

DIEGO HALTIERY DOS SANTOS

ORIENTADOR: RICARDO ANDRÉ FIOROTTI PEIXOTO

**SUBSTITUIÇÃO TOTAL DO AGREGADO  
NATURAL POR QUARTZITO FRIÁVEL PARA  
PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE  
ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO**

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

Março de 2015

S596e

Santos, Diego Haltiery.

Substituição total do agregado natural por quartzito friável para produção de argamassas mistas de assentamento e revestimento [manuscrito] / Diego Haltiery Santos. - 2015.

128f.: il.: color; graf.; tabs; mapas.

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.

Área de Concentração: Estrutura Metálica.

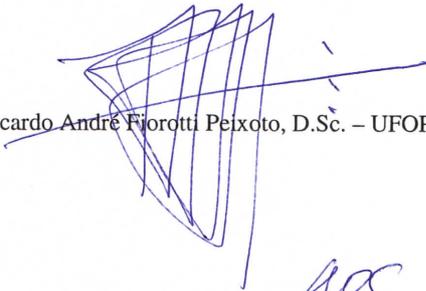
1. Quartzito. 2. Mineração. 3. Argamassas. 4. Sustentabilidade. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 691.53:502.174.

**SUBSTITUIÇÃO TOTAL DO AGREGADO NATURAL POR  
QUARTZITO FRIÁVEL PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS MISTAS  
DE ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO**

**AUTOR: DIEGO HALTIERY DOS SANTOS**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 06 de março de 2015, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

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

  
Prof. Guilherme Jorge Brigolini Silva, D.Sc. – UFOP

  
Prof. Leonardo Gonçalves Pedroti, D.Sc. – UFV

*Aos meus pais Nirton e Edna.*

# Agradecimentos

À Deus por sempre guiar o meu caminho, orientar minhas decisões e por conceder saúde, força e perseverança para completar todas as minhas tarefas.

Aos meus pais Nirton e Edna, por serem os meus primeiros mestres, me ensinarem as maiores lições em minha vida e por serem minha fonte de orgulho e inspiração.

Agradeço ao Prof. Ricardo Fiorotti pelo incrível aprendizado, não somente acadêmico mas também pessoal e profissional ao longo de todos os anos em que trabalhamos juntos. Ao Prof. Guilherme Brigolini, co-orientador deste trabalho, pelas fundamentais contribuições.

À Thais pelo apoio, incentivo, paciência e carinho dedicados todos os dias que, sem dúvida, fizeram o meu caminho ser mais prazeroso de se trilhar.

Ao grupo de Pesquisas em Resíduos Sólidos Industriais (Reciclos) e seus membros pelo auxílio e aprendizado. Em especial ao Rodrigo Toffolo e Júnio por serem verdadeiros companheiros nesta jornada. A Thamires pela paciência e prestatividade em me auxiliar.

Agradeço a Anex Mineração pelo fornecimento do material e pela oportunidade em estudá-lo. Às empresas Cimentos Tupi e Ical pelas caracterizações dos produtos.

Aos laboratórios: Laboratório de Difração de Raio X do Departamento de Geologia da Escola de Minas/UFOP; Laboratório de Bio&Hidrometalurgia do Departamento de Metalurgia da Escola de Minas/UFOP; Laboratório NanoLab do Departamento de Metalurgia da Escola de Minas/UFOP; e seus coordenadores, técnicos e bolsistas pelo apoio na realização dos ensaios.

E por fim agradeço ao PROPEC e seus professores pelos ensinamentos e à CAPES pelo apoio financeiro.

# Resumo

O setor da construção civil é responsável por um consumo elevado de recursos naturais não renováveis, e associado ao crescimento acelerado do mercado impacta diretamente no aumento da demanda desses recursos necessários à construção, bem como no aumento de seus custos e na redução de suas reservas. Faz-se necessário então a busca por melhores soluções ambientais e sociais onde o quartzito friável pode ser inserido. Deste modo, este trabalho apresenta uma alternativa para a utilização do estéril da mineradora de quartzito, na região central de Minas Gerais, para produção de argamassas de assentamento e revestimento de alvenarias. Neste contexto é necessária uma verificação da viabilidade técnica das argamassas propostas por meio da realização de ensaios laboratoriais, procedidos de acordo com normatizações brasileiras e internacionais, como também, uma análise ambiental e comercial para replicação dos resultados em escala de produção. Para melhor caracterização do estéril de quartzito friável foram realizadas análises físicas, químicas, microestruturais e ambientais. Os traços utilizados foram 1:1:6 (cimento:cal:agregado miúdo) e 1:2:9 (cimento:cal:agregado miúdo) para a produção de argamassas de revestimento e assentamento, respectivamente, obedecendo sempre a proporção de 1:3 (aglomerantes: agregados), utilizando como agregados uma areia natural de rio e duas amostras de quartzito friável provenientes de jazidas distintas da mesma mineradora. Em sequência, as argamassas foram submetidas a ensaios nos estados fresco e endurecido para classificação de suas propriedades comparando os resultados obtidos com os diferentes tipos de agregados. Os resultados indicam a viabilidade e adoção deste material como agregado miúdo em substituição total ao agregado natural e que seu uso poderá não só diminuir o impacto ambiental das minerações, mas também possibilitará o atendimento às demandas e a valorização deste material para uso na construção civil.

Palavras chave: quartzito friável, mineração de quartzito, estéril, argamassas, sustentabilidade.

# Abstract

The construction industry is responsible for a high consumption of non-renewable natural resources, and associated with rapid growth of the market, has a direct impact on increasing demand for these resources required for building, as well as increasing their costs and reducing their reserves. Then it is necessary to search for better environmental and social where friable quartzite can be inserted solutions. Thus, this paper present an alternative to the use of sterile of mining quartzite, in the central region of Minas Gerais, for production of cement mortar and masonry coating. In this context is necessary the verification of technical feasibility of mortars proposals by conducting laboratory tests, proceeded in accordance with Brazilian and international norms, as well as, an environmental and commercial analysis for replication of results in production scale is required. To better characterize the sterile friable quartzite, chemical, mineralogical, microstructural and physical environmental analysis was conducted. The proportions used were 1:1:6 (cement:lime:fine aggregate) and 1:2:9 (cement:lime:fine aggregate) in mortars production for nesting and covering mansory, respectively, always obeying the ratio of 1:3 (binders: aggregates), using aggregates as a natural river sand and two samples of friable quartzite from different fields in the same mining. In sequence, the mortars was submitted tests on fresh and hardened estate to classification their properties comparing the results obtained with the different types of aggregates. The results indicate the feasibility and adoption of this material as fine aggregate in total replacement of natural aggregate and your application may not only reduce the environmental impact of mining, but also enable the meeting the demand and the recovery of this material for use in civil construction.

Keywords: friable quartzite, mining quartzite, sterile, mortars, sustainability.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Justificativa . . . . .	3
1.2	Objetivos . . . . .	5
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	5
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>7</b>
2.1	Estado da Arte . . . . .	7
2.2	Classificações das Argamassas . . . . .	10
2.3	Dosagem das Argamassas . . . . .	11
2.4	Propriedades das Argamassas . . . . .	14
2.4.1	Trabalhabilidade . . . . .	14
2.4.2	Plasticidade . . . . .	15
2.4.3	Consistência . . . . .	15
2.4.4	Incorporação de Ar . . . . .	16
2.4.5	Retenção de Água . . . . .	17
2.4.6	Resistência Mecânica . . . . .	18
2.4.7	Elasticidade . . . . .	19
2.4.8	Durabilidade . . . . .	21
2.4.9	Reações Álcalis-Agregados . . . . .	23
2.5	Influência dos Agregados nas Propriedades da Argamassa . . . . .	27
2.6	Caracterização Química . . . . .	31
2.6.1	Fluorescência de raios X . . . . .	31
2.6.2	Espectrofotometria por absorção atômica . . . . .	32
2.6.3	Difração de raios X . . . . .	32
2.7	Quartzito . . . . .	33

2.7.1	Quartzito Duro . . . . .	33
2.7.2	Quartzito Friável . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>36</b>
3.1	Materiais . . . . .	37
3.1.1	Cimento . . . . .	37
3.1.2	Cal . . . . .	38
3.1.3	Areia Natural . . . . .	39
3.1.4	Quartzito Friável . . . . .	40
3.2	Metodologia . . . . .	43
3.2.1	Caracterização Física das Amostras . . . . .	43
3.2.2	Dosagem das Argamassas . . . . .	49
3.2.3	Produção e Moldagem das Argamassas . . . . .	50
3.2.4	Condições de Cura . . . . .	51
3.2.5	Caracterização das Argamassas no Estado Fresco . . . . .	52
3.2.6	Caracterização das Argamassas no Estado Endurecido . . . . .	55
3.2.7	Caracterização Química das Amostras . . . . .	63
3.2.8	Caracterização Ambiental das Amostras . . . . .	65
3.2.9	Caracterização Morfológica . . . . .	65
3.2.10	Análise Qualitativa da Viabilidade Econômica . . . . .	66
<b>4</b>	<b>Análise e Discussão dos Resultados</b>	<b>67</b>
4.1	Distribuição Granulométrica . . . . .	67
4.2	Teor de Material Pulverulento . . . . .	69
4.3	Impurezas Orgânicas . . . . .	70
4.4	Inchamento do Agregado Miúdo . . . . .	71
4.5	Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis . . . . .	71
4.6	Teor de Umidade Total . . . . .	72
4.7	Massa Específica . . . . .	73
4.8	Massa Unitária . . . . .	74
4.9	Fator Água/Aglomerante e Índice de Consistência . . . . .	75
4.10	Retenção de Água das Argamassas . . . . .	77
4.11	Densidade de Massa no Estado Fresco . . . . .	78
4.12	Teor de Ar Incorporado . . . . .	79
4.13	Absorção de Água por Capilaridade . . . . .	80

4.14	Densidade de Massa no Estado Endurecido . . . . .	81
4.15	Resistência à Tração na Flexão . . . . .	82
4.16	Resistência à Compressão . . . . .	83
4.17	Módulo de Elasticidade Estático . . . . .	84
4.18	Módulo de Elasticidade Dinâmico . . . . .	85
4.19	Expansibilidade por Método Acelerado . . . . .	86
4.20	Fluorescência de Raios X . . . . .	88
4.21	Espectrofotometria por Absorção Atômica . . . . .	89
4.22	Difração de Raios X . . . . .	89
4.23	Morfologia dos Agregados e das Argamassas . . . . .	90
4.24	Análise Ambiental . . . . .	93
4.25	Análise Qualitativa da Viabilidade Econômica . . . . .	94
<b>5</b>	<b>Conclusões e Considerações finais</b>	<b>97</b>
5.1	Conclusões . . . . .	97
5.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	100
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>101</b>

# Lista de Figuras

2.1	Classificação das Argamassas . . . . .	10
2.2	Módulos de elasticidade estático . . . . .	21
2.3	Desenvolvimento das reações álcali-agregados . . . . .	23
2.4	Microscopia ótica de partículas de areia . . . . .	31
2.5	Impacto ambiental relacionado a extração do quartzito duro . . . . .	35
3.1	Fluxograma da metodologia adotada . . . . .	36
3.2	Agredo miúdo natural . . . . .	39
3.3	Jazidas de quartzito friável . . . . .	40
3.4	Agregado miúdo proveniente da jazida 1 de quartzito . . . . .	42
3.5	Agregado miúdo proveniente da jazida 2 de quartzito . . . . .	42
3.6	Frações do quartzito retidas e passantes na peneira de 0,075mm . . . . .	43
3.7	Peneirador para agregados miúdos . . . . .	44
3.8	Ensaio de teor de material pulverulento . . . . .	45
3.9	Substância padrão para ensaio de impurezas orgânicas . . . . .	45
3.10	Preparação das amostras para ensaio de inchamento . . . . .	46
3.11	Determinação da umidade crítica e coeficiente de inchamento . . . . .	47
3.12	Determinação da massa específica . . . . .	48
3.13	Determinação da massa unitária . . . . .	49
3.14	Preparação e moldagem dos corpos de prova de argamassa . . . . .	50
3.15	Corpos de prova de argamassa . . . . .	51
3.16	Câmara úmida portátil . . . . .	51
3.17	Determinação do índice de consistência das argamassas . . . . .	52
3.18	Determinação da retenção de água das argamassas . . . . .	53
3.19	Determinação da densidade de massa no estado fresco . . . . .	54
3.20	Procedimentos para obtenção do teor de ar incorporado . . . . .	55
3.21	Determinação da absorção de água por capilaridade . . . . .	56

3.22	Determinação da densidade de massa no estado endurecido . . . . .	57
3.23	Ensaio para resistência à tração na flexão . . . . .	58
3.24	Ensaio para resistência à compressão . . . . .	59
3.25	Realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico . . . . .	59
3.26	Representação esquemática do ciclo de carregamento . . . . .	60
3.27	Determinação do módulo de elasticidade estático . . . . .	62
3.28	Procedimentos determinação da expansibilidade das argamassas . . . . .	63
3.29	Moinho de alta eficiência para preparação de amostras . . . . .	64
3.30	Análise morfológica dos agregados e das argamassas . . . . .	66
4.1	Distribuição granulométrica dos agregados miúdos . . . . .	67
4.2	Teor de material pulverulento dos agregados . . . . .	69
4.3	Impurezas orgânicas das amostras . . . . .	70
4.4	Teor de torrões de argila e partículas friáveis . . . . .	72
4.5	Teor de umidade total dos agregados . . . . .	73
4.6	Massa específica dos agregados . . . . .	74
4.7	Massa unitária dos agregados . . . . .	75
4.8	Fator água/aglomerante das argamassas . . . . .	75
4.9	Índice de consistência das argamassas . . . . .	76
4.10	Retenção de água das argamassas . . . . .	77
4.11	Densidade de massa no estado fresco . . . . .	78
4.12	Teor de ar incorporado nas argamassas . . . . .	79
4.13	Absorção de água por capilaridade . . . . .	80
4.14	Coefficiente de capilaridade . . . . .	80
4.15	Densidade de massa no estado endurecido . . . . .	81
4.16	Resistência à tração na flexão . . . . .	82
4.17	Resistência à compressão . . . . .	83
4.18	Diagrama Tensão x Deformação para as argamassas . . . . .	84
4.19	Modulo de elasticidade dinâmico . . . . .	85
4.20	Expansibilidade por método acelerado (ataque químico) . . . . .	86
4.21	Superfícies das argamassas após o ensaio de ataque químico . . . . .	87
4.22	Espectrofotometria por absorção atômica . . . . .	89
4.23	Difração de raios X dos agregados de quartzito friável . . . . .	90
4.24	Morfologia dos agregados . . . . .	91
4.25	Microestrutura das argamassas de assentamento . . . . .	92

4.26	Microestrutura das argamassas de revestimento . . . . .	93
4.27	Habitação de Interesse Social usada para análise econômica . . . . .	94
4.28	Custo comparativo na produção das argamassas . . . . .	95

# Lista de Tabelas

1.1	Consumo de agregados no Brasil . . . . .	4
2.1	Variação das propriedades das argamassas com o teor de aglomerantes . . . . .	9
2.2	Classificação das argamassas segundo norma brasileira . . . . .	11
2.3	Consumo de cimento em Kg por $m^3$ de argamassa . . . . .	13
2.4	Influência das características granulométricas nas argamassas . . . . .	29
2.5	Composição química do quartzito duro . . . . .	34
3.1	Propriedades químicas do cimento CP II F 32 . . . . .	37
3.2	Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II F 32 . . . . .	38
3.3	Propriedades físicas da Cal Hidratada CHI . . . . .	38
3.4	Propriedades químicas da Cal Hidratada CHI . . . . .	39
3.5	Classificação dos quartzitos utilizados . . . . .	41
3.6	Dosagem das argamassas . . . . .	50
4.1	Dimensão máxima característica e módulo de finura das amostras . . . . .	68
4.2	Umidade crítica e teor de inchamento dos agregados miúdos . . . . .	71
4.3	Fluorescência de raios X das amostras . . . . .	88
4.4	Preço médio dos insumos para construção civil . . . . .	95

# Lista de Siglas e Símbolos

ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Const. Civil
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma MERCOSUL
ASTM	Association Standard Test Method
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
FEAM	Federação Estadual do Meio Ambiente
RAA	Reações de álcalis-agregados
MF	Módulo de finura
DMC	Dimensão máxima característica
Eci	Módulo de elasticidade tangente à origem ou inicial
fc	Resistência característica do concreto ou argamassa
Ecs	Módulo de elasticidade secante
Ecordal	Módulo de elasticidade cordal
FRX	Fluorescência de raios X
DRX	Difração de raios X
EAA	Espectrofotometria por absorção atômica
TQ1R	Argamassa de revestimento produzida com quartzito friável da jazida 1
TQ2R	Argamassa de revestimento produzida com quartzito friável da jazida 2
TNR	Argamassa de revestimento produzida com agregado natural
TNA	Argamassa de assentamento produzida com agregado natural
TQ1A	Argamassa de assentamento produzida com quartzito friável da jazida 1
TQ2A	Argamassa de assentamento produzida com quartzito friável da jazida 2
Q1A	Quartzito friável da jazida 1 na fração areia
Q2A	Quartzito friável da jazida 2 na fração areia

AN	Agregado Natural
Q1	Quartzito friável da jazida 1
Q2	Quartzito friável da jazida 2
HIS	Habitação de Interesse social

# Capítulo 1

## Introdução

Os agregados normalmente utilizados para produção de argamassas são areias silicosas naturais, extraídas de leitos de rios, encostas ou resultantes de subprodutos da exploração e britagem de rochas.

