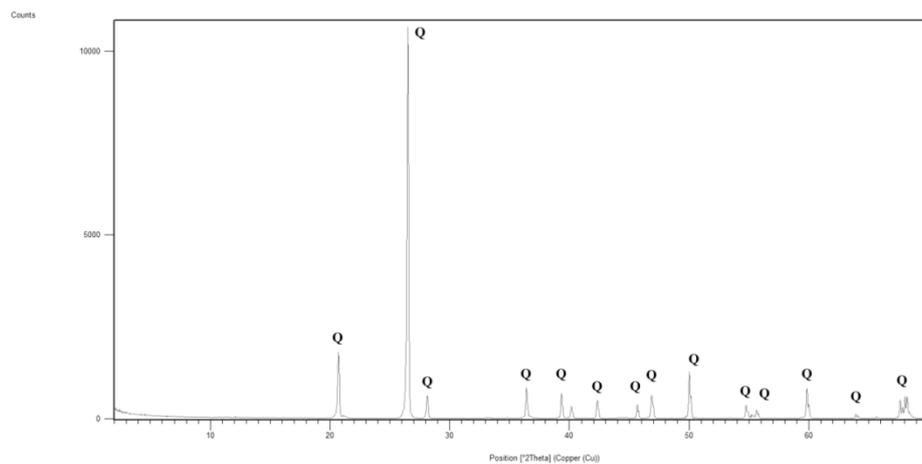


Figura 4.13: Difratoograma – AOR. Q: quartzo

Na Tabela 4.4, temos os resultados semi quantitativos das análises de DRX.

Tabela 4.4: Composição mineralógica- DRX

Minerais	Composição	ANR	AIG	AOR
Quartzo	SiO ₂	100%	20,40%	100%
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	-	57,70%	-
Microclínio	KAlSi ₃ O ₈	-	21,90%	-

Observa-se que a ANR e a AOR apresentam apenas quartzo em sua composição. Já a AIG, apresenta 57,7% de albita, que é um mineral da família dos feldspatos Plagioclásio, 21,9% de microclínio, que é a variedade de feldspato alcalino mais comum, e 20,4% de quartzo. Essa composição está de acordo com a composição mineralógica do gnaiss.

4.3.3. Microscopia eletrônica de varredura

Através da microscopia é possível verificar a morfologia dos grãos com diversos aumentos. As imagens a seguir foram feitas com o intuito de ver nitidamente a superfície dos grãos, por isso utilizou-se imagens produzidas através de elétrons secundários (SE), como pode ser visto na Figura 4.14, com o aumento de 250 vezes.

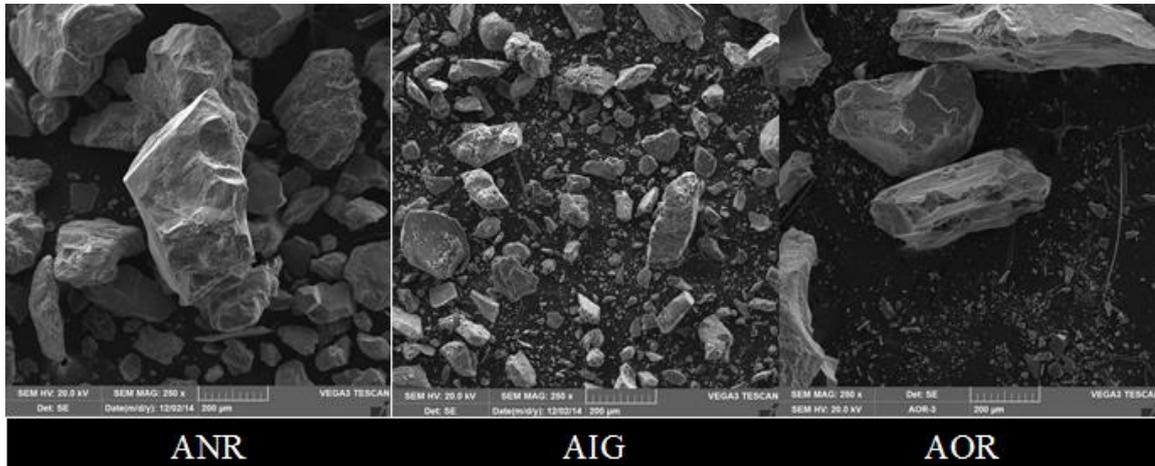


Figura 4.14: MEV- 250x

Na amostra ANR nota-se um formato mais cúbico e angular, já na amostra AIG verifica-se que os grãos são mais lamelares e a AOR apresenta grãos volumétricos menos cúbicos que os da ANR, porém menos lamelares que os da AIG. O formato mais pontiagudo da AOR e AIG ocorre devido ao processo de britagem, pois no britador de mandíbulas o material é cominuído a partir do impacto de uma partícula com a outra, contribuindo para esse formato.

A Figura 4.15 apresenta as partículas com o aumento de 1000x.

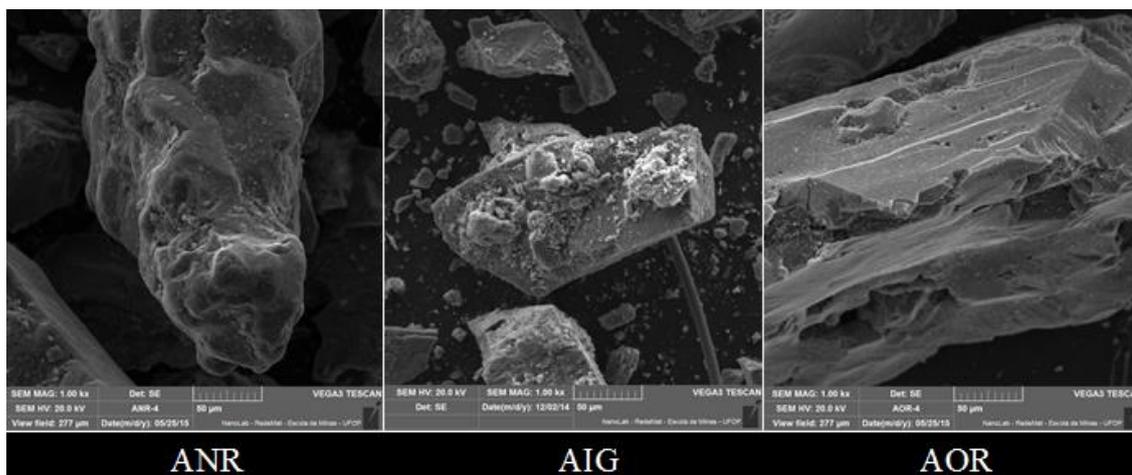


Figura 4.15: MEV- 1000x

A partir das imagens acima, fica clara a grande quantidade de finos que recobrem os grãos da AIG, bem como o acabamento arredondado dos grãos ANR e a superfície mais lisa e

fraturada dos grãos da AOR. Os micro-finos de AIG podem interferir negativamente na aderência pasta/agregado, diferentemente da AOR em que a aderência pode se dar de forma mais eficaz.

O material pulverulento disposto na superfície dos grãos pode ser visto nas imagens com 5000 vezes de aumento, na Figura 4.16.

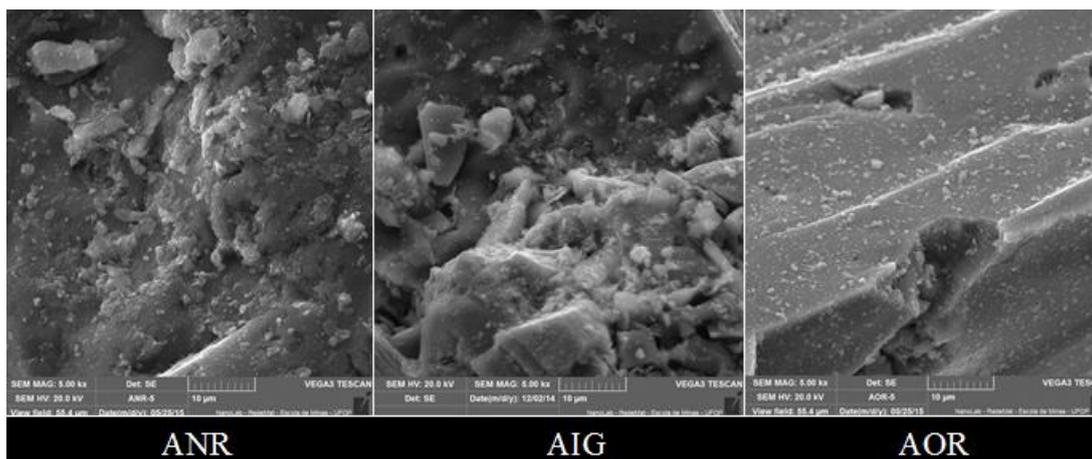


Figura 4.16: MEV- 5000x

A amostra AOR embora tenha apresentado 3,4% de pulverulento, não apresenta tantos microfinos recobrendo seus grãos como na amostra AIG. Pode-se observar, também, que a AIG apresenta maior rugosidade, seguida pela ANR. Já a AOR exibe uma superfície mais lisa, possivelmente devido ao processo de britagem, que contribui para maior aderência pasta/agregado.

4.3.4. Microscopia estereoscópica dos grãos

Continuando a análise da morfologia dos grãos, foram feitas imagens no microscópio óptico em diferentes aumentos, com 10 e 45 vezes, como pode ser visto nas Figuras 4.17 e 4.18.

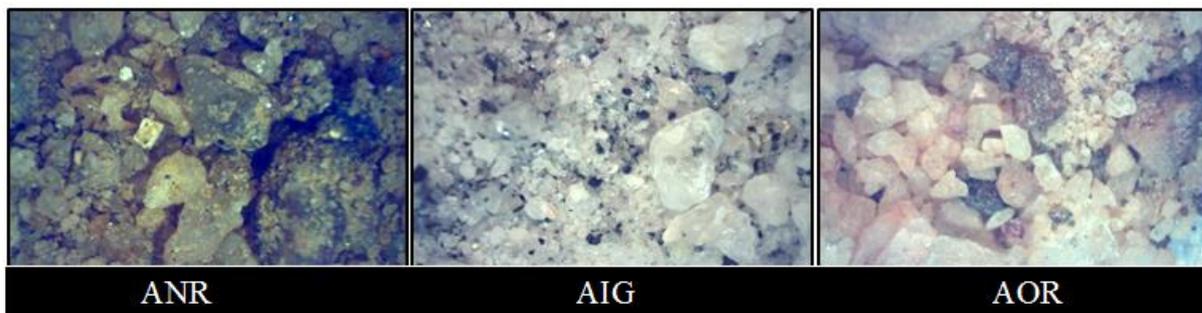


Figura 4.17: Imagens microscópio óptico-10x

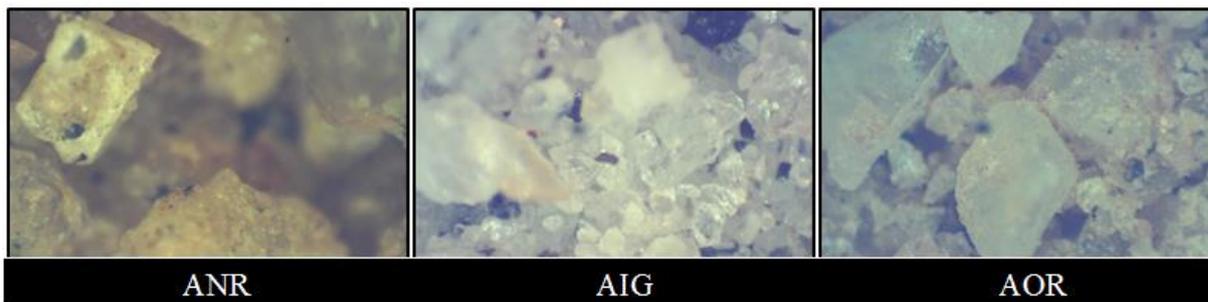


Figura 4.18:Imagens microscópio óptico- 45x

Verifica-se que, quando observados com aumentos menores (10 e 45 vezes) a diferença no formato dos grãos torna-se menos perceptível, porém nota-se diferenças quanto ao brilho e opacidade dos grãos. Enquanto os grãos da AOR apresentam-se com certo brilho e transparência, que sugerem uma superfície mais lisa, como visto no MEV, a AIG apresenta grãos mais opacos, o que pode ser relacionado à rugosidade e aderência de microfios na superfície dos seus grãos.

4.4.Caracterização física da Brita

A brita foi caracterizada fisicamente e sua curva granulométrica está ilustrada na Figura 4.19. Pode-se verificar, através da sua granulometria, que, apesar de ser nomeada como brita₀, sua curva está entre as zonas da brita₀ e da brita₁.

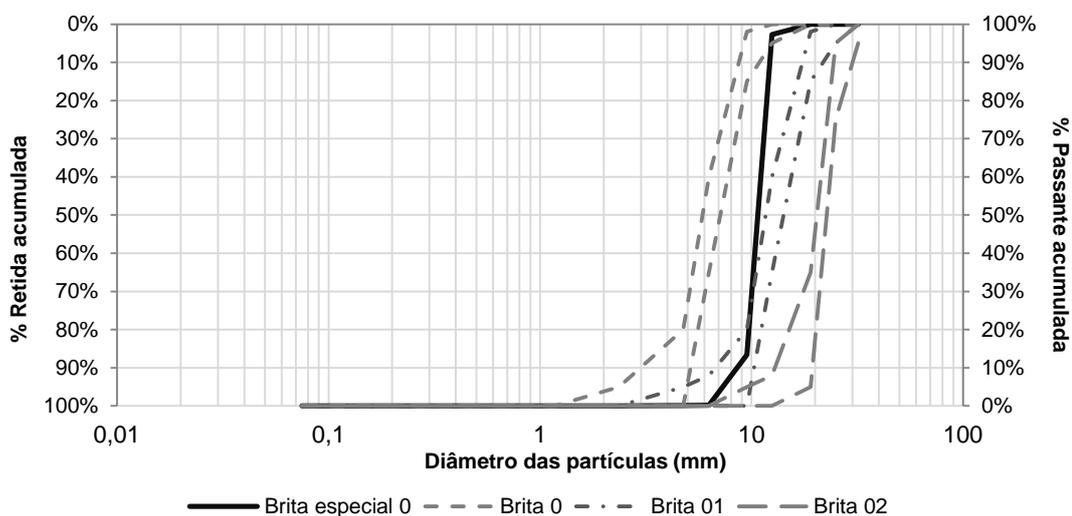


Figura 4.19: Curva granulométrica- Brita₀ especial

Em relação a sua granulometria, pode-se considerar a curva aberta, podendo levar a menor trabalhabilidade, maior consumo de cimento, mas também maior resistência mecânica (METHA & MONTEIRO, 2014).

Na Tabela 4.5, estão reunidos todos os resultados da caracterização da brita₀,

Tabela 4.5: Caracterização física da brita

Teor de umidade	0,04%
Pulverulento	0,12%
Massa unitária	1,46 g/cm ³
Massa específica	2,64 g/cm ³
Absorção de água	0,32%
DMC	12,5
MF	6,88

Nota-se que seu teor de umidade é bastante baixo, assim como sua capacidade de absorção de água. Segundo a NBR 7211/05, o valor máximo de material pulverulento para o agregado graúdo é de 1%, ou seja, a brita está dentro do limite.

4.5. Produção dos concretos

De acordo com a NBR 12655/06, para concretos com as classes de resistência, C20, C30 e C40, a relação água/cimento deve ser $\leq 0,60$, $\leq 0,55$ e $\leq 0,45$, respectivamente, apresentando consumos mínimos de cimento de $\geq 260\text{kg/m}^3$, $\geq 280\text{kg/m}^3$ e $\geq 360\text{kg/m}^3$, respectivamente, como pode ser visto na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Relação de consumo de cimento e relação água/cimento

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	$\geq \text{C20}$	$\geq \text{C25}$	$\geq \text{C30}$	$\geq \text{C20}$
	CP	$\geq \text{C25}$	$\geq \text{C30}$	$\geq \text{C35}$	$\geq \text{C40}$
Consumo de concreto por m ³ de concreto (kg/m ³)	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

Nota: CA- componentes e elementos estruturais de concreto armado; CP- componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 12655/06

Como pode ser visto na Tabela 4.7, o consumo médio de cimento de cada traço está dentro do previsto para cada classe de resistência.

Tabela 4.7: Consumo de cimento e água dos concretos produzidos

C20 a/c: 0,570	Média de consumo
cimento (kg/m ³)	434,30
água (l)	247,55
C30 a/c: 0,457	Média de consumo
cimento (kg/m ³)	553,16
água (l)	252,79
C40 a/c: 0,384	Média de consumo
cimento (kg/m ³)	690,10
água (l)	265,00

Lembrando que o traço foi o mesmo para os três agregados, logo, tem-se apenas um consumo para cada classe de resistência.