A exploração de areia realizada nos leitos de rios e em outros ambientes de sedimentação pode trazer sérios impactos ambientais em decorrência da retirada da cobertura vegetal nas áreas a serem lavradas, causando assoreamento nos rios e degradação do curso d'água que provocam alterações dos regimes de escoamento dos rios nos centros urbanos gerando prejuízos sociais e econômicos. Outros fatores podem ser citados como: destruição de cadeias biológicas (fauna e flora), alterações climáticas, turbidez das águas, aumento da velocidade do curso d'água, alterações topográficas, rebaixamento do lençol freático, dentre outros (Pfaltzgraff, 1994). Como forma de minimizar esses efeitos e tornar a atividade extrativa menos prejudicial, órgãos ambientais tem intensificado ações de controle e fiscalização sobre os locais de extração.

O consumo de matérias primas, fontes de recursos não renováveis, essenciais para os processos da construção civil crescem em ritmo acelerado em função do crescimento da economia e do aumento populacional. A construção civil é um dos setores que provoca maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de matéria-prima. De acordo com a Associação Nacional de Entidade Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC (2012)) a construção civil é responsável pelo consumo de entre 15 e

50% dos recursos naturais extraídos, 40% da energia consumida e 16% da água potável.

De acordo com ANEPAC (2014), o consumo de areia está dividido em: 35% argamassas, 20% concretiras, 15% construtoras, 10% pré fabricados, 10% revendedores, 5% pavimentadores e 5% outros. Outro dado relevante é que para a construção de uma casa popular são consumidos 68 toneladas de agregados para cada  $50m^2$  de construção sendo, aproximadamente, 42 toneladas só de areia (IBRAM, 2012).

Muitos resíduos tem sido estudados com o intuito de contribuir com à redução dos impactos ambientais associados a exploração de agregados naturais para produção de matrizes cimentícias, como argamassas e concretos. Como exemplos citam-se: Barros (2013) que utilizou rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária; Fontes (2013) que substituiu agregados naturais por rejeito de minério de ferro para produção de argamassas; Januzzi (2014) que estudou o comportamento de blocos e prismas produzidos com escória de aciaria elétrica em substituição aos agregados naturais através de modelagem, Peixoto et al. (2011) que estudaram o uso do resíduo de manta cerâmica para fabricação de argamassas, Peixoto et al. (2008b) que utilizaram escória de aciaria para fabricação de argamassas, Peixoto et al. (2008a) que estudaram a produção de concretos utilizando escória de aciaria como agregados.

Souza (2008) cita outros trabalhos publicados e os resíduos que estão sendo estudados com o intuito de serem empregados na construção civil: fibras de coco e de sisal (Souza, 1993); etileno vinil acetato (Silva e Kahn, 2003); bambu (Braga Filho, 2004); entulho de construção civil (Bavaresco, 2001); sucatas de vidro (Santos et al., 2006).

Os agregados, areia e brita, são recursos minerais de baixo valor agregado porém, utilizados em grandes volumes nas construções civis o que torna seus custos expressivos. O frete é um dos principais itens que afetam os custos dos materiais, podendo representar cerca de 40% do preço final, obrigando os produtores de agregados a operar o mais próximo possível dos centros consumidores (Almeida e Luz, 2009).

Na região metropolitana da capital mineira, Belo Horizonte, existe uma alta demanda por recursos minerais para utilização como agregados no setor da construção civil sendo o estado mineiro o segundo maior consumidor de agregados em todo o país.

Nessa região está localizada uma jazida de estéril de quartzito que apresenta potencial para abastecer toda a região com agregados miúdos, que poderiam substituir as areias convencionalmente usadas nas construções, que estão cada vez mais escassas, devido a elevada extração e por se tratar de um bem não renovável, e mais caras devido ao aumento na distância até os grandes centros urbanos.

## 1.1 Justificativa

Aspecto importante dentro do contexto ambiental é a legislação, que estabelece critérios para que a produção não venha a provocar danos significativos ao meio ambiente como os ocasionados pela extração de agregados para construção civil. A fim de conquistar um mercado global cada vez mais preocupado com questões relacionadas ao manejo de resíduos e estéréis gerados em seus processos, as empresas vêm investindo cada vez mais em equipamentos, pesquisa, desenvolvimento e treinamentos para eliminar a cultura do desperdício e consolidar a cultura da redução de perdas, reciclagem e reutilização minimizando o consumo de recursos minerais não renováveis.

O setor da construção civil precisa ser mais racional, econômico e produzido com materiais que reduzam as perdas, otimizem os processos, reduzam os entulhos e, principalmente, que causem menores impactos ambientais embora construir de forma sustentável ainda é um grande desafio.

O uso de resíduos além das vantagens de sustentabilidade podem também proporcionar diminuição energética da exploração, redução de transportes e custos de manutenção dos resíduos configurando-se em uma oportunidade técnica, ambiental e econômica. Embora o quartzito friável não seja um resíduo, pois não sofreu nenhum processo de beneficiamento, este material apresenta potencialidade para substituir os agregados naturais nas atividades da construção civil promovendo os mesmos benefícios do uso dos resíduos sólidos. Notoriamente temos ainda a demanda por habitações de interesse social, produzidas com baixos custos, que proporciona a utilização de materiais de construção a custos inferiores, viabilizando o uso de resíduos sólidos desde que a qualidade dos materiais sejam garantidas.

O consumo de agregados naturais varia entre 1 e 8 toneladas/habitante por ano. No Brasil o consumo de agregados em 2011 foi de 3,5 t/habitante com um aumento de 6% em relação ao ano anterior (IBRAM, 2012). No entorno das cidades, agregados naturais tornam-se escassos, devido ao crescente controle ambiental da extração das matérias primas, o que eleva o seu custo e onera o processo de engenharia.

Segundo dados IBRAM (2012), a região sudeste é responsável pelo consumo de 48,10% destes recursos onde o estado de Minas Gerais é o segundo maior consumidor de agregados para construção civil (71 milhões), superando o estado do Rio de Janeiro (62 milhões) e perdendo apenas para o Estado de São Paulo (177 milhões). Os dados de todas as regiões brasileiras estão ilustrados na Tabela 1.1 a seguir.

**Tabela 1.1.** Consumo de agregados no Brasil

<b>Regiões</b>	<b>Consumo (10<sup>6</sup> t)</b>	<b>Consumo (%)</b>
<b>Norte</b>	46,00	6,83
<b>Nordeste</b>	135,52	20,11
<b>Centro Oeste</b>	58,51	8,68
<b>Sul</b>	109,67	16,28
<b>Sudeste</b>	324,04	48,10
<i>São Paulo</i>	<i>177,16</i>	<i>26,30</i>
<i>Minas Gerais</i>	<i>71,08</i>	<i>10,55</i>
<i>Rio de Janeiro</i>	<i>61,93</i>	<i>9,19</i>
<i>Espírito Santo</i>	<i>13,88</i>	<i>2,06</i>
<b>Brasil</b>	<b>673,74</b>	<b>100</b>

Fonte: Adaptado ANEPAC (2012)

Os agregados, basicamente areia e pedra britada, são as substâncias mais consumidas no Brasil. Em 14 anos, a demanda por agregados da construção civil partiu de 460 milhões de toneladas (1997) para aproximadamente 674 milhões de toneladas (2011) embora a produção de agregados alcançasse, neste mesmo ano a marca de 469 milhões de toneladas (ANEPAC, 2012).

O crescimento da demanda foi de 46,3% sendo este setor um dos poucos que não sentiu o impacto das crises internacionais de 2008/09 e 2011/12 e a perspectiva de consumo é ainda maior. Existe uma projeção no aumento do consumo de agregados até o ano de 2022, atingindo o significativo valor de 1,12 bilhões de toneladas para os próximos 8 anos.

O aumento das demandas por produtividade e sustentabilidade, associados a necessidade de mercado e desenvolvimento tecnológico, induziram nos últimos anos um aumento do consumo de resíduos aplicados na construção civil.

Considerando o elevado consumo de materiais naturais não renováveis e a necessidade de novas alternativas para sua demanda, este trabalho pretende contribuir para a sustentabilidade do setor da construção civil, sugerindo a produção de argamassas mistas, aplicadas como elementos de assentamento e revestimento de alvenarias, produzidas com quartzito friável em substituição total aos agregados naturais.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é estudar a viabilidade técnica, ambiental e econômica da utilização do quartzito friável em substituição total aos agregados miúdos convencionalmente utilizados na produção de argamassas mistas de assentamento e revestimento de alvenarias, segundo parâmetros normativos estabelecidos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicamente, quimicamente, morfológicamente e ambientalmente o estéril de quartzito;
- Dimensionar composições para os traços de argamassa mistas para revestimento e assentamento de alvenarias, obtidas da substituição total dos agregados naturais pelo estéril de quartzito friável comparativamente aquelas produzidas com agregados naturais;

- 
- Determinar as propriedades das argamassas mistas no estado fresco (determinação do índice de consistência, da retenção de água, da densidade de massa e do teor de ar incorporado) comparativamente aquelas produzidas com agregados naturais;
  - Determinar as propriedades das argamassas no estado endurecido (determinação da densidade de massa aparente, da resistência à tração na flexão, da resistência a compressão e tração simples, da resistência de aderência à tração, da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade) comparativamente aquelas produzidas com agregados naturais;
  - Caracterizar o comportamento mecânico das argamassas mistas produzidas (compressão e tração na flexão) comparativamente aquelas produzidas com agregados naturais;
  - Determinar a viabilidade técnica e ambiental e indicar, qualitativamente, a viabilidade econômica das argamassas mistas de assentamento e revestimento produzidas com quartzito friável;
  - Disponibilizar informações relacionadas ao quartzito friável e quanto à viabilidade do seu uso como agregado na produção de elementos para construção civil.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Estado da Arte

As argamassas recebem diversos tipos de classificações conforme sua aplicação ou constituição. As argamassas utilizadas para assentamento e revestimento de alvenarias e tetos apresentam características diferentes das exigidas nas argamassas dos concretos embora os materiais que dão origem às argamassas e aos concretos sejam equivalentes.

No concreto a função primária da argamassa é unir os componentes agindo como adesivo e selante enquanto as argamassas de assentamento e revestimento têm como objetivo desenvolver uma aderência resistente e durável entre os elementos da alvenaria (Cincotto et al., 1995).

A argamassa de assentamento tem uma influência crítica no desempenho funcional de uma parede de alvenaria pois sua principal função é unir as unidades de alvenaria, blocos cerâmicos e de concreto, construindo uma estrutura monolítica enquanto que as argamassas de revestimento desempenham a função de estanqueidade e durabilidade gerando conforto aos usuários.

As argamassas passaram por muitas modificações ao longo de sua história. De acordo com Duarte (2007) a origem das argamassas surge de uma necessidade básica do ser humano para sua proteção e conforto como a construção de abrigos datando o seu aparecimento há 1000 anos a.C..

As argamassas até chegarem ao estado de uso hoje passaram por diversas evoluções que acompanharam os marcos da nossa história como a descoberta do fogo e posteriormente os fornos que permitiram a calcinação das pedras calcárias desenvolvendo a cal virgem e posteriormente a cal hidratada e descoberta do gesso (Pinto e Gomes, 2006).

A civilização Romana foi outro grande marco no desenvolvimento das argamassas devido ao aproveitamento de materiais pozolânicos como as cinzas vulcânicas ricas em sílica e alumina como também pela introdução de novos materiais como areias, cerâmicas moídas, cal hidratada e matérias orgânicas como gorduras animais com o intuito de aumentar sua resistência mecânica e garantir condições de hidraulicidade (Ribeiro e Lopes, 2007).

As argamassas até então eram produzidas com cal, gesso e pozolanas mas em 1824 o inglês Joseph Aspdin patenteou o processo de fabricação do cimento Portland introduzindo este ligante hidráulico, cujas fábricas espalharam-se pela Europa, que substituiu a cal hidráulica e a cal hidratada como ligante nas obras de construção civil (Alvarez et al., 2005).

Segundo Sabbatini (1986), em função do maior módulo de finura (maior retenção de água e maior trabalhabilidade) e endurecimento mais lento (maior resiliência) os cimentos fabricados com teores de materiais pozolânicos mais elevados produzem argamassas com propriedades otimizadas.

Segundo Westphal (2004) a argamassa possuiu a ser usada no Brasil no primeiro século para assentamento de alvenarias de pedra amplamente realizadas na época. Para isso a cal utilizada nas argamassas era obtida pela queima de conchas e mariscos e o óleo da baleia também servia como aglomerante.

Hoje para a produção de argamassas mistas a cal é adicionada em substituição ao cimento Portland, melhorando a trabalhabilidade, retenção de água, plasticidade e resiliência mas piorando as demais propriedades.

A comercializada da cal como aglomerante para a construção civil necessita de um processo de beneficiamento que consiste basicamente na moagem da matéria prima, o carbonato de cálcio, que após a calcinação libera gás carbônico formando o óxido de

cálcio (conhecido como cal virgem). Este material passa por um processo de extinção ou hidratação permanecendo submerso em água, por período de tempo adequado, para que o óxido de cálcio se recombine com água produzindo o hidróxido de cálcio denominado como cal extinta ou hidratada sendo esta a forma mais comercializada para uso nas argamassas.

Conhecendo os materiais aglomerantes e suas características é possível correlacionar as variações de seus teores com as propriedades das argamassas. A Tabela 2.1 a seguir, ilustra a variação nas propriedades de uma argamassa com a alteração na proporção de aglomerantes.

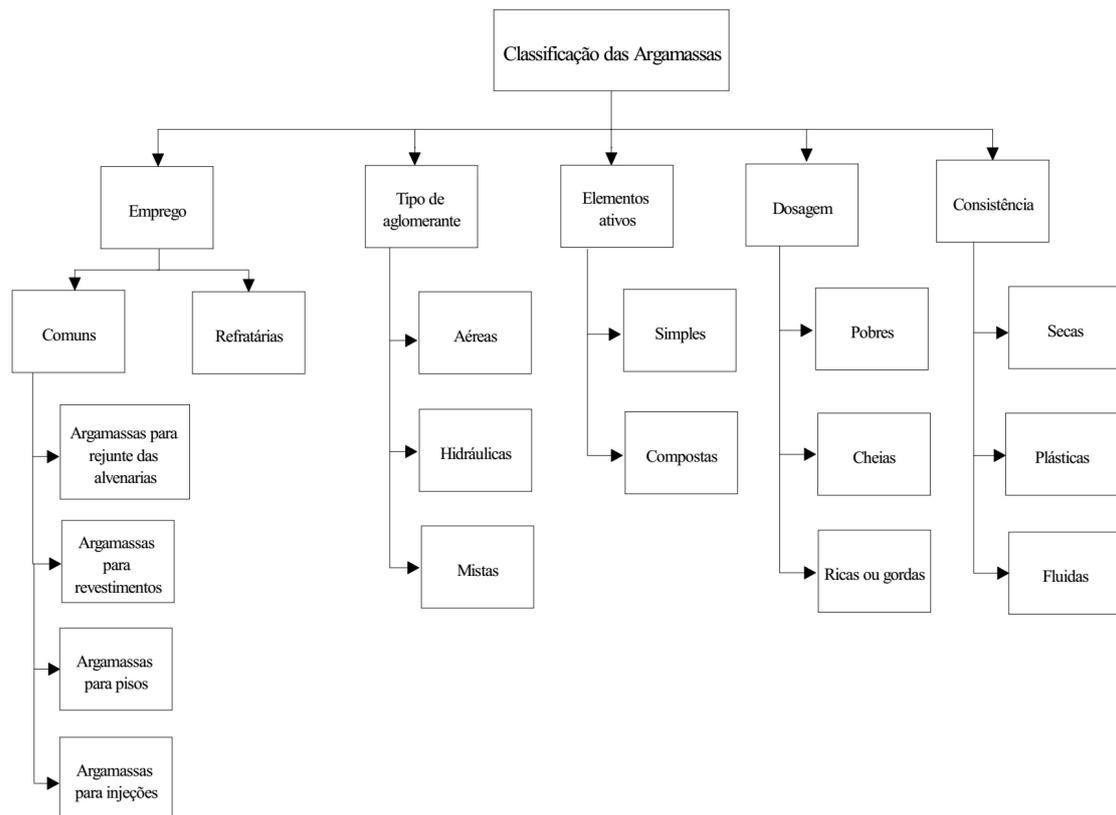
**Tabela 2.1.** Variação das propriedades das argamassas com o teor de aglomerantes

Propriedades	Aumento na proporção de cal no cimento	
Resistência à compressão	Decresce	Propriedades melhoradas com maior teor de cimento
Resistência à tração	Decresce	
Aderência	Decresce	
Durabilidade	Decresce	
Impermeabilidade	Decresce	
Resistência à alta temperatura	Decresce	
Resistências iniciais	Cresce	
Retração na secagem inicial	Cresce	Propriedades melhoradas com maior teor de cal
Retenção de água	Cresce	
Plasticidade	Cresce	
Trabalhabilidade	Cresce	
Resiliência	Cresce	
Módulo de elasticidade	Decresce	
Retração na secagem reversível	Decresce	
Custo	Decresce	

Fonte: Sabbatini (1986)

## 2.2 Classificações das Argamassas

As argamassas tem aplicações diversificadas sendo utilizadas em diferentes locais com funções e características específicas para cada uso. Petrucci (1980) criou uma classificação, ilustrada na Figura 2.1 a seguir, para as argamassas.



**Figura 2.1.** Classificação das Argamassas

Fonte: Petrucci (1980)

Além das argamassas classificadas por Petrucci (1980) podemos incorporar as argamassas classificadas quanto a função do revestimento (chapisco, emboço, emboço paulista, reboco e monocamada); as classificadas quanto a forma de preparo (dosadas em central, preparadas em obra, industrializadas e semi-prontas) e quanto aos tipos especiais (uso de aditivos que melhoraram a trabalhabilidade e retenção de água ou as colantes, hidrófugas, de proteção radiológica e redutora de permeabilidade).

Outra forma de classificar as argamassas é segundo parâmetros e limites estabelecidos na norma brasileira ABNT - NBR13281 (2005) que estabelece exigências mecânicas e reológicas para as argamassas. Esta norma avalia sete parâmetros: resistência à compressão (P) ; densidade de massa no estado endurecido (M); resistência à tração na flexão (R); coeficiente de capilaridade (C); densidade de massa no estado fresco (D); retenção de água (U) e resistência potencial de aderência à tração (A). Os limites e classificações podem ser visualizados na Tabela 2.2 a seguir.

**Tabela 2.2.** Classificação das argamassas segundo norma brasileira

Classes	<b>P</b>	<b>M</b>	<b>R</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>U</b>	<b>A</b>
	<b>MPa</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>MPa</b>	<b>g/dm<sup>2</sup>/min<sup>1/2</sup></b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>%</b>	<b>MPa</b>
1	≤ 2,0	≤ 1200	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1400	≤ 78	≤ 0,20
2	1,5 a 3,0	1000 a 1400	1,0 a 2,0	1,0 a 2,5	1200 a 1600	72 a 85	≥ 0,20
3	2,5 a 4,5	1200 a 1600	1,5 a 2,7	2,0 a 4,0	1400 a 1800	80 a 90	≥ 0,30
4	4,0 a 6,5	1400 a 1800	2,0 a 3,5	3,0 a 7,0	1600 a 2000	86 a 94	-
5	5,5 a 9,0	1600 a 2000	2,7 a 4,5	5,0 a 12,0	1800 a 2200	91 a 97	-
6	> 8,0	> 1800	> 3,5	> 10,0	> 2000	95 a 100	-

Fonte: ABNT - NBR13281 (2005)

## 2.3 Dosagem das Argamassas

Dosar uma argamassa significa encontrar a proporção ideal de cada material afim de atender todas as características desejáveis de acordo com a finalidade a que se propõe e que seja, ainda, não onerosa para viabilizar seu uso no setor da construção civil.

A escolha dos materiais bem como o seu correto dimensionamento são fatores que interferem diretamente no desempenho das argamassas e para cada finalidade a que se propõem, as dosagens sofrem alterações para adequar suas características. De forma geral, a composição e a dosagem das argamassas adotadas no Brasil são feitas com base em traços (massa ou volume), descritos ou especificados em normas internacionais

ou nacionais, como Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT). Santos (2014) apresenta diversas metodologias para dosagem de argamassas apresentas a seguir:

- Selmo (1989): consiste em dosar o teor ótimo de material plastificante. É um método experimental para obter a quantidade mínima de material fino capaz de plastificar a argamassa e a mínima quantidade de água necessária para obter a fluidez adequada montando curvas de correlação entre os materiais.
- Selmo e Heleno (1991): é uma evolução do método anteriormente descrito mas ainda experimental com a montagem de curvas de correlação entre os teores de materiais envolvidos no processo avaliando as propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido.
- Lara et al (1995): é um método matemático que correlaciona as propriedades dos agregados (como módulo de finura, massa específica e massa unitária), definindo limite para o teor de finos (em função da aderência desejada), a fluidez (em função do índice de consistência) e a quantidade de água necessária obtendo o consumo de cimento e cal sendo adequado para argamassas mistas.
- Carneiro e Cincotto (1999): os autores perceberam que ao variar a granulometria do agregado podia-se aumentar o teor de finos inertes e substituí-los ao cimento Portland sem que fosse necessário um aumento do teor de água correlacionando a curva granulométrica dos agregados miúdos com um aumento na eficiência das argamassas.
- Rede Simplex: é um modelamento matemático proposto que fornece um conjunto de traços que norteiam as características desejadas no estado fresco e endurecido. Fornece apenas traços próximos ao que se deseja sendo necessário ajustes experimentais para a definição do traço final a ser utilizado. Vários autores, citados por Santos (2014), como Dastefani e Holanda (2011) e Bahiense et al (2008) utilizaram este método para incorporação de resíduos identificando grande eficiência no método.

- Gomes e Neves (2002): este método, baseado no usos de plastificantes, fixa o teor máximo de finos (partículas menores que 0,075mm) dos agregados em 7%; a relação plastificante/agregados em 35%; teor de ar incorporado entre 8 e 17%; retenção de água acima de 75% ; índice de consistência entre 150 - 170mm e consumo de cimento conforme dados da Tabela 2.3 mostrada a seguir baseados na aplicação das argamassas.

**Tabela 2.3.** Consumo de cimento em Kg por  $m^3$  de argamassa

Tipos de argamassa	Uso ou aplicação	
	Interno	Externo
Assentamento de blocos	150-180	160-190
Chapisco (sem adição)	380-430	410-470
Emboço	160-180	180-210
Reboco	160-170	170-190
Camada única	160-180	180-210
Base para cerâmica	180-210	190-220
Base para laminado	210-240	-
Assentamento	250-350	250-350

Fonte: Gomes e Neves (2002) citado por Santos (2014)

De acordo com Carneiro e Cincotto (1999) usualmente as composições e dosagens de argamassas adotadas no Brasil são feitas com base em traços, dosados em massa ou volume, especificados em normas nacionais e internacionais adotando-se para argamassas de revestimento 1:1:6 (cimento:cal:areia) e para argamassas de assentamento 1:2:9.

Martins Neto e Djanikian (1999) estudaram vários traços normalmente aplicados em argamassas misturas em obra e traços de argamassas dosadas em central para assentamento de alvenarias e concluíram que o traço 1:2:9 (cimento: cal: areia) feito em obras apresenta características desejáveis.

Segundo Sabbatini (1986), a proporção 1:3 (aglomerante: agregado) garante que os vazios do agregado miúdo sejam preenchidos pela pasta aglomerante e assim, a trabalhabilidade fica melhor assegurada.

## 2.4 Propriedades das Argamassas

### 2.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma combinação de várias características reológicas das argamassas (consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, endurecimento) e por isso não é fácil de ser quantificada embora seja frequentemente correlacionada com a consistência da argamassa e facilmente percebida pelo profissional durante o manuseio.

Sabbatini (1984) classifica uma argamassa como sendo trabalhável quando atende as seguintes características: ao ser assentada distribui-se facilmente; não fica aderida à ferramenta ao ser aplicada; ao ser transportada não ocorre segregação e, principalmente, permanece plástica por tempo suficiente para finalização da operação.

De acordo com Bauer (1979) a trabalhabilidade é uma característica mais subjetiva do que física pois depende também das propriedades dos substratos e da habilidade do profissional ao manuseá-la sendo a consistência o componente físico mais importante estando associado às propriedades intrínsecas da mistura no estado fresco.

Deste modo uma mesma argamassa definida com uma trabalhabilidade ótima para um profissional pode não ser adequada para outro sendo importante que cada profissional produza um traço otimizado para conseguir uma execução rápida, econômica e de qualidade desde que as variações nas relações de materiais não tragam prejuízo à qualidade das argamassas.

Veiga (1998) afirma que alguns fatores podem alterar a trabalhabilidade da argamassa como o aumento no teor de finos, na quantidade ligantes e da quantidade de água de amassamento porém tais aumentos podem ocasionar consequências danosas a qualidade do produto formado.

Outra alternativa seria o uso de plastificantes e incorporadores de ar mas estes requerem conhecimento específicos de seus efeitos e atenção aos teores utilizados. Além destes outros fatores como o formato dos grãos e a relação aglomerantes/agregados podem influenciar na trabalhabilidade das argamassas.

### 2.4.2 Plasticidade

A plasticidade é a propriedade pela qual a argamassa, no estado fresco, deforma-se quando submetida a tensões e permanece nesta configuração mesmo quando as tensões cessam estando relacionadas com a consistência, coesão, retenção de água e reologia (Cardoso, 2009).

De acordo com Laureta e Monteverde (1984), citado por Bavaresco (2001), outro parâmetro que influencia na plasticidade das argamassas é a quantidade total de partículas menores que 0,075 mm que inclui todos os materiais finos como cimento, cal e agregados. A plasticidade e consistência das argamassas são dois parâmetros difíceis de serem dissociados podendo ser quantificados por meio de uma mesa de fluxo ou mesa de consistência (flow table), prescrito na ABNT - NBR13276 (2005).

As propriedades que efetivamente definem a trabalhabilidade são a plasticidade e a consistência sendo função também do proporcionamento e natureza dos materiais utilizados e da quantidade ideal para a obtenção de características ótimas ajustadas para a finalidade e aplicação das argamassas (Cascudo et al. (2005); Cincotto et al. (1995)).

### 2.4.3 Consistência

Silva (2006) e Cincotto et al. (1995) definem a consistência como sendo uma propriedade da argamassa no estado fresco capaz de resistir à deformações a ela impostas sendo influenciada por parâmetros como: fator água/cimento, traço, granulometria dos agregados e pela natureza e qualidade dos aglomerantes. Pode ser avaliada por diferentes ensaios que empregam a penetração de uma haste no interior da argamassa ou por meio de ensaios que transmitam vibrações ou choques medindo o espalhamento da argamassa na mesa e correlacionando estes valores.

As argamassas podem ser classificadas, em função da consistência, como secas (quando apenas preenchem os vazios entre os grãos), plásticas (quando forma-se uma fina película de água que lubrifica a superfície dos grãos) e como fluidas (quando os grãos estão imersos na pasta).

A consistência, expressa como um valor numérico para caracterização da fluidez, permite avaliar a ligação entre os constituintes da argamassa sendo de vital importância pois influencia na trabalhabilidade das argamassas estando diretamente relacionada com a quantidade de água utilizada no traço e, de forma indireta, mede a plasticidade e trabalhabilidade da mesma (Margalha, 2010).

Para avaliação da consistência das argamassas, tradicionalmente no Brasil, utiliza-se uma mesa de fluxo ou mesa de consistência (flow table). Vários autores como John (2003) e Bauer et al. (2005), entre outros citados por Silva (2006), afirmam que o método normativo brasileiro muito utilizado e prescrito na ABNT - NBR13276 (2005) para determinação do índice de consistência não tem sensibilidade suficiente para medir a reologia das argamassas.

#### **2.4.4 Incorporação de Ar**

O teor de ar incorporado pode ser definido como a quantidade de ar contida na argamassa em porcentagem de seu volume podendo ser determinado conforme a norma ABNT - NBR 13278 (2005) ou por meio de equipamentos e métodos especificados pelos fabricantes.

De acordo com Yoshida e Barros (1995) o ar incorporado age como lubrificante entre os agregados da argamassa melhorando sua trabalhabilidade e capacidade de retenção de água porém, em valores elevados, pode prejudicar a consistência e reduzir a resistência de aderência. Pode-se deduzir então que quanto maior for o teor de ar incorporado de uma argamassa maior será o volume de vazios o que implica em maior porosidade total e conseqüentemente em uma redução de sua resistência a compressão.

De acordo com de Freitas (2010) a água tende a penetrar as argamassas devido à capilaridade mas o teor de ar incorporado pode contribuir para o impedimento deste efeito pois interrompe parte dos poros capilares.

Segundo Nsambu (2007) o teor de ar incorporado depende da relação água/cimento, do volume ocupado pelos agregados, do processo de mistura (tempo e velocidade), da quantidade e tipo dos aditivos utilizados na dosagem e da natureza do cimento utilizado.

Para aumentar o teor de ar incorporado de uma argamassa existem métodos físicos (processo de mistura e características dos agregados) e químicos por meio de aditivos incorporadores de ar (que reagem com a água e com os aglomerantes e liberam gases que ficam aprisionados no interior das argamassas).

### 2.4.5 Retenção de Água

A retenção de água pode ser definida como a capacidade da argamassa, ainda no estado fresco, manter a sua consistência e trabalhabilidade mesmo sujeita a processos que promovam a perda de água seja por evaporação, sucção do substrato ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal (Cincotto et al., 1995) normalmente quantificada por meio dos procedimentos prescritos na norma brasileira ABNT - NBR13277 (1995).

De acordo com Selmo (1989) a retenção de água interfere substancialmente nas argamassas de revestimento pois, no estado fresco, afeta o tempo que a argamassa fica disponível para aplicação, regularização e desempenho e no estado endurecido afeta as condições de hidratação do cimento e carbonatação da cal interferindo também na velocidade de evaporação da água de amassamento minimizando a retração por secagem.

Para conferir a trabalhabilidade necessária as argamassas de revestimento apresentam uma quantidade de água maior que do que a necessária para a hidratação dos aglomerantes. Parte dessa água é perdida para o meio, por evaporação ou sucção, sendo esta movimentação da água prejudicial à argamassa pois afeta a resistência, a capilaridade, a permeabilidade e a aderência. Agregados que apresentam maiores teores de partículas finas podem ser alternativa para aumentar a retenção de água nas argamassas pois elas auxiliam no confinamento ou aprisionamento do líquido (Gomes, 2005).

Recena (2008) afirma que a quantidade de água utilizada no traço é diretamente proporcional a quantidade de água a ser evaporada, ou seja, o uso de teores elevados de água ocasionará uma retração por melhor que seja a capacidade de retenção de água da argamassa.

### 2.4.6 Resistência Mecânica

A resistência mecânica de uma argamassa pode ser conceituada como sendo uma propriedade capaz de resistir aos esforços mecânicos das mais diversas origens mas que em geral são tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (Selmo, 1989). Os procedimentos para obtenção da resistência mecânica à tração na flexão e à compressão estão estabelecidos na norma ABNT - NBR13279 (2005) enquanto os limites para classificação das argamassas prescritos na ABNT - NBR13281 (2005).

Segundo Rato (2006) e Coutinho, Antônio e Gonçalves (1994) a resistência mecânica de uma argamassa depende essencialmente de dois aspectos: o tipo de rede cristalina da matriz (relacionado com o tipo de aglomerante, dosagem do tração, tipo de cura e seu processo de enrijecimento) e da estrutura porosa (quantidade, dimensão e forma dos poros, granulometria dos agregados, dosagem do traço e quantidade de água, grau de hidratação e processo de cura).

Segundo Neville (1982) citado por Cruz (2008) a presença de ar no material cimentício, ocasionado pela remoção do excesso de água durante o processo de compactação, contribui para a redução da resistência à compressão correlacionando que um teor de 5% de ar pode reduzir a resistência em até 30%.