4.6. Caracterização do concreto no estado fresco

4.6.1. Ensaio de abatimento do tronco de cone

A consistência do concreto está relacionada com a facilidade de escoamento do material e com a coesão dos seus componentes, visando a compacidade e uniformidade do concreto. Já a trabalhabilidade está relacionada com a adequação dos concretos a todas as etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (ISAIAS, 2011). Para a verificação da trabalhabilidade e da consistência dos concretos, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone em todos os concretos, de forma a se obter o slump para cada traço e para cada tipo de agregado miúdo, como ilustrado na Figura 4.20.



Figura 4.20: Slump concreto com ANR-C30

Nos cálculo da dosagem foi estipulado que todos os concretos, independente da classe de resistência, deveriam apresentar 70(±10)mm de slump e, como pode ser visto na Tabela 4.8, todos apresentaram a consistência dentro do limite estipulado.

Tabela 4.8: Abatimento tronco de cone

Material	Traço	a/c	Slump (mm)
ANR	C20	0,570	75
AIG			75
AOR			75
ANR	C30	0,457	60
AIG			60
AOR			60
ANR	C40	0,384	80
AIG			75
AOR			80

Segundo Ripper (1995), o concreto com o limite de slump variando de 60 a 80 mm seria adequado para aplicação como concreto aparente e pode-se considerar a consistência variando de plástica a fluida. Observa-se que todos os agregados miúdos apresentaram o slump dentro do estipulado, e que, apenas na classe de resistência C40, a AIG apresentou menor slump que as demais, o que pode ser justificado pela quantidade de finos maior e a necessidade de mais água, porém, como o traço foi exatamente igual para todos, o slump foi menor. Isso só ocorreu na classe C40, provavelmente, devido a maior quantidade de cimento no traço, que pede mais água.

4.6.2. Massa específica do concreto no estado fresco

A determinação da massa específica do concreto fresco está ilustrada na Figura 4.21.

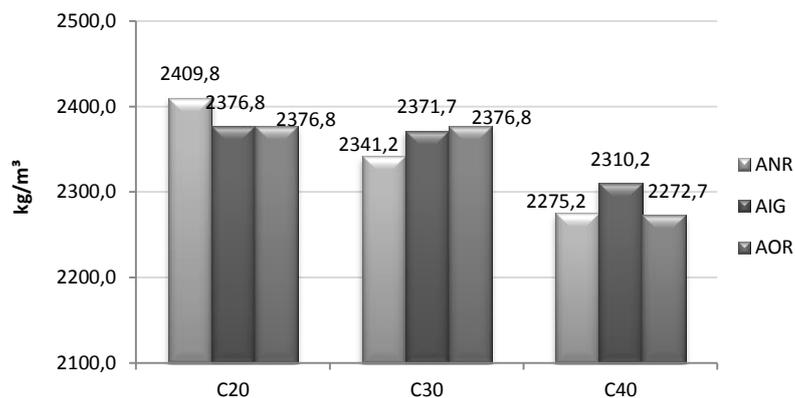


Figura 4.21: Massa específica do concreto fresco.

Pode-se verificar que as densidades estão variando de acordo com o traço. Nota-se relativa diminuição da densidade dos concretos de maior resistência, C40, isso se deve a maior proporção de cimento em relação ao agregado, levando a menores valores de massa

específica, dado que a massa específica do cimento é menor que a do agregado. Pode-se relacionar, também, a massa específica do concreto fresco com o teor de ar incorporado, que será visto no próximo item, pois quanto maior a quantidade de ar incorporado na pasta de concreto, menos denso esse concreto.

De acordo com Rodrigues & Fucale (2014), a massa específica do concreto no estado fresco depende da massa específica do agregado e, também, da sua porosidade, bem como de sua textura, forma e tamanho das partículas. Pode-se observar que, de modo geral, o agregado graúdo apresenta grande influência nos resultados, pois verifica-se certa variação nos resultados que não se relacionam diretamente com as características obtidas para os agregados miúdos. Acredita-se que essas variações nos resultados podem ser provenientes da coleta dos concretos no estado fresco para realização do ensaio, dado que é possível que, em determinada amostra, a quantidade de brita tenha sido maior que nas demais, gerando variação.

4.6.3. Teor de ar incorporado

Estão ilustrados na Figura 4.22 os valores de ar incorporado encontrados para os concretos produzidos.

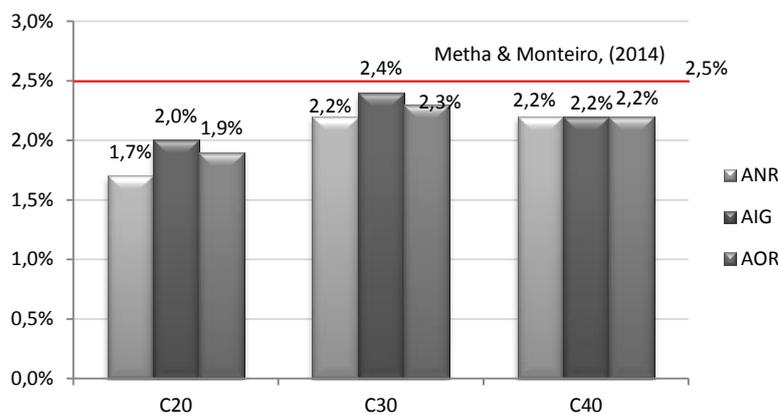


Figura 4.22: Teor de ar incorporado

Segundo Metha e Monteiro (2014), concretos sem incorporação de ar forçada, produzidos com agregados com dimensão máxima de 12,5mm, apresentam, aproximadamente, 2,5% de ar incorporado. De acordo com esse dado, podemos dizer que todos os concretos apresentam valores abaixo de 2,5%. Os concretos produzidos com AOR apresentaram teores de ar incorporado intermediários ou muito próximos aos das amostras ANR e AIG, o que sugere um comportamento muito semelhante das amostras.

4.7. Caracterização do concreto no estado endurecido

4.7.1. Índice de vazios, absorção de água e massa específica.

De acordo com a NBR 9778/05, obteve-se o índice de vazios, a absorção de água por imersão e a massa específica do concreto no estado endurecido. Os corpos de prova utilizados apresentavam 28 dias de cura. Na Figura 4.23, podemos observar os valores médios de absorção de água e na Figura 4.24 o índice de vazios.

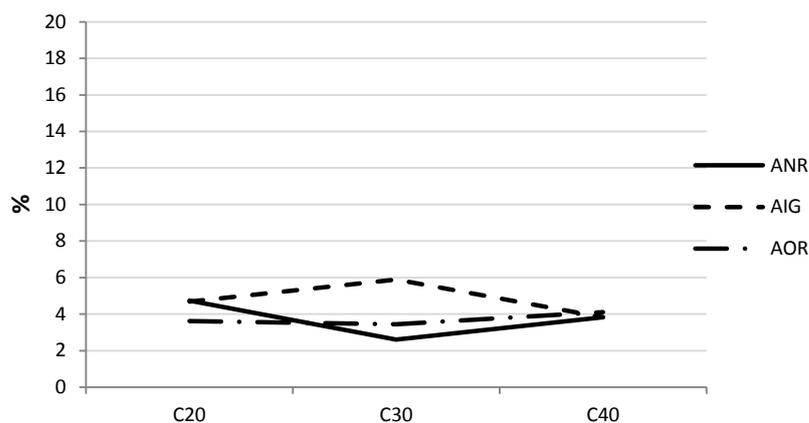


Figura 4.23: Absorção de água por imersão

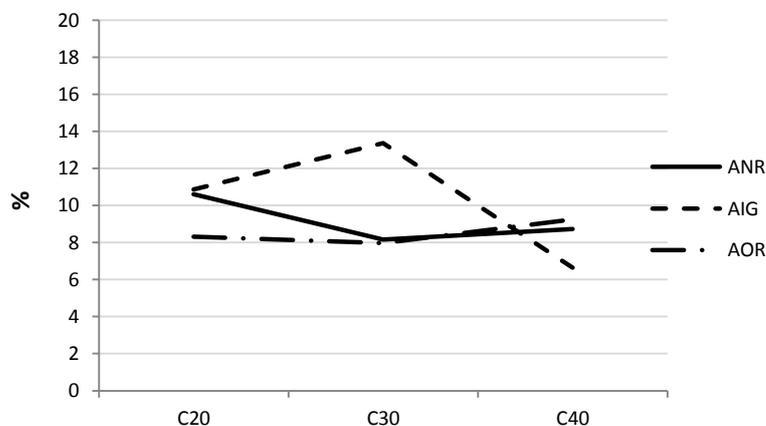


Figura 4.24: Índice de vazios

Pode-se relacionar esses valores à qualidade da moldagem. No caso da amostra AIG, por apresentar valores mais altos de índice de vazios, pode-se supor que, talvez, durante a moldagem, o tempo de vibração não tenha sido suficiente para eliminar as bolhas contidas na mistura. Porém, segundo Sato (1998), os fatores que influenciam na porosidade do concreto são os materiais, a dosagem, a idade, as condições de cura e a exposição ao ambiente. Como todos os concretos foram dosados igualmente, apresentam a mesma idade, as mesmas condições de cura e exposição ao ambiente, podemos concluir que o agregado interfere

diretamente nos resultados e que, de modo geral, a AOR apresenta comportamento mais semelhante a ANR, do que a AIG.