De acordo com Cincotto (1985) a resistência mecânica das argamassas melhora com pequenos volumes de cal mas piora com teores mais elevados e que um teor equilibrado de cal estaria na faixa de 0,25 a 1 em volume. O autor ainda apresenta outras vantagens como o aumento na capacidade de deformação dos revestimentos e ganho de aderência com o uso da cal. Guimarães (1985) relata certos cuidados ao se usar a cal nos traços pois ela tem um endurecimento lento em função do teor de gás carbônico contido no ar, ocorrendo a carbonatação superficial completa do hidróxido de cálcio em idades superiores a 30 dias.

Argamassas com elevados valores de resistência à compressão apresentaria matrizes mais rígidas favorecendo o processo de fendilhação sendo, portanto, necessário que a argamassa não apresente rigidez superior ao elemento exceto para alvenarias estruturais de grande porte ou em ambientes muito agressivos (Filomeno, 1993). A fendilhação ou

fissuração é uma patologia com grande influência no comportamento das argamassas. Veiga (1998) apresenta as principais características para que a argamassa resista à fendilhação com sendo: retração reduzida, módulo de elasticidade baixo, boa aderência e retenção de água elevada.

Embora a resistência a compressão possa ser relacionada a diversas características da argamassa, a resistência a tração torna-se mais relevante que a resistência de compressão pois quando o revestimento não consegue aliviar totalmente a tensão a ele imposta ocorre o aparecimento de trincas e fissuras originadas por esforços de tração.

#### 2.4.7 Elasticidade

Alguns materiais apresentam a capacidade de se deformarem quando submetidos a esforços, mas retornar as dimensões iniciais depois de cessado o carregamento ao qual foi submetido. A este processo damos o nome de elasticidade sendo esta uma característica desejável às argamassas, pois absorvem as deformações ocasionadas pela acomodação das cargas da estrutura, aos esforços provenientes de cargas acidentais e aos agentes externos como temperatura e umidade. Quando submetido a estas ações ocorre o aparecimento de trincas e fissuras, mesmo que microscópicas, que fazem com que as argamassas saiam do regime elástico para o regime plástico e apresentam deformações permanentes (Cincotto et al., 1995).

As microfissuras originadas pela deformação das argamassas podem não apresentar patologias inicialmente, mas com o decorrer do tempo aumenta as dimensões das fissuras devido à perda de água para o ambiente reduzindo a estanqueidade e sua aderência com o substrato Cruz (2008). De maneira geral podemos afirmar que quanto menor for o módulo de elasticidade maior será a capacidade da argamassa para absorver as deformações pois torna-se menos rígida. O consumo de água e o teor de pozolanas também são fatores que influenciam no módulo de elasticidade.

De acordo com Joisel (1981) citado por Dujab (2000) quando uma argamassa está sujeita ao esforço de compressão surgem fissuras de forma visível sobre sua estrutura e devido ao esforço de tração pode apresentar uma ruptura brusca concluindo que o módulo de deformação à compressão seja menor do que à tração.

Segundo Rodrigues (2004), para que não ocorram deslocamentos do revestimento ocasionados pela diferença acentuada entre os módulos de elasticidade do substrato e do revestimento, o módulo de elasticidade deverá ser menor ou igual ao do substrato e ainda ser decrescente do interior para o exterior quando utilizados várias camadas de revestimento (chapisco, emboço e reboco).

A qualidade bem como a durabilidade de uma argamassa, seja de assentamento ou revestimento, está relacionada com a sua capacidade de absorver as deformações. Desta forma é importante avaliarmos o módulo de elasticidade das argamassas que pode ser medido por dois processos distintos: o dinâmico e o estático.

O módulo de elasticidade dinâmico é um método mais preciso e não destrutivo, indicado para análises de tensões sujeitas a cargas de impacto ou terremotos, mas geralmente maior que o módulo de elasticidade estático (Mehta e Monteiro, 2008). Este método correlaciona a velocidade de propagação de uma onda ultrassônica longitudinal obtida por pulsos ultrassônicos com o módulo de elasticidade de um concreto ou argamassa estando os procedimentos prescritos na norma ABNT - NBR8802 (2013). Através deste método normativo é possível verificar a homogeneidade do corpo de prova, detectar eventuais falhas de moldagem, bem como profundidade de fissuras dentre outras imperfeições.

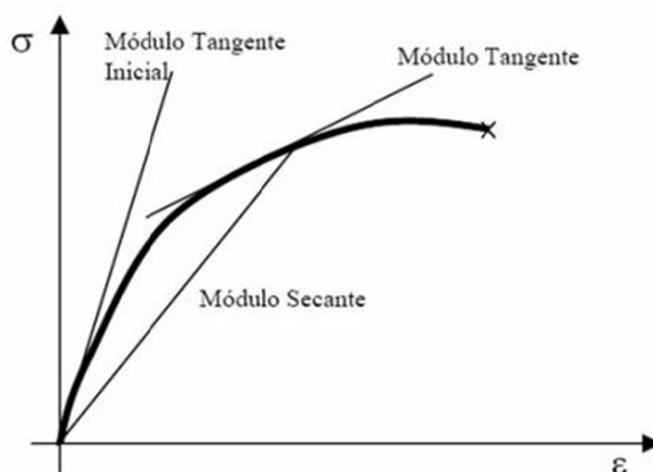
O módulo de elasticidade estático é obtido através da curva tensão x deformação realizando ensaios em corpos de prova no estado endurecido por compressão uniaxial estando os procedimentos prescritos na norma ABNT - NBR8522 (2008). O módulo de elasticidade estático pode ser obtido por três procedimentos prescritos na referida norma: tangente à origem, secante e cordal.

O módulo de elasticidade tangente à origem ou inicial ( $E_{ci}$ ) é o coeficiente angular da reta a qualquer ponto da curva tensão x deformação que normalmente refere-se a origem. É utilizado nos modelos de comportamento indicados nos diagramas de tensão x deformação para ensaios de tensão uniaxial e também para os casos de deformações lentas. Este método é equivalente ao módulo cordal entre 0,5 MPa e  $0,3 f_c$  (resistência característica do concreto ou argamassa).

O módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) é obtido pela relação entre uma tensão

qualquer e sua deformação correspondente, obtido pelo coeficiente angular da reta que unem estes dois pontos na curva tensão x deformação com a origem.

O módulo de elasticidade cordal ( $E_{cordal}$ ) é definido por dois pontos quaisquer na curva tensão x deformação unindo estes pontos e definindo o coeficiente angular da reta. De acordo com a norma ABNT - NBR8522 (2008) adota-se, para concretos, as tensões de 0,5 MPa e a tensão de 30% da carga máxima de ruptura. A Figura 2.2 a seguir ilustra os três tipos de módulo de elasticidade estáticos apresentados.



**Figura 2.2.** Módulos de elasticidade estático

Fonte: Santos et al. (2006)

### 2.4.8 Durabilidade

A durabilidade é a capacidade da argamassa resistir à agentes agressivos como as fissurações, espessuras excessivas, proliferação de microrganismos, dosagem e qualidade das argamassas, aplicação, falta de manutenção, clima, localização e topografia, mantendo suas características físicas e mecânicas inalterados ao longo do tempo e de sua utilização (Santos, 2009).

Esta característica pode ser entendida como o período de tempo que a argamassa desempenha suas funções normalmente sem precisar de qualquer intervenção, salvo as destinadas à sua conservação como pinturas por exemplo.

John e Ângelo (2002) listam os principais fatores apresentados na ASTM - 632E (1996) como sendo: ambientais (radiação, temperatura, água, constituintes do ar e poluentes, gelo/degelo e vento); de carregamento (deformação lenta, fadiga, água e seus derivados e cargas de uso); de incompatibilidade (química e física); biológicos (roedores, fungos e bactérias) e de uso (desgaste, manutenção e projeto).

Segundo Veiga (1998) as principais anomalias associadas à durabilidade são a penetração de água por capilaridade, fendilhação, perdas de aderência e a cultura e proliferação de microrganismos.

De acordo com Mauri et al. (2009) os ataques químicos por sulfatos e ácidos são frequentes agindo contra os materiais cimentícios provocando a expansão, a fissuração e conseqüentemente a deterioração das argamassas ou por lixiviação dos compostos da matriz com gradativa degradação do material.

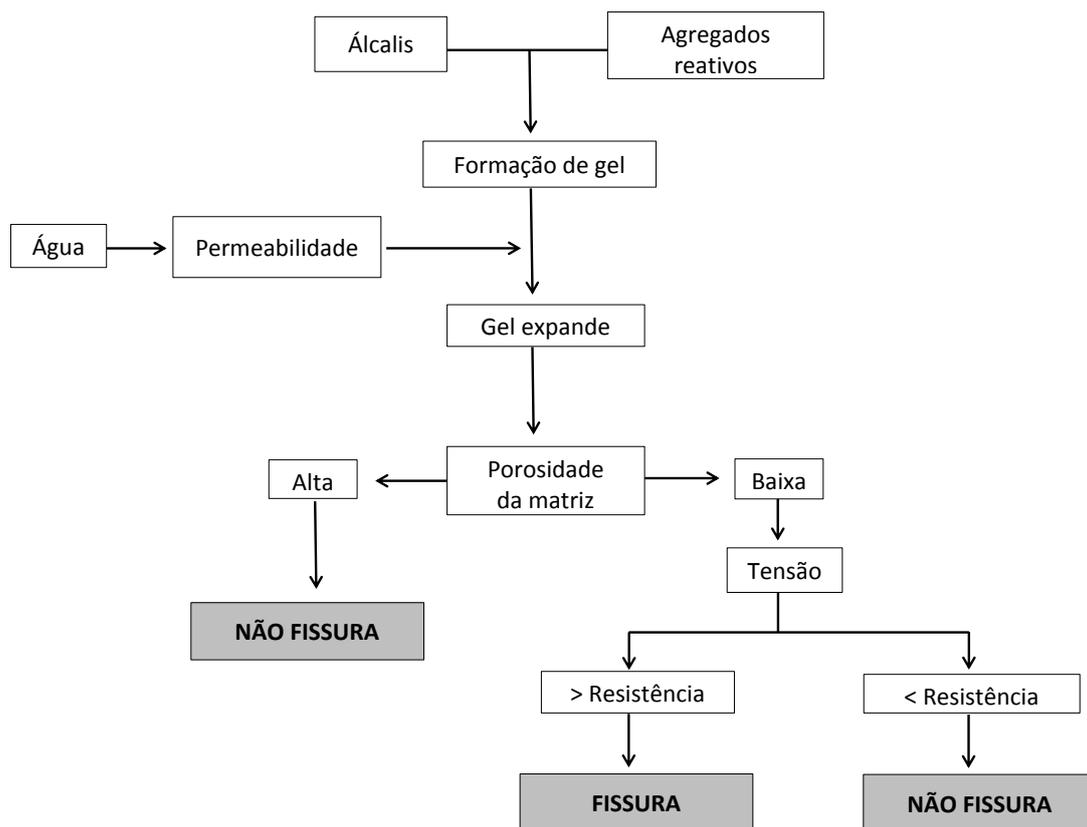
Martins (2008) esclarece que a precipitação de sais pode gerar duas formas de patologias: as eflorescências, depósitos de sais cristalinos que podem ser removidos por escovação ou lavagem, e as criptoflorescências, que se depositam no interior dos poros dos materiais absorvendo água e aumentando o seu volume devido a recristalização.

A durabilidade de uma matriz cimentícia pode ser avaliada, basicamente, por: ensaios de envelhecimento acelerado, de envelhecimento natural e estudos de deterioração em uso. Para obter respostas mais rápidas usa-se o método acelerado que consiste na exposição do material a elevadas concentrações de um fator de degradação com temperaturas elevadas que favorecem a velocidade das reações químicas (como a solução de hidróxido de sódio em banho térmico a 80°C prescrito na norma ABNT - NBR15577-4 (2009) ou com ciclos de molhagem e secagem afim de estressar o material ao máximo medindo sua expansibilidade e propagação de fissuras. Se uma argamassa resiste a um ensaio acelerado certamente será capaz de resistir às condições reais de uso embora outros fatores não estejam inclusos neste ensaio.

Qualquer que seja o método utilizado ele deve ser capaz de produzir propriedades mensuráveis de fácil leitura e correlacioná-las com a durabilidade além da possibilidade de replicação dos ensaios e resultados.

### 2.4.9 Reações Álcalis-Agregados

As reações álcalis-agregados (RAA) é um fenômeno conhecido pelas reações entre determinados componentes dos agregados e os hidróxidos alcalinos presentes nos cimentos, liberados na hidratação, quais provocam expansões e fissuras na estrutura das argamassas e concretos. Esta reação em geral é lenta, podendo levar anos até que se manifestem e para que estas reações ocorram são necessárias três condições: a presença de um agregado reativo, elevada concentração de álcalis na zona intersticial e umidade suficientemente elevada. Baseado na composição reativa dos agregados, esta reação pode ser classificada em três tipos: reação álcali-sílica; reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato. Um esquema do desenvolvimento das reações RAA pode ser visualizado na Figura 2.3 a seguir.



**Figura 2.3.** Desenvolvimento das reações álcali-agregados

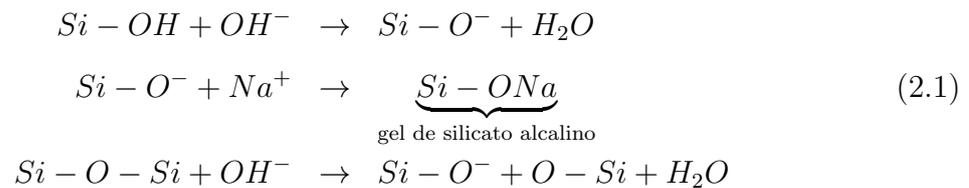
Fonte: Adaptado Valduga (2002)

De acordo com Andrade (1997), a reação química que envolve íons alcalinos e hidroxilas, desenvolvidos nas hidratações entre o cimento e os agregados pode ser definida como reação álcali-sílica e ocorrem quando os agregados apresentam fase mineralógica com sílica em estado amorfo (opala, cristobalita, tridimita, ...).

As reações álcali-sílica são as mais comuns entre as reações que ocorrem entre os álcalis-agregados. Devido a alguns tipos de rochas mineralógicas que apresentam estrutura desordenada e, portanto instável em uma solução básica (com elevado pH), pode ser classificada como sílica reativa que reage com os íons alcalinos de  $Na^+$  e  $K^+$  e hidroxilas  $OH^-$  presentes na pasta de cimento.

De acordo com Munhoz (2008) os principais agregados que favorecem as reações álcali-agregados são: o vidro vulcânico, a sílica amorfa e microcristalina, a tridimita, a cristobalita, a opala, o quartzo e feldspato deformados.

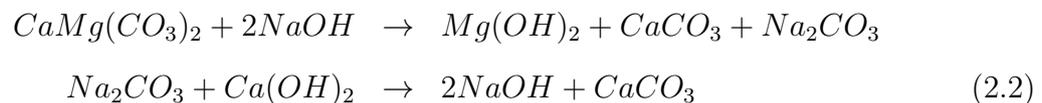
Funcionando como uma membrana osmótica, a pasta de cimento permite a migração das moléculas de água para o gel formado, mas não consegue absorver a água presente no gel. Desta forma, o gel vai expandindo e começa a exercer uma pressão acumulativa que quando excede o limite de resistência à tração provoca as fissuras internas e externas da argamassa ou concreto. Estas reações são apresentadas de forma esquemática na Equação 2.1 a seguir.



Biczok, citado por Andrade (1997), explica que este gel formado depende da concentração de cal ou álcalis para ser ou não expansivo. Quando a concentração de álcalis é maior, há um excesso de íons formando gel de álcali-sílica sendo este expansivo mas quando a concentração de cálcio sobrepõe, então há formação do gel cal-álcali-sílica não produzindo efeito prejudicial.

As reações entre álcali-silicato estão associadas principalmente aos silicatos existentes em folhetos argilosos, feldspatos, rochas sedimentares, metamórficas (incluindo os quartzitos) e magmáticas onde estes silicatos reagem com os álcalis do cimento. Este tipo de reação é semelhante a reação álcali-sílica porém mais lenta devido aos minerais reativos estarem mais disseminados.

De forma análoga as reações álcali-carbonato ocorrem entre os álcalis do cimento mas com agregados de calcário dolomítico ocasionando a formação de  $Mg(OH)_2$  mas sem a formação de gel expansivo. A Equação 2.2 a seguir demonstra o processo.



Particularmente nesta reação, o cálcio presente na matriz cimentícia reage com o  $CO_3$  produzido durante o processo de desdolomitização formando calcita e regenerando os íons hidroxila. A reação de desdolomitização irá ocorrer até que se esgote a dolomita presente no agregado. Este processo permite que o pH da solução permaneça elevado. As calcitas ( $CaCO_3$ ) e brucitas ( $Mg(OH)_2$ ) formadas ocupam maior volume do que a dolomita elevando a pressão durante o crescimento dos cristais provocando a expansão e fissuração.