Em relação à massa específica podemos dizer que depende muito mais do material do que do traço como pode ser visto na Figura 4.25.

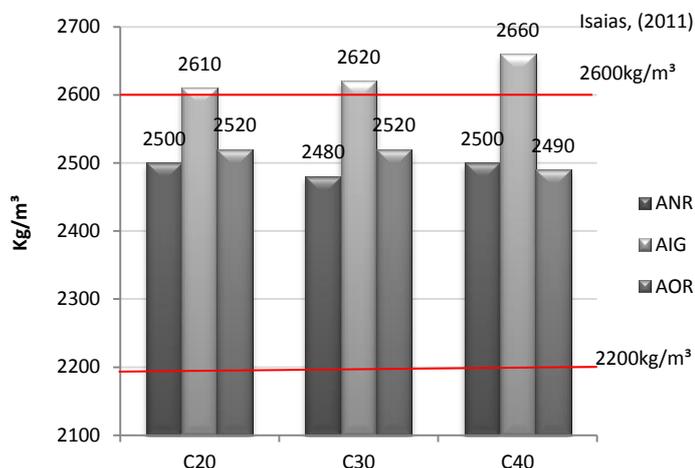


Figura 4.25: Massa específica real – concreto no estado endurecido

Segundo Isaias (2011), a massa específica de concretos convencionais varia em torno de 2200 a 2600kg/m³. Dessa forma, podemos dizer que, para todas as classes de resistência, as amostras ANR e AOR são tidas como normais. Pode-se observar, também, que a AOR apresenta praticamente a mesma massa específica, em média 2510kg/m³, nos três traços. Esse valor se aproxima muito da ANR que apresenta uma média de 2493kg/m³. Já a amostra AIG exibe uma média mais elevada de 2630kg/m³, que está relacionada a massa específica do próprio agregado e que pode ser classificado como concreto pesado, pois apresenta valores entre 2600 e 4500kg/m³.

4.7.2. Caracterização elasto-mecânica

4.7.2.1. Ensaio de resistência à compressão simples

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples podem ser visualizados na Figura 4.26, onde se encontram as médias das resistências nas idades de 3, 7 e 28 dias para os três traços e para cada uma das areias avaliadas.

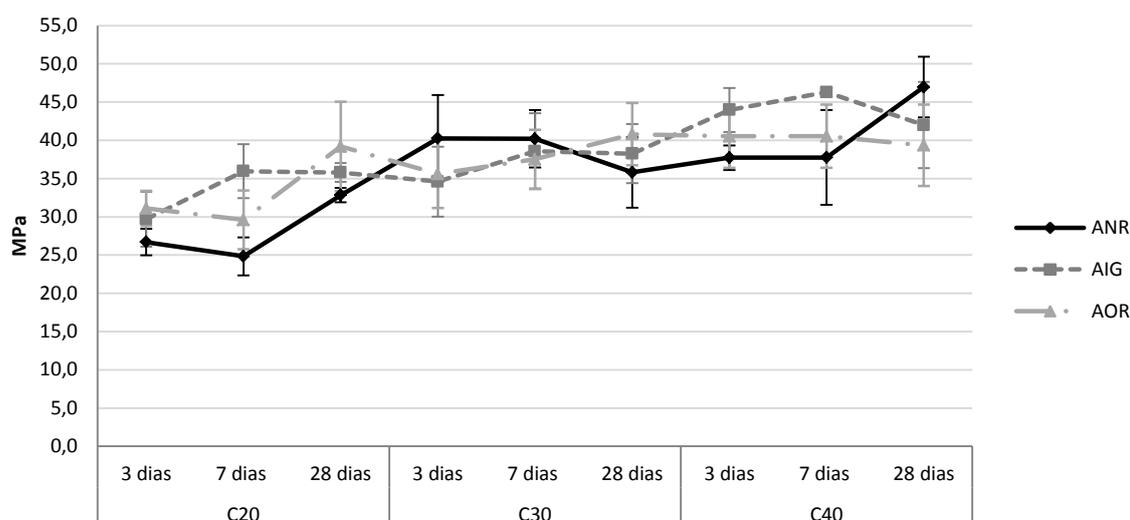


Figura 4.26: Resistência à compressão simples

De acordo com os resultados, podemos verificar que na classe de resistência C20, onde o consumo de cimento é menor, aos 28 dias, a areia AOR apresenta não só o melhor desempenho, mas também, um desempenho esperado para a classe C40. Na classe C30, aos 28 dias a AOR também apresentou o melhor desempenho quando comparado com as demais areias, e também muito acima do esperado, que era 30 MPa. Já na classe C40, a amostra ANR apresentou, aos 28 dias, melhor desempenho, seguida por AIG e AOR, porém a AOR, ainda assim, obteve a resistência esperada de 40 MPa. Na Tabela 4.9, é ilustrada a análise de variância dos resultados de resistência à compressão.

Tabela 4.9: Anova- Resistência à compressão simples

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ANR	29	1042,450	35,947	51,696
AIG	29	1113,300	38,390	32,475
AOR	29	1076,650	37,126	32,497

Fonte da variação	Somados dos quadrados	GL	Médias Quadradas	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre ANR e AOR	20,166	1	20,166	0,479	0,492	4,013	Não
Entre AIG e AOR	23,159	1	23,159	0,713	0,402	4,013	Não
Entre ANR e AIG	86,547	1	86,547	2,056	0,157	4,013	Não

De acordo com a análise estatística ANOVA, com nível de confiança de 95%, podemos observar que não houve significativa diferença entre as resistências à compressão dos três agregados e que, assim, estatisticamente a AOR comporta-se igual aos agregados de referência ANR e AIG.

4.7.2.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os resultados da tração por compressão diametral estão ilustrados na Figura 4.27. Os valores da AOR, se aproximam muito da amostra ANR e AIG.

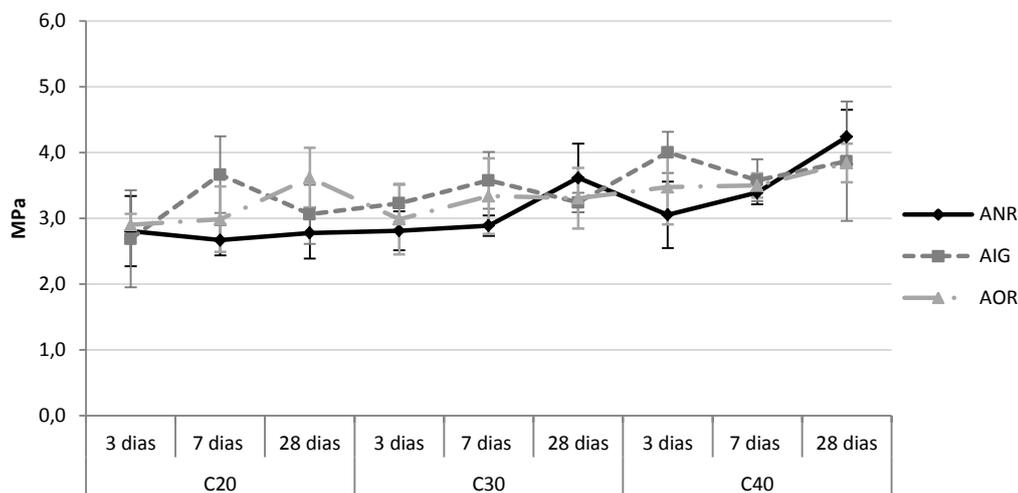


Figura 4.27: Resistência à tração por compressão diametral

Observa-se nos resultados que, novamente, na classe C20, a AOR apresentou o melhor desempenho, aos 28 dias. E nas classes C30 e C40, a AOR obtém desempenho satisfatório em cada uma delas, apresentando aos 28 dias, mais de 3 MPa, em C30 e, cerca de 4 MPa, em C40. Na Tabela 4.10, podemos observar a análise estatística ANOVA, aplicada aos resultados de resistência à tração.