Segundo Lima e Ramonich (1999), a incorporação de adições minerais como cinzas volantes, escórias de alto forno e microsílica inibem a reação álcali-sílica quando se utiliza agregados reativos. Isto porque estes materiais inibem o aumento de íons alcalinos e a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que em suas reações consomem a portlandita ( $Ca(OH)_2$ ).

Em 1963, para inibir a reação álcali-agregados na Barragem de Jupuíá, o engenheiro Gytahy utilizou uma adição de 35% de pozolanas na produção do concreto. Na barragem de Água Vermelha, 1975, além da adição de 30% de pozolanas foi adotado cimento com teor de álcalis menor que 0,6%. Essas adições são eficazes quando o potencial deletério é identificado em laboratório previamente à produção da argamassa ou concreto.

Existem relatos de outras medidas que podem ser adotadas para estruturas já construídas. Em 1977, quando a Barragem de Moxotó já estava concretada identificou-se patologias associadas às expansões das reações álcalis-agregados adotando como solução a injeção de  $CO_2$  sob pressão, redução das temperaturas e abertura de juntas de dilatações. Em diversas barragens como as de Joanes II, Ilha dos Pombos, de Peti, entre outras, adotou-se como solução a impermeabilização das estruturas com argamassas produzidas com materiais pozolânicos e adições de filler afim de minimizar a percolação de umidade nas fissuras e a porosidade (Andrade, 1997).

Além das reações entre álcalis-agregados, nas argamassas mistas ainda podem ocorrer reações expansivas oriundas das partículas de cal não dissolvidas que alteram seu volume, devido a carbonatação, provocando pulverulência e conseqüentemente deslocamento do revestimento. Segundo Carasek (1996), que estudou a aderência de argamassas de revestimento em substratos de concreto, na interface desses materiais podem ser encontrados silicatos de cálcio hidratado, carbonato de cálcio e um produto amorfo composto por cal e silício. A adição de cal nas argamassas promove um aumento na concentração de carbonato de cálcio, reação esta resultante da carbonatação do hidróxido de cálcio.

No processo de carbonatação o  $CO_2$  reage com os compostos hidratados do cimento na pasta endurecida ocorrendo um aumento de massa. De acordo com Bastos (2001) para cada mol de  $Ca(OH)_2$  que se recombina em  $CaCO_3$  há um ganho de 35% de massa. Desta forma ocorre um aumento de volume absoluto na formação de compostos carbonatados sendo capaz de promover uma retração por carbonatação com conseqüente fissuração. No entanto, este efeito pode diminuir os espaços entre as partículas sólidas de sua estrutura interna.

Para caracterização e quantificação das reações álcali-agregados existem diferentes métodos segundo prescrições normativas nacionais ou internacionais dentre as quais podemos citar: análise petrográfica (ASTM/C-295, 2012); método químico (ASTM/C-289, 2007); método da variação de comprimento de barras de argamassa (ASTM/C-227, 2010) e acelerado (ASTM/C-1260 (2014) e ABNT - NBR15577-4 (2009)).

A análise petrográfica é o primeiro passo para se obter informações sobre a com-

posição mineralógica dos agregados mas requer conhecimentos específicos do usuário e produz resultados que também podem ser obtidos por difração de raios X. O método químico produz resultados mais rápidos mas suas informações não devem ser conclusivas e únicas sendo aconselhável o uso de outros métodos.

O método da variação de comprimento de barras de argamassa, ou método acelerado, permite avaliar a potencial reatividade de um agregado através da produção de corpos de prova de argamassa que são periodicamente medidos e imersos em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) em banho térmico (80°C) tendo seus resultados anotados e comparados com um corpo de prova de referência. Os valores obtidos para as expansões permitem classificar as reações como inócuas ou potencialmente reativas.

## 2.5 Influência dos Agregados nas Propriedades da Argamassa

Os materiais que constituem as argamassas podem influenciar fortemente em suas características. De acordo com Santos (2014) as principais propriedades que são alteradas pelos agregados são: porosidade, absorção, aderência, resistência a compressão, módulo de elasticidade, forma e textura, substâncias deletérias e distribuição granulométrica.

Para os agregados miúdos os fatores mais relevantes são a composição mineralógica e granulometria. É desejável que as areias sejam essencialmente silicosas ou quartzosas, mas comumente estão associadas a argilo minerais que interferem de maneira sensível nas propriedades das argamassas.

Em relação à composição química e mineralógica as areias devem ser essencialmente de grão inócuos não sujeitos a processos de alteração que possam provocar manchas, perdas de resistência e aderência e que não interfiram na durabilidade das matrizes produzidas (Dujab, 2000).

Quanto às características geométricas grãos angulosos dificultam a trabalhabilidade mas podem proporcionar superfícies mais ásperas indicadas para chapiscos e emboços. Os grãos arredondados possuem menor atrito e superfície específica conferindo me-

lhora trabalhabilidade e compacidade às argamassas enquanto grãos lamelares provocam perda de aderência e esfoliamento do revestimento (Cincotto et al., 1995).

Segundo Angelim et al. (2003) a distribuição granulométrica dos agregados miúdos interfere na trabalhabilidade e consumo de água (no estado fresco) e na resistência de aderência, fissurações, rugosidade, permeabilidade e revestimento (no estado endurecido), influenciando diretamente o desempenho das argamassas.

O agregado miúdo é um material inerte e portanto não participa das reações químicas que promovem o endurecimento dos aglomerantes interferindo, no estado fresco, na trabalhabilidade e retenção de água devido ao formato dos grãos e, no estado endurecido, influência nas resistências mecânicas, deformações e permeabilidade (Carneiro e Cincotto, 1999).

Bauer (1997) afirma que areia com curvas adequadas e com teores de materiais menores que 0,075mm em quantidades não elevadas diminuem a demanda de água nos traços e o índice de fissuração por retração além de apresentar menor índice de vazios e menor consumo de cimento. Os agregados que apresentam uma distribuição contínua, classificada como média ( $1,8 < MF < 2,8$ ) e com grãos arredondados são mais propícios a produzirem melhores argamassas (Sabbatini, 1986). Areias muito finas podem obstruir os poros da massa tomando lugar dos produtos de hidratação do cimento e prejudicando a aderência, sendo que quanto maior o módulo de finura dos agregados miúdos maior será a resistência de aderência desde que as argamassas permaneçam trabalháveis (Carasek, 1996).

Azeredo (1978) apresenta outras vantagens da adição das areias em argamassas mistas de cal e cimento como redução do preço do produto (devido ao menor consumo de aglomerantes) e maior facilidade na passagem de anidrido carbônico necessário na re-carbonatação do hidróxido de cálcio. A Tabela 2.4 a seguir, ilustra a interferência das características granulométricas dos agregados nas propriedades das argamassas.

A massa específica dos agregados, ou seja a presença de poros internos nos grãos, influenciam algumas propriedades das argamassas como a aderência entre o agregado e a pasta, a resistência ao ciclo de gelo/degelo bem como a resistência à abrasão (Eui-Hawn e Soo Ko, 2008).

**Tabela 2.4.** Influência das características granulométricas nas argamassas

<b>Propriedades da Argamassa</b>	<b>&lt; Módulo de Finura</b>	<b>&gt; Descontinuidade Granulométrica</b>	<b>&gt; Teor de grãos Angulosos</b>
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistência mecânica	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

Fonte: Sabbatini (1986)

Os agregados apresentam porosidade superficial mas também alguns poros internos dentro do sólido onde a pasta possui dificuldade para penetrar. A quantidade de água que penetra no agregado depende do volume de poros, do seu tamanho e da continuidade estando relacionado com a quantidade de água de amassamento devido a absorção e umidade superficiais do agregado. Para um mesmo agregado, maior absorção indica maior porosidade e menor massa específica (Andrade, 1997). Além da porosidade, agregados com altos teores de argila possuem absorção elevada demandando mais água para adquirirem a mesma plasticidade e trabalhabilidade tendo como consequências a redução da durabilidade, da resistência mecânica e do teor de ar incorporado (Karasahin e Terzi, 2007).

A aderência dos agregados pode ser definida como o seu intertravamento com pasta devido a aspereza dos grãos e portanto, superfícies mais ásperas resultam em melhor aderência (Neville e Brooks, 2013). A aderência pode ser influenciada também pela composição química e mineralógica dos agregados sendo recomendável que a superfície do agregado esteja sempre limpa e livre de partículas finas.

A resistência mecânica dos agregados deve ser compatível com a pasta da argamassa pois, se durante a realização de ensaio de compressão uniaxial em um corpo de prova argamassado muitas partículas desse agregado se romperem pode-se concluir que a resistência do agregado é menor que a resistência da mistura (Sengul et al., 2002).

A escolha de um tipo de agregado permite eliminar ou reduzir a possibilidade de incompatibilidade elástica do agregado e da matriz evitando a retração do compósito. Quando o módulo de elasticidade do agregado é próximo da matriz cimentícia a concentração de tensões são mais uniformes (Sengul et al., 2002).

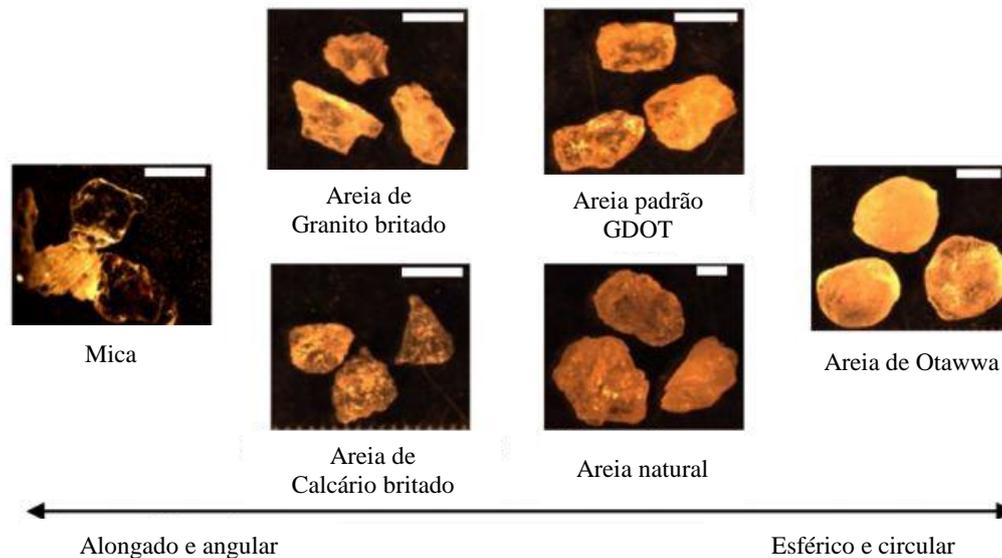
As substâncias deletérias podem ser classificadas como: impurezas que interferem no processo de hidratação dos aglomerantes, películas que impedem a aderência, partículas fracas e reações químicas com os aglomerantes, todas elas prejudicando a trabalhabilidade, a resistência, a pega e a durabilidade (Santos, 2014).

Sauoma e Perotti (2006) ressaltam alguns minerais que apresentam potencial patológico presentes nos agregados que reagem com hidróxidos alcalinos dissolvidos sendo estes geralmente derivados dos álcalis sódio e potássio presente no cimento mas podendo ser derivados de outras fontes. Um dos produtos formados na reação é o gel higroscópico altamente expansivo provocando fissurações.

De acordo com Monteiro et al. (2001) a intensidade das reações ocasionadas por substâncias deletérias e sua velocidade dependem de vários fatores como a quantidade e características dos agregados reativos, a temperatura, o nível de álcalis do cimento, a umidade, a dosagem dos materiais e a permeabilidade da pasta de cimento.

De acordo com Weitz (2004) partículas alongadas e lamelares devem ser evitadas nas argamassas em virtude do valor da área específica e consumo de pasta, sendo recomendável partículas de elevada esfericidade mas com baixo valor de curvatura.

Partículas com textura áspera, angulosas e alongadas demandam maior pasta de cimento do que partículas lisas e arredondadas para se produzir misturas trabalháveis (Mehta e Monteiro, 2008). A forma das partículas dos agregados pode ser descrita pelo uso de dois parâmetros: a esfericidade (relação entre a área superficial das partículas e seu volume) e a curvatura (relação entre o raio médio das extremidades e o raio da circunferência) que estão ilustrados e descritos a seguir na Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Microscopia ótica de partículas de areia

Fonte: Cortes et al. (2008)

## 2.6 Caracterização Química

### 2.6.1 Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica muito versátil, que pode ser aplicada em diversas amostras tanto no estado sólido quanto no estado líquido, para determinação, dos elementos químicos presentes em uma amostras de forma rápida, de baixo custo, não destrutiva e de fácil preparação das amostras (Skoog, 2009).

Para a realização deste ensaio as amostras, sólidas ou líquidas, são preparadas e expostas a um feixe de radiação para excitação e detecção da radiação fluorescente resultante da interação da radiação como o material da amostra, deslocando um elétron das camadas mais internas do átomo. Um outro elétron, de camada mais externa, substitui o elétron perdido, liberando energia na forma de raios X fluorescentes, emitidos em comprimentos de onda que são característicos de cada elemento, de intensidade proporcional à sua concentração. De forma resumida o ensaio consiste de três fases: excitação dos elementos, dispersão dos raios X e detecção desses raios (Nagata, 1997).

### 2.6.2 Espectrofotometria por absorção atômica

A espectrofotometria por absorção atômica (EAA) é uma técnica para determinação da concentração de elementos metálicos presentes em uma amostra. O princípio para sua realização consiste em fornecer energia ao material fazendo com que os elétrons absorvam-a e passem para um orbital de maior energia. Considerando que cada elemento só pode sofrer transições específicas e com um pacote de energia também específico e possível identificar os elementos presentes nas amostras. Para que o elemento absorva a energia é necessário atomizá-lo pois, desta forma, o elemento a ser analisado estará isolado e com seus elétrons apenas nos orbitais atômicos. Esta técnica permite determinar quantitativamente, com sensibilidade suficiente, mais de 60 elementos da tabela periódica (Mustra, 2009).

### 2.6.3 Difração de raios X

A técnica de difração de raios X (DRX) consiste na incidência de feixes de raios-X em uma amostra e na detecção dos fótons difratados dos átomos do material. O instrumento tradicional de medição é o difratômetro onde a captação do eixo difratado é feita por meio de um detector de arranjo geométrico que possibilita a obtenção do ângulo  $2\theta$  sendo o feixe difratado normalmente expresso através da intensidade de picos que se detectam no background (Gobbo, 2003).

De acordo com Santos (2005) o método de Rietveld é um processo de refinamento dos dados obtidos por difração de raios X para estruturas cristalinas. Esta estrutura pode ser refinada, de forma que o difratograma observado na DRX se aproxime ao máximo do difratograma calculado com base na estrutura cristalina. Para que seja possível esta análise é necessário que o difratograma observado seja obtido por um processo de varredura passo-a-passo com incremento constante de  $2\theta$ . Outra vantagem destacada pelo autor é a possibilidade de tornar a análise quantitativa calculando a proporção em massa de cada fase presente na amostra desde que as fases sejam cristalinas e consideradas no processo de refinamento, identificando também uma proporção para a fase amorfa do material.

## 2.7 Quartzito

De acordo com Almeida e Luz (2009) o quartzito é uma rocha metamórfica formada a partir da transformação de outras rochas (ígneas, metamórficas ou mesmo sedimentares) através da submissão a parâmetros térmicos, mecânicos e químicos sem que ocorra fusão da rocha.

Em função da quantidade de mica e do grau de intemperismo, os quartzitos podem ser mais ou menos foliados e friáveis. A sílica pode ser encontrada nas formas: amorfa, representada pela diatomita quando formada por processo sedimentar pelo acúmulo de algas diatomáceas, ou cristalina, encontrada nos veios de quartzo e areias consolidadas como arenito e quartzito (Hanson, 1995). Sobre as camadas de quartzito podemos encontrar filitos, com intercalações de metaconglomerados e metarenitos finos a grossos.

Conforme observado por vários autores (Andrade et al. (2009), Silva et al. (2002) e Costa (2007)) o afloramento do quartzito está frequentemente associado ao filito. Ainda segundos os autores é possível afirmar que o quartzito tem como mineral principal o quartzo (elevado ter de sílica) mas apresenta outros minerais constituintes como muscovita, biotita, e sericita. Os quartzitos são provenientes de arenitos metamorfizados onde o cimento que ligava os grãos da areia, que também eram de sílica, se recristalizaram apresentando micas ou feldspatos como minerais mais comuns (Ferreira, 1980).

Os quartzitos amplamente utilizados na construção civil como revestimento e ornamento de ambientes externos são os quartzitos duros conhecidos como “pedra de São Tomé” ou “pedra Itacolomy”. Outro tipo de quartzito, denominado como quartzito friável, ainda não é utilizado comercialmente e apresenta raros trabalhos científicos a seu respeito. Os dois tipos de quartzitos serão melhor apresentados a seguir.

### 2.7.1 Quartzito Duro

As atividades de lavra do quartzito duro são realizadas a céu aberto, com desmonte de bancadas a partir do maciço rochoso e composto basicamente por três etapas: decapeamento do manto de solo; remoção do quartzito intemperizado/friável e desmonte do quartzito comerciável. Após o desmonte, retiram-se placas grandes e espessas ou blocos,

que podem ser beneficiadas nas praças dentro da frente de lavra ou em local específico com instalações e equipamentos apropriados. A principal aplicação do quartzito duro está na construção civil como revestimento e ornamentação de ambientes internos e externos podendo ser utilizado como piso, revestimento de paredes, revestimento de vigas e pilares, ladrilhos, lajotas, paralelepípedos, bancadas, degraus, etc.

O quartzito é geralmente branco, cinza claro ou amarelado mas essas cores podem ser modificadas por impureza que dão diferentes colorações à rocha. Quando puro, o quartzito apresenta uma composição química composta quase que exclusivamente por sílica mas se argilas ou materiais calcários estiverem misturados com a areia de quartzito, é possível identificar pequenas quantidades de alumina, ferro, cal e álcalis (Pirsson, 1952). Estes contrastes podem ser vistos na Tabela 2.5 a seguir onde a Amostra I e Amostra II representam, respectivamente, um quartzito puro e um quartzito impuro.

**Tabela 2.5.** Composição química do quartzito duro

<b>Amostra</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>FeO</b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>
I	97,71	1,39	1,25	-	0,13	0,18	-	-	-
II	74,22	10,61	7,45	0,85	1,48	0,56	2,12	1,08	1,79

Fonte: Pirsson (1952)

Lima (2007) analisou um quartzito proveniente da Serra do Taquaral no município de Ouro Preto, Minas Gerais, utilizado como placas de pisos e revestimentos. Através de microscopias ótica e eletrônica de varredura, os autores determinaram a composição mineralógica da amostra com os teores: quartzo (85%), muscovita e cianita (10%), sericita (5%) e minerais opacos (2%) entre eles rutilo, zircão, hematita, goethita, calcopirita e prata.

O principal desafio das indústrias que extraem o quartzito duro é a geração de resíduos. Segundo Ramirio et al. (2008), que analisaram as mineradoras do sudoeste de Minas Gerais, a quantidade de rejeito gerado pode chegar a 92% do material extraído sendo a produção anual certa de 500 mil toneladas o que corresponderia a 460 mil toneladas de rejeitos por ano.

Dentre os impactos ocasionados pela alta geração de resíduos podemos citar o manejo incorreto ocasionando uma degradação ambiental em termos de assoreamento de rios, geração de poeira e degradação visual. A Figura 2.5 a seguir, ilustra a degradação ambiental com o manejo incorreto dos resíduos gerados na extração de quartzito.



**Figura 2.5.** Impacto ambiental relacionado a extração do quartzito duro

Fonte: FEAM (2009)

### 2.7.2 Quartzito Friável

O quartzito friável, assim denominado quando intemperizado e pouco coeso, não tem aproveitamento econômico como material de revestimento. Fica interposto entre o capeamento do solo e a presença, ou não, de algum minério propriamente dito e, por isso, definido como um estéril de lavra.

Collares (2013) teve seu trabalho publicado no site do IBRAM no mesmo ano, cujo estudo foi classificado como pioneiro na tentativa de usar o quartzito duro como agregado para concreto. Fato que demonstra que os estudos sobre o uso dos resíduos de quartzito ainda estão em fases preliminares.

Devido ao baixo ou mesmo ausência de valor econômico, e com impactos ambientais relativamente menores, o quartzito friável é um material ainda pouco estudado. Os trabalhos desenvolvidos com este material apresentam-se em estágio inicial, com escassas referências acadêmicas, e análises que não o caracterizam por completo.

# Capítulo 3

## Materiais e Métodos

Neste capítulo estão especificados os materiais utilizados para produção das argamassas de assentamento e revestimento, bem como os procedimentos de ensaios utilizados para caracterização dos agregados e das argamassas, nos estados fresco e endurecido, desenvolvidos neste trabalho. A metodologia, de forma simplificada e esquemática, pode ser visualizada na Figura 3.1 a seguir.

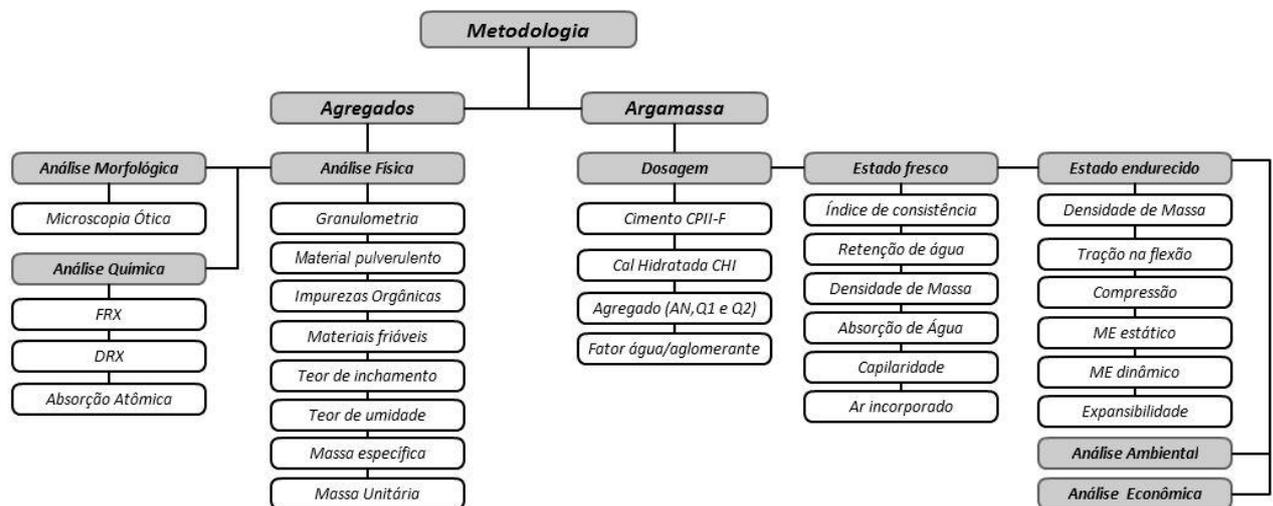


Figura 3.1. Fluxograma da metodologia adotada

## 3.1 Materiais

### 3.1.1 Cimento

O CP II-F é um cimento composto tendo como componentes o clínquer + sulfatos de cálcio (90% a 94%) com adição de material carbonático (6% a 10%) em massa. Este tipo de cimento é recomendado desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento. A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a ABNT - NBR11578 (2014).

O cimento utilizado como aglomerante para produção das argamassas de assentamento e revestimento foi CII-F 32 fabricado pela empresa Cimento TUPI, em conformidade com os requisitos normativos, e facilmente encontrado na região metropolitana de Belo Horizonte a custos acessíveis. As propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento podem ser visualizadas na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2 a seguir e foram fornecidas pelo fabricante referentes a média de resultados obtidos no mês de fabricação do cimento utilizado neste trabalho.

**Tabela 3.1.** Propriedades químicas do cimento CP II F 32

<b>Cimento Tupi – CP II F 32</b>		Limites Normativos (NBR 11578)
<b>Componentes</b>	<b>%</b>	
SiO <sub>2</sub>	19,08	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,40	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,59	-
CaO	62,27	-
MgO	1,58	≤ 6,5
SO <sub>3</sub>	2,86	≤ 4,0
Na <sub>2</sub> O	0,25	-
K <sub>2</sub> O	1,13	-
Perda ao fogo	4,11	≤ 6,5
Resíduo Insolúvel	2,37	≤ 2,5

Fonte: Cimento Tupi, 2014

**Tabela 3.2.** Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II F 32

<b>Cimento Tupi – CP II F 32</b>		Limites Normativos (NBR 11578)
<b>Propriedades</b>	<b>Unidade</b>	
Finura # 200	19,08 %	≤ 12,00 %
Finura # 325	4,40 %	-
Finura Blaine	3,59 cm <sup>2</sup> /g	≥ 2,6 cm <sup>2</sup> /g
Consistência Normal	62,27 %	-
Início de pega	2:58 h:min	≥ 1h
Fim de pega	04:35 h:min	≤ 10h
Compressão 1 dia	15,6 MPa	-
Compressão 3 dias	30,05 MPa	≥ 10 MPa
Compressão 7 dias	35,0 MPa	≥ 20 MPa
Compressão 28 dias	39,10 MPa	≥ 32 MPa

Fonte: Cimento Tupi, 2014

### 3.1.2 Cal

A cal utilizada foi a cal hidratada CHI, tipo cálcica, fabricada pela empresa ICAL em conformidade com os requisitos normativos e disponível na região a custos acessíveis. As propriedades físicas e químicas da cal utilizada podem ser visualizadas, respectivamente, na Tabela 3.3 e Tabela 3.4 a seguir.

**Tabela 3.3.** Propriedades físicas da Cal Hidratada CHI

<b>Ical - Cal Hidratada CHI</b>	
<b>Propriedades</b>	<b>Unidade</b>
Aspecto	Pó seco e branco
Finura # 30 (ret. acum.)	0,00 %
Finura # 100 (ret. acum.)	0,95 %
Finura # 200 (ret. acum.)	1,86 %
Umidade	0,57%
Densidade	0,43 g/cm <sup>3</sup>
Plasticidade	125,75 %
Retenção de água	80,25 %
Incorporação de areia	3,77 %
Estabilidade	Ausência de cavidades

Fonte: Ical, 2014

**Tabela 3.4.** Propriedades químicas da Cal Hidratada CHI

Ical – Cal Hidratada CHI	
Propriedades	Unidade
PPC (perda por calcinação)	24,76 %
CaO total	72,27 %
MgO	0,35 %
SiO <sub>3</sub> + RI (resíduo insolúvel)	1,53 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,38 %
SO <sub>3</sub>	0,24 %
S	80,25 %
CO <sub>2</sub>	4,59 %
CaO disp. (sacarose)	65,32 %

Fonte: Ical, 2014

### 3.1.3 Areia Natural

A areia natural utilizada como agregado miúdo para produção das argamassas recebeu nomenclatura de AN, e é proveniente do Rio Piranga extraída no município de Ponte Nova no estado de Minas Gerais. A amostra utilizada possui partículas com diâmetro inferior a 4,80mm em frações obtidas por processo de peneiramento. A Figura 3.2 a seguir ilustra o agregado natural utilizado.

**Figura 3.2.** Agregado miúdo natural

Para evitar o processo de inchamento do agregado miúdo e garantir a qualidade das dosagens das argamassas, a areia foi previamente seca em estufa e acondicionada em sacos plásticos hermeticamente fechados e devidamente identificados até as datas de ensaio ou moldagem.

### 3.1.4 Quartzito Friável

Este material, utilizado como agregado miúdo na composição de argamassas de assentamento e revestimento, é um estéril de rocha de quartzito de uma mineradora localizada na região metropolitana de Belo Horizonte. Utilizou-se neste trabalho duas amostras de quartzito provenientes da mesma mineradora, mas em jazidas diferentes onde as amostras receberam a nomenclatura de Q1 e Q2 para as amostras da Jazida 1 e Jazida 2, respectivamente. As jazidas onde foram coletadas as amostras ficam na área da mineradora de filito e podem ser visualizadas na Figura 3.3 a seguir.



**Figura 3.3.** Jazidas de quartzito friável

Fonte: Google Maps, 2015.

As amostras foram coletadas de forma representativa, conforme prescrições normativas da ABNT - NBR 10007 (2004) com o auxílio de máquinas de escavação em pontos de coleta distintos e enviados ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas/UFOP em bombonas plásticas, lacradas e devidamente identificadas, sendo posteriormente acondicionadas nas dependências do laboratório. Foram coletadas uma bombona, de 200L de capacidade, para cada amostra quartzito (Q1 e Q2).

As amostras de quartzito Q1 e Q2 foram processadas e separadas granulometricamente em diferentes faixas de interesse para caracterização e produção das argamassas. As nomenclaturas adotadas para as diferentes frações do quartzito friável podem ser visualizadas na Tabela 3.5 a seguir.

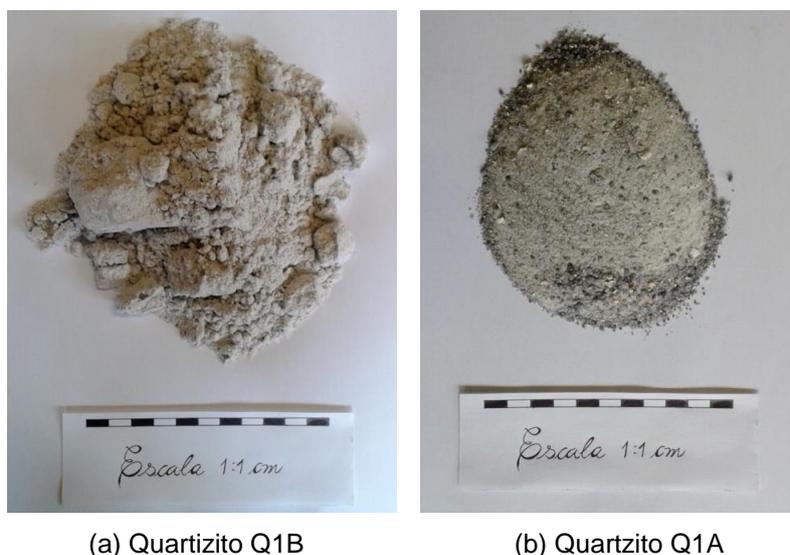
**Tabela 3.5.** Classificação dos quartzitos utilizados

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>
Q1	Quartzito friável proveniente da jazida 1
Q2	Quartzito friável proveniente da jazida 2
Q1B ; Q2B	Quartzito friável no estado bruto
Q1A ; Q2A	Quartzito friável utilizado como areia

Para garantir a qualidade das dosagens das argamassas, as amostras de quartzito foram previamente secas em estufas e acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados e devidamente identificados.

A fim de melhor caracterizar o estéril segundo suas frações granulométricas e constituintes químicos e mesmo mineralógicos, promoveu-se uma segregação das frações segundo série completa de peneiras, bem como uma fração geral cominuída em moinho de alta eficiência.

O quartzito friável foi então separado granulometricamente em frações de interesse, peneirando 500g de material por 5 minutos, utilizando o material retido nas peneiras de malha entre de 2,40mm até 0,150mm como areia. A Figura 3.4 ilustra o quartzito Q1 nos estados bruto (Q1B) e areia (Q1A).

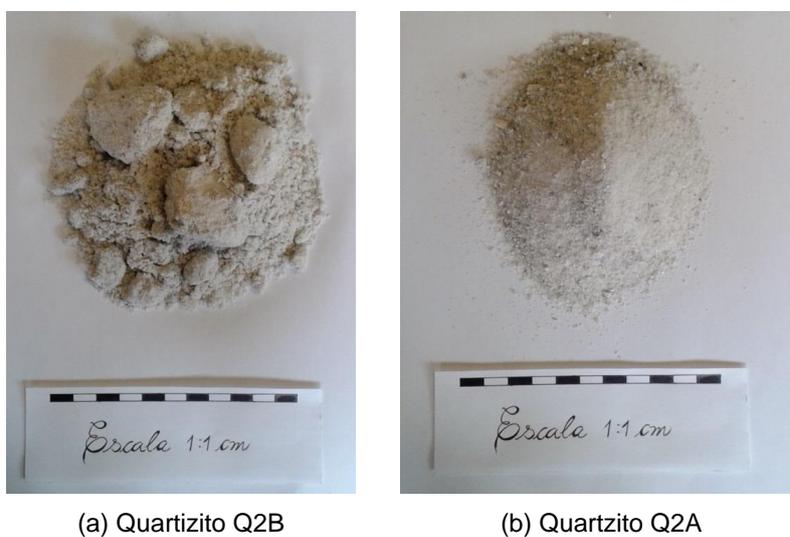


(a) Quartzito Q1B

(b) Quartzito Q1A

**Figura 3.4.** Agregado miúdo proveniente da jazida 1 de quartzito

A Figura 3.5 ilustra o quartzito Q2 nos estados bruto (Q2B) e areia (Q2A).