Tabela 4.10: Anova- Resistência à tração

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ANR	36	113,002	3,139	0,351
AIG	36	123,643	3,435	0,327
AOR	36	119,800	3,328	0,227

Fonte da variação	Somados dos quadrados	GL	Médias Quadradas	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre ANR e AOR	0,642	1	0,642	2,223	0,141	3,978	Não
Entre AIG e AOR	0,205	1	0,205	0,741	0,392	3,978	Não
Entre ANR e AIG	1,573	1	1,573	4,638	0,035	3,978	Sim

A análise estatística, ANOVA, verificou que a AOR apresenta desempenho mecânico em relação à tração por compressão diametral, estatisticamente igual à ANR e a AIG, porém, nota-se, também, que existe diferença significativa entre ANR e AIG, pois a amostra natural se mostra em média 9% menos resistente que a amostra AIG.

4.7.2.3. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Na Figura 4.28, está disposta a média dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, que foi obtido nos CPs com 28 dias de cura, através da velocidade sônica do ultrassom. De acordo com a NBR 6118/04, empregou-se o valor de 0,2 para o coeficiente de Poisson, nos cálculos do módulo de elasticidade, embora segundo Almeida (2005), para concretos normais, experimentalmente esse valor varia de 0,15 a 0,22.

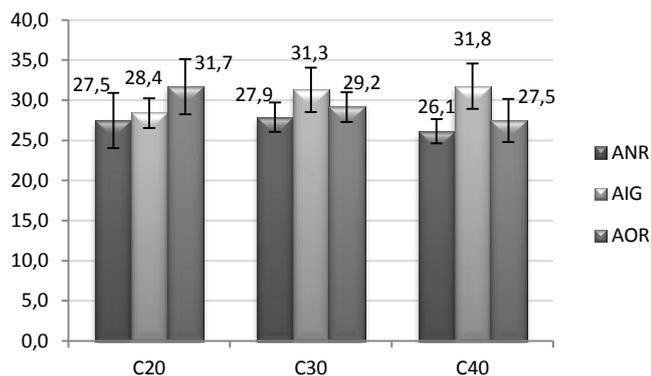


Figura 4.28: Módulo de elasticidade dinâmico

Podemos observar que o módulo está muito ligado à moldagem dos CPs, por isso, de certa forma, cada um dos concretos apresenta certa variação, pois, por mais que o método de produção tenha sido o mesmo para todos, devido a características específicas de cada material, é possível que haja interferência na moldagem e também na qualidade da superfície de cada um dos CPs ensaiados. Pode-se relacionar também ao índice de vazios, pois a velocidade sônica varia conforme a porosidade interna do concreto. Na classe C20, pode-se observar que a AOR apresenta menor índice de vazios, conforme visto anteriormente, e maior MED, assim como, nessa mesma classe de resistência, a ANR e a AIG apresentam índices de vazios muito próximos, tornando, assim, os MEDs, também semelhantes. Na Tabela 4.11, pode-se observar a análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico.

Tabela 4.11: Anova- Módulo de elasticidade dinâmico

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
ANR	12	326,135	27,178	5,409
AIG	12	365,821	30,485	7,632
AOR	12	353,253	29,438	7,963

Fonte da variação	Somados dos quadrados	GL	Médias Quadradas	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre ANR e AOR	30,642	1	30,642	4,583	0,044	4,301	Sim
Entre AIG e AOR	6,581	1	6,581	0,844	0,368	4,301	Não
Entre ANR e AIG	65,624	1	65,624	10,065	0,004	4,301	Sim

Pela análise estatística observou-se que a AOR pode ser considerada estatisticamente semelhante apenas à amostra AIG, já a ANR apresenta significativa diferença nos resultados obtidos para módulo de elasticidade dinâmico quando comparado à AIG e à AOR.

4.7.2.4. Determinação do módulo de elasticidade estático

A determinação do módulo de elástico estático foi realizada, de acordo com a NBR 8522/02, através de extensômetro posicionado no CP o mais alinhado verticalmente, de forma a não comprometer os resultados.

As médias dos resultados estão ilustradas na Figura 4.29. Pode-se observar que os valores estão diretamente relacionados ao traço, ou seja, quanto maior a resistência, maior o módulo de elasticidade. Segundo Mehta & Monteiro (2014), o módulo de elasticidade dinâmico é em torno de 20%, 30% e 40% maior que o módulo de elasticidade estático para concretos de alta ($f_{ck} \geq 40\text{MPa}$), média ($20 < f_{ck} < 40\text{MPa}$) e baixa resistência ($f_{ck} \leq 20\text{MPa}$), respectivamente. Porém, experimentalmente, as diferenças obtidas por Almeida e Hanai (2008) foram de 8%, 27% e 34% para alta, média e baixa resistência, respectivamente. E estão muito mais próximas das diferenças médias obtidas, neste trabalho, que foram de 4,43%, 13,36%, 46,15%, para os traços C40, C30 e C20, respectivamente.

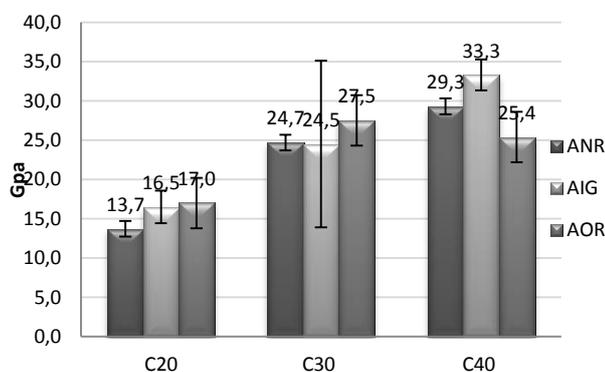


Figura 4.29: Módulo de elasticidade estático

Nota-se que os resultados apresentam grandes desvios padrão. De acordo com Montija (2007), dentro do ensaio de obtenção do MEE poderia haver desvios da ordem de 3,5GPa, porém segundo Bittencourt et al. (2014, apud Pacheco et al, 2014), esse desvio pode atingir de 5,8 a 6,3GPa, ou seja, fica evidente que existe certa dificuldade e incerteza na execução desse ensaio e que, justamente por isso, obteve-se esses desvios elevados. Segundo Guimarães (2006), nos ensaios realizados em laboratórios, a relação entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico varia de 0,5 a 0,8, dependendo da resistência do concreto e,

principalmente, da heterogeneidade do mesmo, por isso, é difícil o concreto apresentar um módulo de elasticidade característico, pois as ligações entre o cimento e o agregado e a estrutura do cimento hidratado são extremamente variáveis. O módulo de elasticidade do concreto é sensível ao módulo do agregado, mas também ao módulo da zona de transição, como pode ser visto no esquema da Figura 4.30. Esses são apenas alguns dos fatores que podem ter interferido nos valores obtidos para o módulo de elasticidade estático.

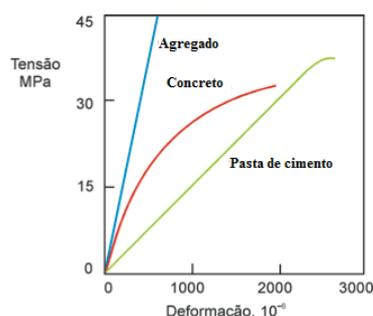


Figura 4.30: Comportamento elástico dos componentes do concreto
Fonte: Metha & Monteiro, 2014.

Na tabela 4.12, estão ilustrados os dados da análise estatística de variância dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático.

Tabela 4.12: Anova- Módulo de elasticidade estático

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
ANR	7	171,000	24,429	150,286
AIG	7	182,000	26,000	102,333
AOR	7	187,400	26,771	62,099

<i>Fonte da variação</i>	<i>Somados dos quadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Médias Quadradas</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	<i>Significância</i>
Entre ANR e AOR	16,071	1	16,071	0,148	0,707	4,747	Não
Entre AIG e AOR	1,143	1	1,143	0,014	0,909	4,747	Não
Entre ANR e AIG	8,643	1	8,643	0,068	0,798	4,747	Não

Pode-se observar que, estatisticamente, a amostra a AOR é semelhante às amostras ANR e AIG, dado que, pela análise de variância, não houve diferença significativa no valores obtidos no ensaio, assim como a AIG também apresentou-se estatisticamente semelhante a ANR.

4.7.3. Ensaio de durabilidade

4.7.3.1. Ensaio de expansão na Autoclave do Cimento Portland (modificado)

Este ensaio foi realizado com o intuito de verificar o comportamento dos agregados miúdos quando aplicados a uma argamassa submetida à elevada temperatura e pressão. Utilizando o ensaio de expansão do cimento Portland modificado, pode-se analisar o comportamento dimensional do agregado na argamassa sob condições severas. Na Figura 4.31 são ilustradas as médias de expansão das argamassas, de cada agregado.