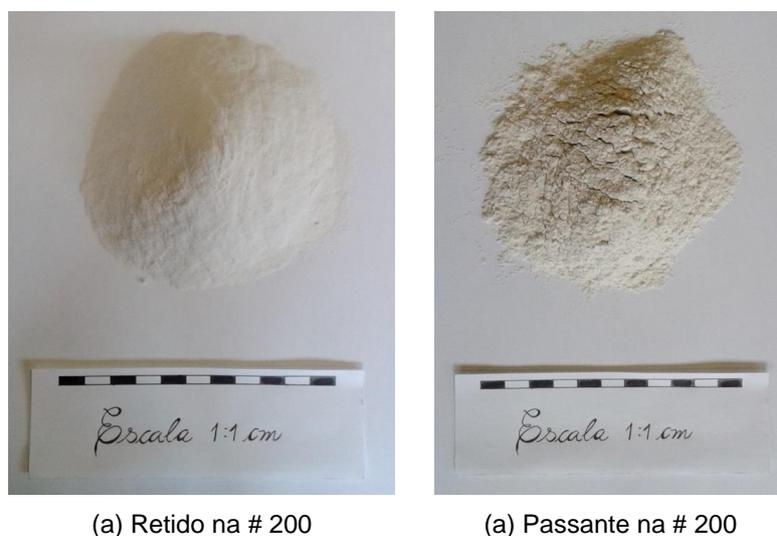


(a) Quartzito Q2B

(b) Quartzito Q2A

**Figura 3.5.** Agregado miúdo proveniente da jazida 2 de quartzito

As frações inferiores a 0,150mm, obtidas por peneiramento, não foram incorporadas nas argamassas. A Figura 3.6 a seguir apresenta as frações retidas na peneira de 0,075mm e passante pela mesma peneira para apenas uma amostra de quartzito.



**Figura 3.6.** Frações do quartzito retidas e passantes na peneira de 0,075mm

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Caracterização Física das Amostras

A caracterização física, bem como os métodos para preparação dos materiais e procedimentos dos ensaios, dos agregado (AN, Q1 e Q2) estão listadas e descritas de forma sucinta a seguir.

#### 3.2.1.1 Distribuição Granulométrica

Para a caracterização granulométrica dos agregados naturais e artificiais, os materiais foram devidamente preparados e ensaiados conforme prescrições da norma ABNT - NBR NM 248 (2003). Essa norma prescreve nas curvas de distribuição granulométricas os limites máximos e mínimos aceitáveis bem como os limites ótimos. Onde se podem identificar as faixas de interesse ao projeto, a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados através das porcentagens retidas e acumuladas no conjunto de peneiras. A Figura 3.7 a seguir ilustra o conjunto de peneiras utilizadas para determinação da distribuição granulométrica dos agregados miúdos utilizados neste trabalho.



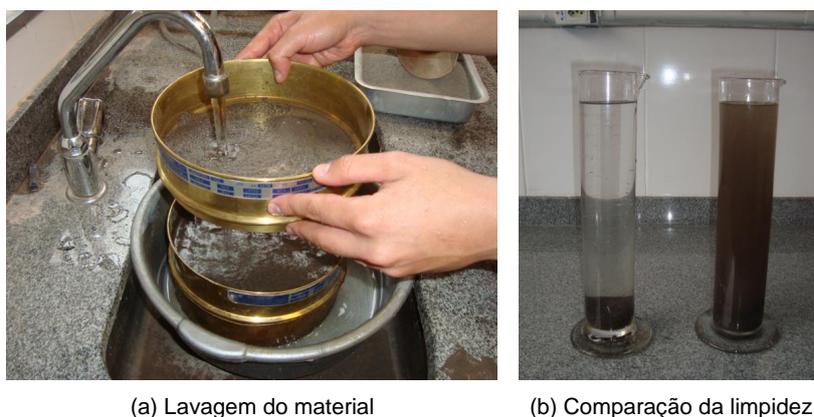
**Figura 3.7.** Peneirador para agregados miúdos

### 3.2.1.2 Teor de Material Pulverulento

Os agregados miúdos AN, Q1 e Q2 foram submetidos ao ensaio de teor de material pulverulento segundo a norma ABNT - NBR NM 46 (2003). Neste ensaio consideram-se as partículas minerais com dimensão inferior a 0,075mm inclusive os materiais solúveis em água, presente nos agregados.

Nos procedimentos para a realização deste ensaio, deve-se, inicialmente, coletar de forma representativa uma amostra de 500 g de cada material miúdo previamente seco em estufa até constância de massa. O ensaio consiste na lavagem do material sobre o jogo de peneiras com abertura de malha de 0,075mm e 1,18mm até que a água esteja clara ou incolor.

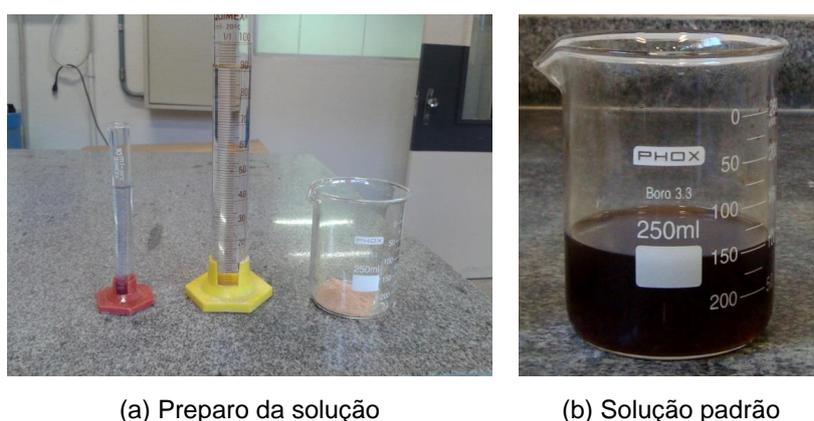
O procedimento está ilustrado na Figura 3.8 a seguir. O uso dessas peneiras é essencial para garantir que não ocorrerá perda de material durante a lavagem. Para a determinação da limpidez da água usam-se dois frascos para comparação sendo um deles apenas com água e outro com água+amostra. O resultado do teor de material pulverulento é correlativo a massa dissipada durante a lavagem comparativamente a massa inicial seca em estufa.



**Figura 3.8.** Ensaio de teor de material pulverulento

### 3.2.1.3 Teor de Impurezas Orgânicas

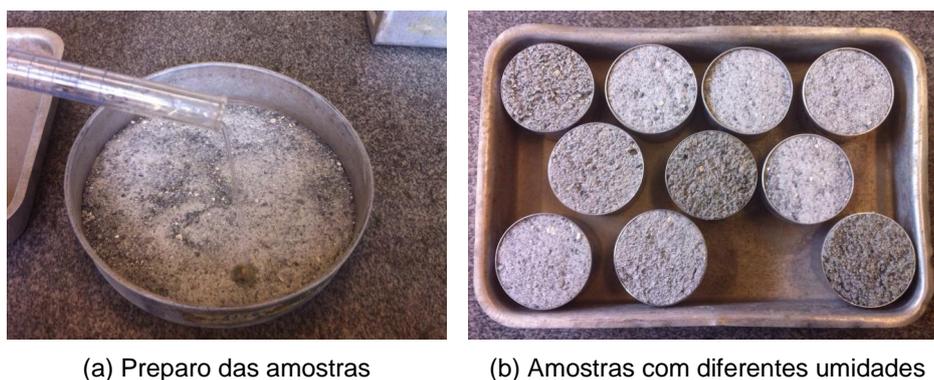
As impurezas orgânicas presente nas amostras foram determinadas de acordo com as prescrições da ABNT - NBR NM 49 (2001). Este método consiste na preparação de duas soluções: uma solução padrão composta por água destilada, ácido tânico e álcool (95%), que pode ser visualizada na Figura 3.9 a seguir, e outra preparada com hidróxido de sódio (90% - 95% de pureza) e água destilada que irá reagir com os agregados e caso exista presença de matéria orgânica irá dissolvê-la alterando a coloração da solução. Ambas as soluções devem permanecer por 24h em repouso e protegida da luz sendo posteriormente comparadas a coloração das soluções.



**Figura 3.9.** Substância padrão para ensaio de impurezas orgânicas

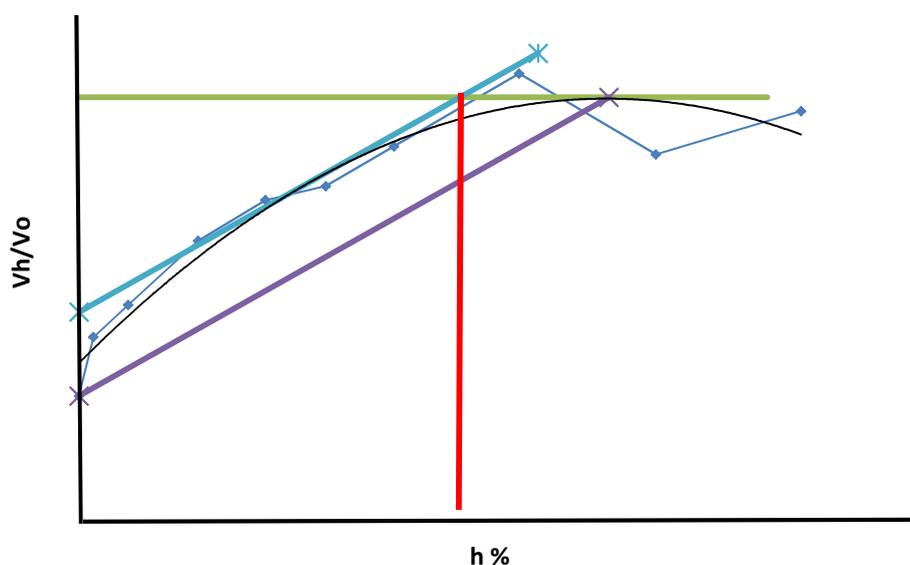
### 3.2.1.4 Teor de Inchamento do Agregado Miúdo

O ensaio para a determinação do inchamento do agregado miúdo das amostras seguiram as especificações da norma ABNT - NBR6467 (2006). Segundo a norma mencionada, o inchamento é um fenômeno da variação do volume aparente, provocado pela absorção de água livre pelos grãos e que incide sobre a sua massa unitária. O ensaio consiste em adicionar água sucessivamente de modo a obter teores de umidade próximos aos valores: 0%, 0,5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 9% e 12%. É importante ressaltar que as amostras devem ser sempre homogêneas e agitadas por um misturador mecânico. Sendo assim, deve-se determinar o teor de umidade e executar a massa unitária para cada adição de água. A Figura 3.10 a seguir, ilustra o método para determinação do teor de umidade de cada amostra após a adição de água.



**Figura 3.10.** Preparação das amostras para ensaio de inchamento

Percebe-se que o volume aparente do agregado miúdo varia em função do seu teor de umidade, segundo uma curva de inchamento. A curva de inchamento é expressa em função do volume relativo e da umidade. A umidade crítica obtida é o valor do teor de umidade acima do qual o coeficiente de inchamento pode ser considerado constante e igual ao coeficiente de inchamento médio. Para cada umidade deve-se calcular o coeficiente de inchamento respectivo a esta umidade plotando o ponto no gráfico para traçar a curva. Determina-se o coeficiente de inchamento pela média aritmética entre os coeficientes de inchamento máximo e aquele correspondente à umidade crítica. A Figura 3.11 a seguir ilustra o procedimento para determinação do coeficiente de inchamento e umidade crítica.



**Figura 3.11.** Determinação da umidade crítica e coeficiente de inchamento

### 3.2.1.5 Teor de argila em Torrões e Materiais Friáveis

A determinação do teor de materiais macios e friáveis presente nos agregados miúdos foi determinada em conformidade com a ABNT - NBR 7218 (2010). Para agregados miúdos deve-se separar previamente uma amostra de 200g de material seco em estufa, passante na peneira de 4,80mm e retido na peneira de 1,18mm, imergindo-a em um recipiente com água destilada por um período de 24h. Transcorrido esse tempo deve-se pressionar com a ponta dos dedos as partículas macias e friáveis desfazendo-as. Por fim proceder peneiramento em peneira de 0,60mm, via úmida, removendo as partículas macias ou friáveis. A amostra resultante deve ser seca em estufa e a diferença de massa, em porcentagem, representa o teor de materiais macios e friáveis presentes nos agregados.

### 3.2.1.6 Teor de Umidade

O ensaio para determinação do teor de umidade total foi realizado com os agregados miúdos em acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 9939/11. Este ensaio consiste na pesagem da massa inicial do material após 24 horas de exposição ao ar em temperatura ambiente, e uma segunda pesagem, após constância de massa, depois de

submetido ao processo de secagem do material em estufa a uma temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  por igual período de 24 horas. O teor de umidade é obtido então correlacionando a perda de massa entre a massa inicial e a massa final, em porcentagem. Este ensaio tem a finalidade de determinar a quantidade de água absorvida do ambiente pelo agregado para correção da relação água/cimento do utilizado em traços realizados em obras.

### 3.2.1.7 Massa Específica

A massa específica do agregado pode ser definida como a relação entre a massa do agregado seco em estufa até constância de massa e o volume igual do sólido, incluídos os poros impermeáveis. Os procedimentos para determinação da massa específica do agregado miúdo estão definidos na norma ANBT - NBR NM 52 (2009).

O ensaio consiste em colocar 500g de amostra em um frasco de volume conhecido, registrando a massa do conjunto, e enchendo o frasco até a marca registrada para o volume determinado. É necessário eliminar as bolhas de ar aprisionadas agitando o frasco e deixando posteriormente em repouso para leitura. Registra-se novamente a massa do conjunto (frasco + amostra + água) e determina a massa específica do agregado dividindo a massa da amostra seca pela diferença entre o volume do frasco e o volume de água adicionada ao frasco. A Figura 3.12 a seguir ilustra o procedimento descrito.



**Figura 3.12.** Determinação da massa específica

### 3.2.1.8 Massa Unitária

A determinação da massa unitária foi conduzida, em conformidade com prescrições estabelecidas na norma ABNT - NBR NM 45 (2006). A massa unitária pode ser definida como a relação entre a massa dos agregados, considerando os vazios entre eles, e o volume ocupado pelos mesmos. Para a determinação da massa unitária é necessário a preparação do dobro do material necessário para preencher o volume de um recipiente padrão sem que ocorra o seu adensamento. Para tal o material deve ser lançado a uma altura de 10 a 12cm. Após o preenchimento, a superfície deve ser regularizada com o nível superior do recipiente de modo a retirar o excesso de material ou compensar as saliências e reentrâncias. É determinada então a massa do agregado. Obtém-se a massa unitária do agregado dividindo a massa determinada pelo volume conhecido. A Figura 3.13 ilustra o procedimento para determinação da massa unitária dos agregados miúdos.



**Figura 3.13.** Determinação da massa unitária

### 3.2.2 Dosagem das Argamassas

Para argamassas de revestimento e assentamento, respectivamente, adotou-se neste trabalho os traços de dosagem 1:1:6 (cimento: cal: areia) e 1:2:9 (cimento: cal: areia), em volume, numa proporção aglomerante: agregado de 1:3. Foram utilizados cimento CII-F 32 e cal hidratada CHI como aglomerantes para todas as dosagens e como agregados a areia natural (AN), produzindo traços de referência, e a de quartzito proveniente das duas jazidas (Q1 e Q2).

O planejamento da dosagem das argamassas, bem como as nomenclaturas adotadas, encontra-se detalhado na Tabela 3.6 apresentada a seguir.

**Tabela 3.6.** Dosagem das argamassas

Tipo	Sigla	Traço	Materiais
<b>Argamassa de revestimento</b>	TNR	1:1:6	cimento: cal : areia natural
	TQ1R	1:1:6	cimento: cal : areia de quartzito 1
	TQ2R	1:1:6	cimento: cal : areia de quartzito 2
<b>Argamassa de assentamento</b>	TNA	1:2:9	cimento: cal : areia natural
	TQ1A	1:2:9	cimento: cal : areia de quartzito 1
	TQ2A	1:2:9	cimento: cal : areia de quartzito 2

### 3.2.3 Produção e Moldagem das Argamassas

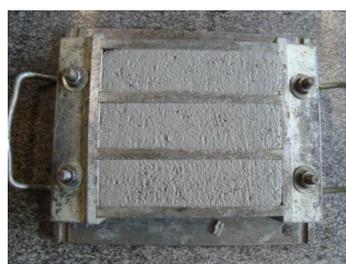
As argamassas, foram produzidas por misturador mecânico, com movimentos planetários em conformidade com os requisitos normativos, sendo os materiais sólidos (cimento, cal e agregados miúdos) dosados em massa e a água dosada em volume para produção das argamassas em acordo com os procedimentos prescritos na ABNT - NBR13276 (2005). Para produção utilizou-se argamassadeira da marca Fortest e modelo VC 370 com motor de 3/4 HP. A Figura 3.14 ilustra os equipamentos utilizados para produção e moldagem dos corpos de prova de argamassa.