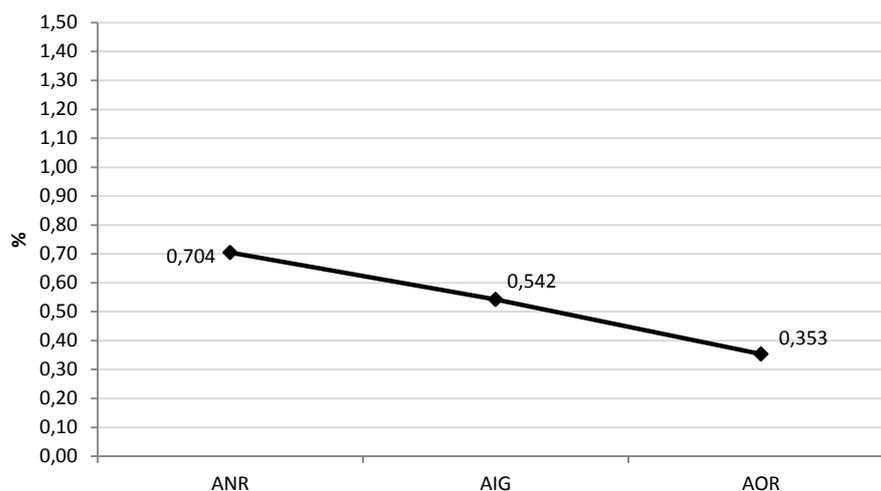


Figura 4.31: Expansão média obtida na autoclave

Para esse ensaio sem modificações, segundo Brooks & Neville (2013), é definido um limite de 0,8% do comprimento inicial, para considerar o cimento como não expansivo, no entanto, o que pretende se avaliar neste ensaio, não é o cimento, dado que em todas as amostras foram utilizados o mesmo tipo de cimento. A partir dos resultados, verificamos que a AOR foi a que obteve menor expansão média, 0,353%, já a ANR apresentou a maior expansão (0,704%). O fator que, possivelmente, contribui na expansão da ANR é a presença de impurezas orgânicas. Conforme mostrado anteriormente, a ANR não se apresentou dentro do limite colorimétrico estipulado pela norma. E segundo Neville (1982), as patologias relacionadas à expansão e desagregação do agregado miúdo se devem à presença de impurezas orgânicas que geram a má aderência da pasta de cimento ao agregado. Considerando que a AOR apresentou teor de impurezas orgânicas dentro dos limites normativos e bem menores que a ANR, sua expansão, também, deveria ser menor, de acordo com a obtida no ensaio.

4.7.3.2. Determinação da reatividade álcali-agregado

Na Figura 4.32, pode-se observar as médias de expansão de cada um dos agregados miúdos, de forma que a amostra AOR exibe os menores valores de expansão.

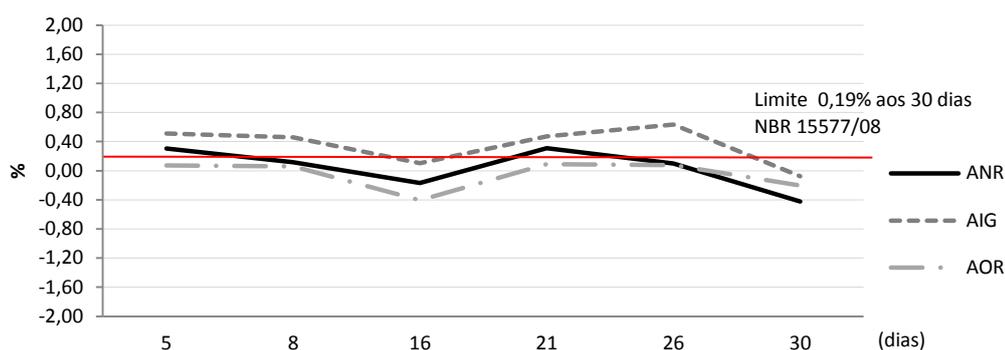


Figura 4.32: Expansão média da reação álcali-agregado

De acordo com a NBR 15577-1/08, para que o agregado seja considerado potencialmente inócuo e possa ser utilizado em concretos, é necessário que aos 30 dias a expansão seja menor que 0,19%. Dessa forma, podemos observar que aos 30 dias as três amostras apresentam expansões menores que o limite normativo.

Existem outros limites bastante utilizados também, como o da ASTM C-1260, em que considera-se como comportamento inócuo, expansões menores que 0,10%, aos 16 dias. Expansões entre 0,10 e 0,20%, aos 16 dias, indicam inconclusão dos resultados e valores acima de 0,20%, aos 16 dias, expansão potencialmente deletéria. Assim, pode-se considerar AOR e ANR como agregados inócuos e AIG com possibilidade de comportamento tanto inócuo como deletério.

Segundo Berra et al (1994), o melhor limite a ser aplicado para o ensaio do banho térmico é o estipulado por Hooton & Rogers (1993), que define como agregado inócuo expansões de até 0,15% aos 14 dias. Dessa forma, verifica-se que tanto a AOR quanto a ANR são tidas como não reativas e apenas a AOR não tem expansões maiores que 0,1% em nenhum momento durante os 30 dias de ensaio.

O relógio comparador digital em que são feitas as leituras é muito sensível, com um nível de precisão na casa de 0,001mm e a barra padrão que auxilia nas medições também é extremamente sensível à temperatura ambiente, ou seja, devido a esses dois fatores, as curvas apresentam certa variação.

Podemos justificar a expansão maior das amostras AIG e a ANR por apresentarem traços de álcalis na análise de FRX, diferentemente da AOR.

4.7.4. Caracterização morfológica do concreto

Produziu-se imagens no microscópio óptico dos concretos com os agregados em estudo, com aumento de 10 vezes. Como pode ser observado, na Figura 4.33, a pasta de cimento se encontra bem aderida em torno dos agregados miúdos.

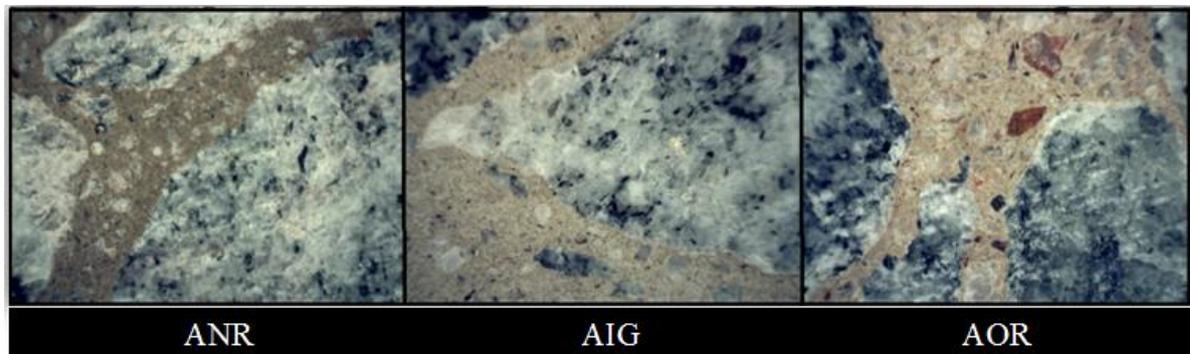


Figura 4.33: Estereoscopia dos concretos-10x

Observa-se a distribuição homogênea dos grãos na pasta do concreto com ANR. É possível ver, mais uma vez, o formato lamelar dos grãos da AIG, bem como o formato intermediário da AOR, que não se mostra nem tão lamelar quanto a AIG nem tão volumétrico quanto a ANR. Apesar do formato lamelar da AIG e da AOR, não houve diferenças em relação às resistências até 40 MPa. Verifica-se que os grãos em todas os concretos aparentam estar adequadamente envolvidos pela pasta de cimento.

CAPITULO - 5

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Podemos concluir, de acordo com a caracterização física, que a AOR apresenta-se muito semelhante a ANR, com valores de teor de umidade, massa unitária e absorção de água praticamente idênticos aos da amostra natural, com diferenças de no máximo 0,04%, enquanto que a AIG apresenta diferenças mais significativas quando comparada fisicamente a ANR. Na caracterização química e mineralógica, pode-se observar ainda maior semelhança entre a AOR e a ANR, pois ambas apresentaram mais de 85% de sílica (SiO_2) e traços de óxido de ferro (Fe_2O_3) em sua composição. Na detecção das fases cristalinas obteve-se 100% de quartzo nas duas amostras. O formato dos grãos da AOR mostrou-se semelhante ao da AIG, devido ao processo de produção de ambas. O formato irregular e pontiagudo das partículas é proveniente do mecanismo de impacto entre os grãos durante a cominuição no britador de mandíbulas. Porém, a AOR apresentou, também, certa volumetria do material particulado, semelhante a ANR. A superfície da AOR mostrou-se lisa, já a ANR apresentou uma superfície mais rugosa e com formato mais cúbico, já a AIG apresentou certa rugosidade em decorrência de microfios dispostos na superfície de seus grãos. Porém, essa rugosidade não auxilia na aderência pasta/agregado, ao contrário, prejudica, podendo afetar a resistência mecânica. Através da estereoscopia, podemos confirmar o aspecto volumétrico dos grãos da AOR e mostrar como macroscopicamente os agregados em estudo não apresentam diferenças significativas aparente.

Com a produção dos concretos, foi possível observar que a trabalhabilidade da AOR manteve-se sempre igual a da ANR, pois em todos os traços, os concretos AOR e ANR apresentaram mesmo valor de slump, enquanto AIG mostrou necessitar mais de água no traço C40. Nos ensaios da massa específica, no estado fresco, e do teor de ar incorporado, as três areias apresentaram resultados próximos.

No estado endurecido, a massa específica real da AOR assemelhou-se a da ANR. Em relação aos ensaios de índice de vazios e absorção de água nos concretos endurecidos, podemos dizer que a AOR apresentou valores relativamente próximos aos da ANR novamente, assim como a AIG, com exceção da classe C30, que mostrou valores maiores, possivelmente devido ao processo de moldagem.

No ensaio de resistência à compressão, foi observado que a resistência dos concretos contendo AOR, obteve desempenho melhor, aos 28 dias, quando comparado a ANR e AIG, na classe de resistência C20, ou seja, com menor consumo de cimento. A AOR apresentou, aproximadamente, 40 MPa em todas as idades ensaiadas, sendo que a ANR, apresentou aos 3 e 7 dias valores relativamente mais baixos que o desejado, enquanto a AIG obteve o melhor desempenho na classe C40, ou seja, onde o volume de cimento utilizado foi bem elevado. O desempenho dos concretos em relação à resistência à tração mostrou-se em concordância com o esperado, que é a resistência à tração em torno de 10% da resistência à compressão simples. Nos traços menos resistentes, como C20 e C30, o desempenho de todas foi melhor que o esperado, assim como na compressão simples. A AOR obteve desempenho melhor que ANR e AIG, na classe C20 e, dentro do esperado, nas classes C30 e C40. Resumidamente, observa-se que a AOR apresenta, no traço com menor consumo de cimento, não só o melhor desempenho, mas também um desempenho esperado para classes de resistência bem acima (C40), levando em conta que a classe C40 consome 37% a mais de cimento que a C20 e que, segundo Sousa (2013), uma tonelada de cimento libera em torno de uma tonelada de CO₂, ou seja, utilizar um agregado que vai obter a mesma capacidade de resistência liberando menos CO₂, e que ainda é fruto da reciclagem de rejeitos, torna esse agregado uma alternativa mais ambientalmente correta e tecnicamente utilizável, quando comparada à utilização de outros agregados naturais e industriais.

Em relação aos módulos de elasticidade dinâmico e estático, podemos dizer que a AOR apresentou resultados estatisticamente iguais à AIG, já em comparação à ANR, a AOR apresentou certa diferença no módulo de elasticidade dinâmico, mas no estático mostrou comportamento semelhante, com valores estatisticamente iguais. Na verificação da estabilidade dimensional do agregado, através da expansão em autoclave, pode-se notar que a AOR foi a que menos expandiu quando submetida a alta pressão e temperatura. A ANR foi a que apresentou maior expansão, provavelmente por conter impurezas orgânicas. No ensaio de verificação da reatividade álcali agregado, a AOR foi a que menos expandiu, novamente, durante os 30 dias no banho térmico, enquanto que a AIG foi a que mais expandiu. Porém, não podemos concluir que a AIG é exapansivamente deletéria, pois aos 30 dias sua expansão foi menor que o limite dado na NBR 15577/09, de 0,19% aos 30 dias.

Com base em todos os ensaios realizados e nos resultados obtidos, pode-se afirmar que a produção da areia com granulometria ótima, a partir do resíduo da mineração de quartzo,

desempenha satisfatoriamente o papel de agregado miúdo não só na aplicação em argamassas, como foi realizado por Dutra (2013), mas como agregado miúdo para a construção civil em geral, principalmente na produção de concretos.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- ❖ Investigar o potencial zeta das partículas da areia produzida com o rejeito;
- ❖ Verificar a influência da superfície específica dos grão da AOR, através do ensaio de BET;
- ❖ Estudar as zonas de transição na interface agregado/pasta, dos concretos com AOR, através de ensaios de difração de raios X;
- ❖ Produzir a areia ótima reciclada por meio de britadores VSI, de forma a verificar se há mudança significativa no seu desempenho como agregado miúdo;
- ❖ Produzir e avaliar agregados graúdos a partir das frações mais grossas do resíduo gerado da mineração de quartzo;
- ❖ Estudar uma destinação adequada para a parcela de finos gerados no processo de produção da areia ótima reciclada;
- ❖ Aplicar a areia ótima reciclada em tipos especiais de concreto, como os de alto desempenho (CAD), os concretos autoadensáveis, os concretos de alta resistência (CAR), entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAFE, A. b. (2014). Dados relevantes do setor.
- AKHAVAN, A. C. (15 de fevereiro de 2012). *www.quartzopage.de*. Acesso em 29 de julho de 2015, disponível em The Quartzo Page: <http://www.quartzpage.de/>
- ALBERS, A. P., MELCHIADES, F. G., MACHADO, R., BALDO, J. B., & BOSCHI, A. O. (2002). Um método simples de caracterização de argilomineriais por difração de raios X. *Cerâmica*(48).
- ALMEIDA, S. F. (2005). Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura. *Dissertação de mestrado*. São Carlos: Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- ALMEIDA, S. L. M. & Luz, A. B. (2012). *Manual de Agregados para a construção civil* (2º ed.). Rio de Janeiro: CETEM.
- ALMEIDA, S. L. & SILVA, V. S. (2005). *Produção de areia artificial com base em finos de brita de granito*. Rio de Janeiro: CETEM.
- ALMEIDA, S. & HANAI, J. B. (2008). Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos do concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura. *Caderno de Engenharia de Estruturas*.
- ANDRIOLO, F. (1989). *Contribuições para o conhecimento e desenvolvimento do Concreto Rolado*. Barber Greene.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-151** – Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement. West Conshohocken- United States.
- _____.ASTM C-597 – Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken- United States.
- ARGONZ, R. (2001). Purificação de rejeitos de lascas de quartzo das indústrias de silício. *Monografia*. Universidade Estadual de Campinas.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 30 - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- _____.NBR NM 30 – Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. NBR NM 45 – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

- _____.NBR NM 46 – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
- _____.NBR NM 47 – Concreto - Determinação do teor de ar incorporado em concreto fresco- método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- _____.NBR NM 49 – Agregados fino: determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.
- _____.NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____.NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- _____.NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____.NBR 5739 – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____.NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- _____.NBR 6467 – Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.
- _____.NBR 7211 – Agregados para concretos - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- _____.NBR 7222 – Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- _____.NBR 8522 – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- _____.NBR 8802 – Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.
- _____.NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- _____.NBR 9833 – Concreto fresco - Determinação massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.
- _____.NBR 9938 – Agregados - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.
- _____.NBR 9939 – Agregado - Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

- _____.NBR 10004 – Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004
- _____.NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004
- _____.NBR 15577– Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2009.
- BACCI, D. C., LANDIM, P. M., ESTON, S. M. (2006). Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana. *REM- Revista Escola de Minas*, 59.
- BARRETO, M. L. (2001). *Mineração e desenvolvimento Sustentável: Desafios para o Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM.
- BATISTA, A. C., FIGUEIREDO, L. P., PRADO, R. J., VIANA, R. R. (2009). Caracterização química e estrutural do quartzo. *32º Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química*. Fortaleza.
- BENETTI, J. K. (2012). Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto. *Dissertação de mestrado*. São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- BERRA, M., MANGIALARDI, T., PAOLINI, A. E. (1994). Application of the NaOH Bath Test Method for Assessing the Effectiveness of Mineral Admixtures against Reaction of Alkali with Artificial Siliceous Aggregate. *Cement and Concrete Composites*.
- BRAZ, E. & LUZ, A. B. (2000). *Quartzo- Série Rochas e Minerais Industriais*. Rio de Janeiro: CETEM.
- BROOKS, J. J. & NEVILLE, A. M. (2013). *Tecnologia do concreto*. Bookman.
- CATOIA, T. (2007). Ladrilhos e revestimento hidráulicos de alto desempenho. *Dissertação de mestrado*. São Carlos: Universidade de São Paulo- Escola de Engenharia de São Carlos.
- CATOIA, T. & LIBORIO, J. B. (2008). Ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto desempenho. *Caderno de Engenharia e Estruturas*, pp. 53-74.
- CAVALCANTE, A. L., VIANA, J. P., SILVA, A. P. (1997). *Caderno de diagnostico: Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração*. Brasília: MMA, Ministério do Meio Ambiente.
- CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, C. (25 de março de 2004). Areia artificila pode ser a opção mais barata. CETEM.
- COOSOLINO, L. C. & PEREIRA, A. H. (2010). *Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização*. ATCP.

- CUNHA JÚNIOR, N. B. (2012). A certificação verde no setor da construção civil: os benefícios da implementação da gestão e uso eficiente de água. *Dissertação de mestrado*. Florianópolis: Universidade federal de Santa Catarina.
- DIAMOND, S. & HUANG, J. (2001). The ITZ in concrete- a different view based on image analysis and SEM observations. *Cement and Concrete Composites*.
- DNPM. (2014). *Sumário Mineral*, Brasília, Brasil.
- DUTRA, M. B. (2013). Produção de Areia Padronizada Sílica- Recicçagem de resíduo sólido da mineração. *Monografia*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- FEAM, F. E. (2010). *Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no estado de minas gerais, com prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade*. Belo Horizonte: FEAM.
- FONTES, W. (2013). Rejeito de barragem de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento. *Dissertação de mestrado*. Ouro Preto: PROPEC- universidade federal de Ouro Preto.
- FRANÇA, B. B., SOUZA, B. P., PEREIRA, A. C., FONTES, W. C., PEIXOTO, R. A. (2013). Argamassas de escória de aciaria para assentamento de alvenarias e resvestimento. *X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*. Fortaleza.
- FREITAS JÚNIOR, J. A. (2013). Materiais de construção- a estrutura do concreto. *notas de aula*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- GIORDANI, C. (2014). Viabilidade técnica do uso de resíduo do beneficiamento de arenito como substituição do agregado miúdo em argamassas. *Monografia de engenharia civil*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio grande do Sul.
- GLASSER, L. S. & KATAOKA, N. (1981 a). Some observations on the rapid chemical test for pontentially reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*.
- GLASSER, L. S. & KATAOKA, N. (1981 b). The chemistry of alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*.
- GONÇALVES, D., PEIXOTO, R., FONTES, W., MENDES, J. (2015). Evaluation of the economic feasibility of a processing plant for steelmaking slag. *Waste Managent & Research*.
- GUIMARÃES, C. O. (2006). Avaliação do uso da água magnetizada na produção de concretos. *Dissertação de mestrado*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
- HOOTON, R. D. & ROGERS, C. A. (1993). Development of the NBRI Rapid Mortar Bar Test Leanding to its use in North America. *Construction and Building Materials*.

- IBRAM, I. B. (2012). Informações e análises da economia mineral brasileira. (IBRAM, Ed.) *Industria Mineral*, 17-19.
- ISAIAS, G. C. (2011). *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: IBRACON.
- JANUZZI, R. V. (2012). Estudo do comportamento mecânico de blocos com escória de aciária visando a aplicabilidade em Alvenaria. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
- JOHN, V. M. (2000). Reciclagem de resíduos na construção civil- contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. *Tese de doutorado*. São Paulo: Escola Politécnica da Unversidade de São Paulo.
- LACERDA JÚNIOR, B. R. (2011). ESTATÍSTICA. *Areia e Brita*, 27-28.
- LOBATO, E. (2009). *Mineração Brasileira- Relatório técnico: perfil do quartzo*. MME, Ministério de Minas e Energia.
- MARTINS, P. B. (2008). Influência da granulometria do agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto. *Monografia*. Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana.
- MECHI, A. & SANCHES, D. L. (2010). Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, 24(68).
- MENOSSE, R. T. (2004). Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto. *Dissertação de mestrado*. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista.
- METHA, P. K. & MONTEIRO, P. J. (2014). *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. (2° ed.). IBRACON.
- MMA, M. d. (1997). *Diretrizes ambientais para o setor mineral*. Brasília.
- MME, M. d. (2010). *Plano nacional de Mineração 2030 (PNM- 2030)*. Brasília.
- MONTIJA, F. C. (2007). Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto. *Dissertação de mestrado*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- NEVILLE, A. M. (1997). *Propriedades do concreto* (2° ed.). São Paulo: Pini.
- ODELSON, J. B., KERR, E. A., VICHIT-VADAKAN, W. (2007). Young's modulus of cement paste at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, pp. 258-263.
- OKADA, E. M., CHIBLI, P. A., BASTOS, L. A., FONTES, W. C., PEIXOTO, R. A. (2013). Produção de argamassa aditivada com resíduos de fibra de vidro pós processada. *X Simpósio Brasileiro de Tecnologias das Argamassas*. Fortaleza.

- PACHECO, J., BILESKEY, P., MORAIS, T. R., GRANDO, F., HELENE, P. (2014). Consideração sobre o módulo de elasticidade do concreto. *Anais do 56º Congresso Brasileiro de Concreto*. Natal: IBRACON.
- PEIXOTO, R. A., TOFFOLO, R. V., FILHO, J. O., CURY, A. A. (2014). Viabilidade técnica de elementos de concreto para a pavimentação produzida com rejeito de barragem de minério de ferro. *Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto*. Natal: IBRACON.
- RIBEIRO, C. C., PINTO, J. D., STARLING, T. (2002). *Materiais de construção civil* (2º ed.). Belo Horizonte: UFMG.
- RIPPER, E. (1995). *Manual prático de materiais de construção*. São Paulo: Pini.
- RODRIGUES, C. R. & FUCALE, S. (2014). Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. *Ambiente Construído*, 14(1).
- RUSSO, M. L. (2011). Reciclagem de resíduo gerado na extração de quartizito. *Dissertação de mestrado*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
- SANCHEZ, L. F. (2008). Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos. *Dissertação de mestrado*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- SANTOS, D. H., MARINHO, A. L., BARROS, T. R., SILVA, G. J., PEIXOTO, R. A. (2014). Blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para uso em alvenaria modular. *Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto*. Natal: IBRACON.
- SANTOS, E. S., GAMA, E. M., SOUZA, A. S., MATOS, R. P. (2013). Espectrometria de fluorescência de raios X na determinação de espécies químicas. *Enciclopédia Biosfera*, 9(17).
- SATO, N. (1998). Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos. *Tese de doutorado*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo.
- SILVA, J. P. (2007). Impactos causados por mineração. *Espaço da Sophia*.
- SILVA, J. P. (2012). Agregados e Sustentabilidade. In: A. B. LUZ, & S. L. ALMEIDA, *Manual de Agregados para construção civil* (pp. 237-254). Rio de Janeiro: CETEM.
- SINDIEXTRA, S. d. (2014). *Ferro Ligas*. Belo Horizonte.
- SOARES, A. F. (2009). Software Especialista para Dosagem de Misturas Cimentícias. *Monografia*. CEFET- MG Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- SOUSA, R. G. U. (2013). Quantificação das emissões de CO₂ dos materiais de construção: aço, areia, brita, cerâmica vermelha e cimento - estudo de caso em empreendimento habitacional de interesse social. *Monografia*. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA.

- TAKANO, C., DEODORO, J. T., NASCIMENTO, R. C., MOURÃO, M. B., LENZ, G., MARTINS, D. S. (2000). A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos. *Seminário Nacional sobre reuso/reciclagem de resíduos sólidos industriais*. São Paulo.
- TEXIER, G. (2001). Visão Governamental Européia. *INTERNATIONAL SEMINAR ON CONSTRUCTION AGGREGATES* (pp. 24-28). São Paulo: ANEPAC.
- TUNES, M. R. (2001). Visão do governo sobre o futuro da mineração de agregados no Brasil. *INTERNATIONAL SEMINAR ON CONSTRUCTION AGGREGATES* (pp. 36-39). São Paulo: ANEPAC.
- VALVERDE, F. M. (2001). *Agregados para construção civil-Balanço Mineral Brasileiro*. Belém: SIMINERAL, Sindicato das indústrias minerais do Estado do Pará.
- YAZGAN, S., BERNREUTHER, A., ULBERTH, F., ISENGARD, D. (2005). Water- an important parameter for the preparation and proper use of certified reference materials. *Food Chemistry*.