(a) Argamassadeira



(b) Processo de adensamento

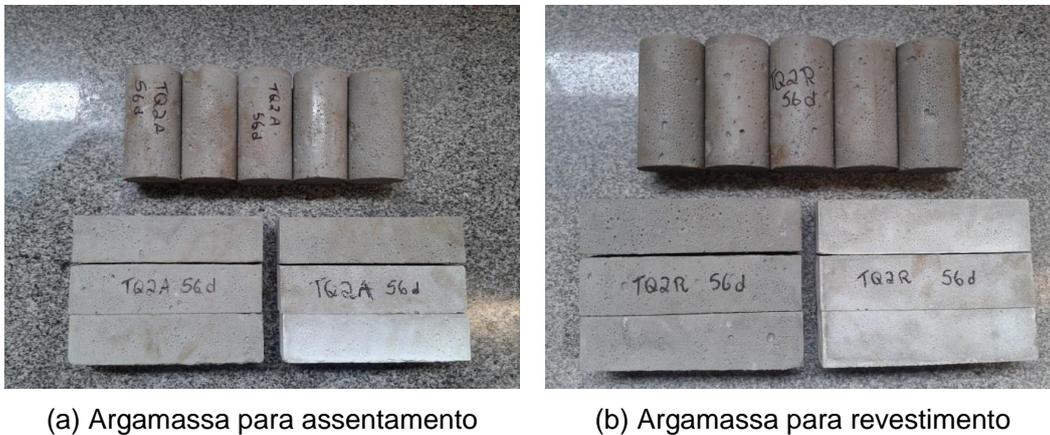


(c) Argamassa moldada

**Figura 3.14.** Preparação e moldagem dos corpos de prova de argamassa

As argamassas foram colocadas nos moldes em duas camadas com auxílio de uma espátula sendo cada camada golpeada 30 vezes em um intervalo de tempo de 30 segundos com o auxílio de uma mesa de fluxo. Após o adensamento, o excesso foi rasado com

uma espátula e os moldes colocados na câmara úmida para cura. A Figura 3.15 ilustra corpos de prova produzidos utilizando como agregados miúdo o quartzito friável.



**Figura 3.15.** Corpos de prova de argamassa

### 3.2.4 Condições de Cura

Imediatamente após a moldagem as fôrmas contendo as argamassas foram colocadas em uma câmara portátil com controle de umidade e temperatura sendo retiradas dos moldes após um período de 48 horas e mantidas na câmara até a idade de realização dos ensaios. A câmara modelo SS600UM da marca Equilam, ilustrada na Figura 3.16, manteve o ambiente saturado (de 98 a 100%) e em temperatura ambiente de 25°C conforme recomendações normativas durante toda a cura dos corpos de prova.



**Figura 3.16.** Câmara úmida portátil

### 3.2.5 Caracterização das Argamassas no Estado Fresco

#### 3.2.5.1 Índice de Consistência

O ensaio para determinação do índice de consistência foi realizado para cada um dos traços propostos no programa experimental a fim de se atingir a consistência recomendada pela ABNT - NBR13276 (2005) com abertura de  $260 \pm 5$  mm e o fator água/aglomerante correspondente.

O ensaio consiste na moldagem da argamassa, produzida com um fator água/aglomerante conhecido, enchendo um molde tronco cônico aplicando com a mesa de fluxo 30 golpes em um intervalo de tempo de 30 segundos medindo o espalhamento do molde tronco cônico de argamassa. A Figura 3.17 a seguir ilustra os procedimentos para o ensaio.



**Figura 3.17.** Determinação do índice de consistência das argamassas

#### 3.2.5.2 Retenção de Água

O método adotado para determinação da retenção de água das argamassas está prescrito na norma ABNT - NBR13277 (1995). Este ensaio correlaciona a capacidade da argamassa de não ceder água ao ambiente ou substrato mantendo sua consistência e plasticidade. Para realização do ensaio é necessária a moldagem das argamassas, com os traços propostos neste trabalho, registrando a massa do molde vazio ( $M_m$ ), a massa do molde com argamassa ( $M_{ma}$ ) e também um conjunto de 12 papéis filtros ( $M_{se}$ ) que foram colocados sobre duas telas de gaze em contato direto com a argamassa. Após dois minutos com a aplicação de uma carga de 2kg apoiado sobre placa rígida de mesmo

diâmetro do molde, registrou-se a massa dos papéis filtros que absorveram a água ( $M_f$ ). O resultado foi calculado pela Equação 3.1 a seguir.

$$Ra = \left[ 1 - \left( \frac{M_f - M_{se}}{AF * (M_{ma} - M_{se})} \right) \right] * 100 \quad (3.1)$$

Onde:

Ra= retenção de água (%)

AF=  $\frac{M_w}{M + M_w}$  é fator água/argamassa fresca

M=soma das massas dos componentes anidros (g)

Mw= quantidade de água adicionada ao traço em massa (g)

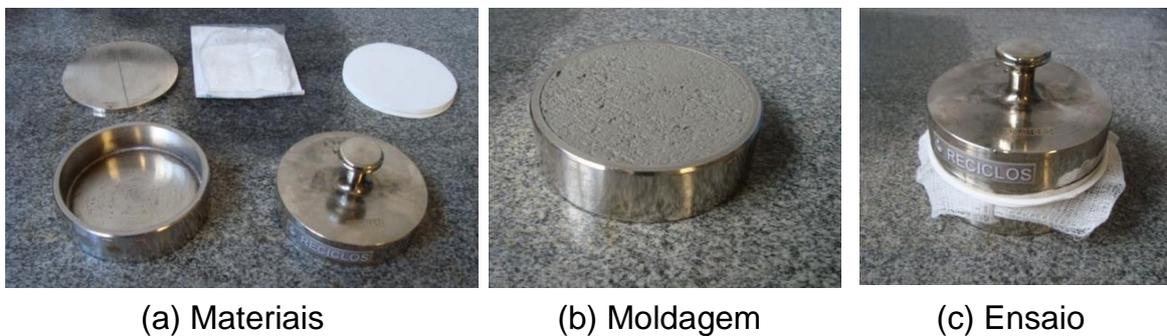
Mm= massa do molde vazio (g)

Mma= massa do molde com argamassa (g)

Mse= massa do conjunto de discos secos (g)

Mf= massa do conjunto de discos molhados de papel filtro (g)

A Figura 3.18 a seguir ilustra os procedimentos para a determinação da retenção de água das argamassas.

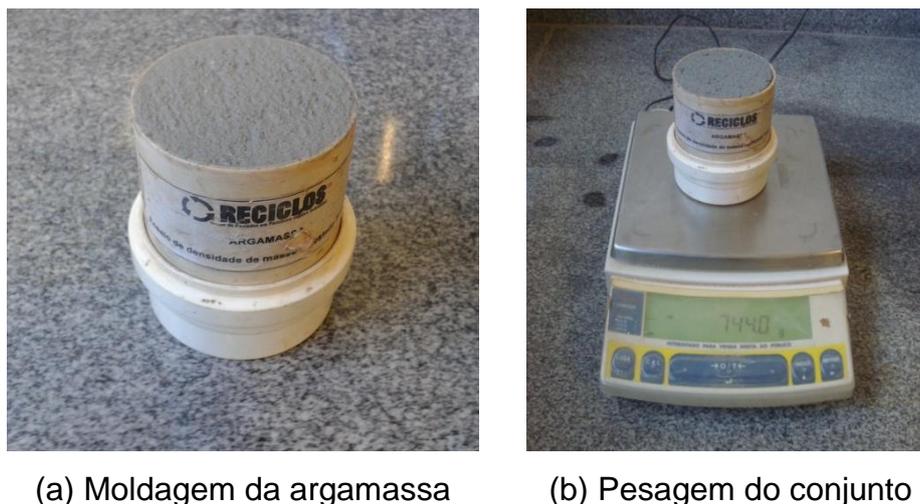


**Figura 3.18.** Determinação da retenção de água das argamassas

### 3.2.5.3 Densidade de Massa no Estado Fresco

A determinação da densidade de massa das argamassas no estado fresco seguindo prescrições da norma ABNT - NBR 13278 (2005). Preliminarmente é necessário pesar o recipiente e executar a verificação de seu volume que deve ser, aproximadamente,

de 400ml. As argamassas foram então preparadas de acordo com os traços dosados, colocadas no molde e registrado a massa do conjunto. O resultado é obtido correlacionando a massa da argamassa pelo volume do recipiente. A Figura 3.19 a seguir ilustra os procedimentos para determinação da densidade de massa das argamassas no estado fresco.



**Figura 3.19.** Determinação da densidade de massa no estado fresco

#### 3.2.5.4 Teor de Ar Incorporado

Para a medição do teor de ar incorporado utilizou-se equipamento específico para este fim fabricado pela Solotest de modelo 1.150.001. Os ensaios foram realizados em acordo com as prescrições do manual do equipamento. O ensaio consiste no preenchimento do molde cilíndrico com a argamassa produzida em acordo com as dosagens adotadas acoplado, posteriormente, um dispositivo de vedação e leitura. Todas as válvulas são então fechadas e o ar é injetado por meio de uma bomba até que atinja a marca inicial de leitura registrada no relógio. Um gatilho é disparado, liberando o ar pressurizado, e mantido pressionado até a estabilização do ponteiro onde é feita leitura que indica o teor de ar incorporado na argamassa. Previamente o equipamento foi calibrado conforme recomendações do fabricante. A Figura 3.20 a seguir ilustra os procedimentos necessários para obtenção do teor de ar incorporado nas argamassas produzidas com agregado natural e agregados de quartzito friável.



(a) Equipamentos

(b) Moldagem da argamassa

(c) Leitura

**Figura 3.20.** Procedimentos para obtenção do teor de ar incorporado

### 3.2.6 Caracterização das Argamassas no Estado Endurecido

#### 3.2.6.1 Absorção de Água e Capilaridade

O método adotado para determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade das argamassas de assentamento e revestimento está prescrito na norma ABNT - NBR 15259 (2005). O ensaio consiste na moldagem de argamassas, preparadas conforme dosagem desenvolvida, e ensaiadas aos 28 dias. Os corpos de prova devem ter suas bases lixadas, suas massas determinadas, e apoiadas em recipiente capaz de manter o nível de água constante e 5mm acima da face de contato com água. A massa de 5 corpos de provas, para cada tratamento, foram determinadas em tempos de 10 e 90 minutos. A absorção de água foi determinada pela Equação 3.2 e o coeficiente de capilaridade pela Equação 3.3, ambas apresentadas a seguir.

$$At = \frac{mt - m_0}{16} \quad (3.2)$$

Onde:

At= absorção de água por capilaridade ( $g/cm^2$ )

mt= massa do corpo de prova em cada tempo (g)

$m_0$  = massa inicial do corpo de prova

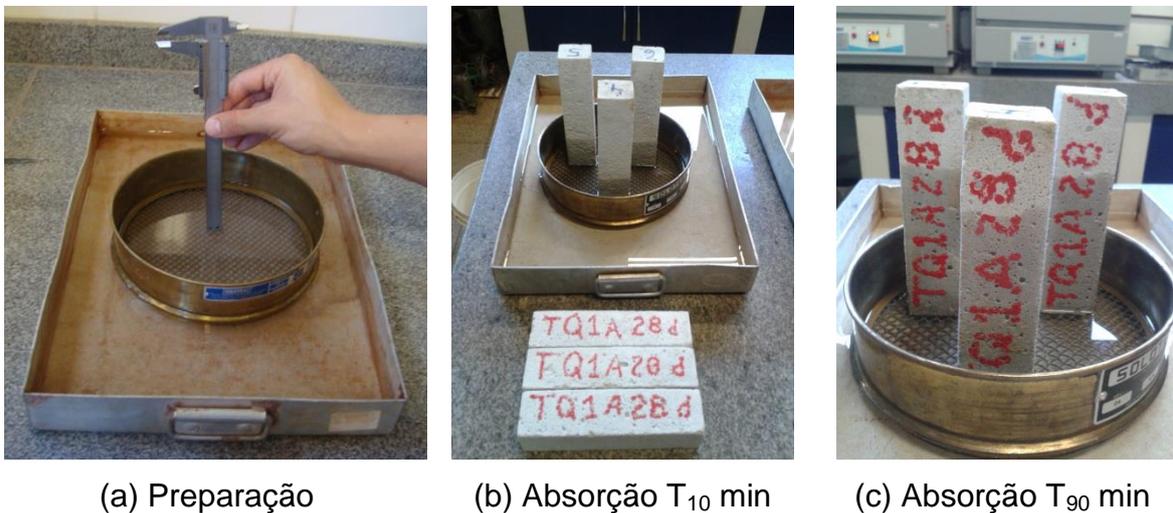
$t$  = tempos de 10 e 90 min (seg)

$l_0$  = área do corpo de prova ( $cm^2$ )

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (3.3)$$

Onde:  $C$  = coeficiente de capilaridade ( $g/dm^2 \cdot min^{0,5}$ )

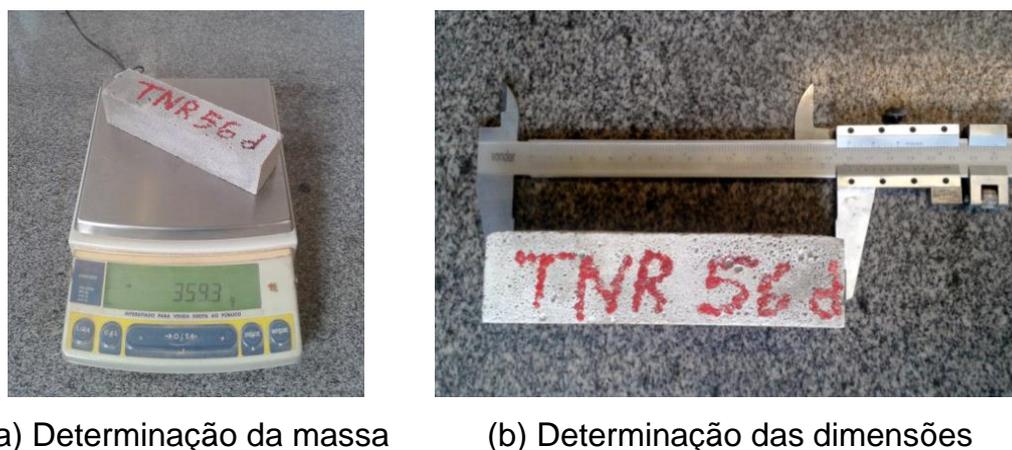
A Figura 3.21 a seguir ilustra os procedimentos para determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade.



**Figura 3.21.** Determinação da absorção de água por capilaridade

### 3.2.6.2 Densidade de Massa no Estado Endurecido

A determinação da densidade de massa das argamassas no estado endurecido tem seus procedimentos prescritos na ABNT - NBR 13280 (2005). Os 5 corpos de prova de cada tratamento, após moldagem e cura por 28 dias, tiveram suas dimensões medidas com auxílio de um paquímetro para obtenção do volume e sua massa registrada com precisão de 0,1g. A densidade é obtida dividindo a massa pelo volume dos corpos de prova. A Figura 3.22 a seguir ilustra os procedimentos para obtenção da densidade de massa no estado endurecido.



(a) Determinação da massa

(b) Determinação das dimensões

**Figura 3.22.** Determinação da densidade de massa no estado endurecido

### 3.2.6.3 Resistência à Tração na Flexão

A norma ABNT - NBR13279 (2005) prescreve os métodos para determinação da resistência à tração na flexão das argamassas produzidas. Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 28 e 56 dias, em 5 corpos de prova prismáticos de 40x40x160mm para cada idade e traço produzidos, utilizando uma prensa Emic, modelo DL 20000, e célula de carga de capacidade de 20 KN que permite maior sensibilidade na aplicação de cargas e obtenção dos resultados.

O ensaio consiste em aplicar um carregamento constante de  $50 \pm 10$  N/s no centro dos corpos de prova bi-apoiados com espaçamento de 10 cm entre os apoios. A Figura 3.23 a seguir ilustra a execução do ensaio e a resistência à tração na flexão pode ser calculada pela Equação 3.4 apresentada a seguir.

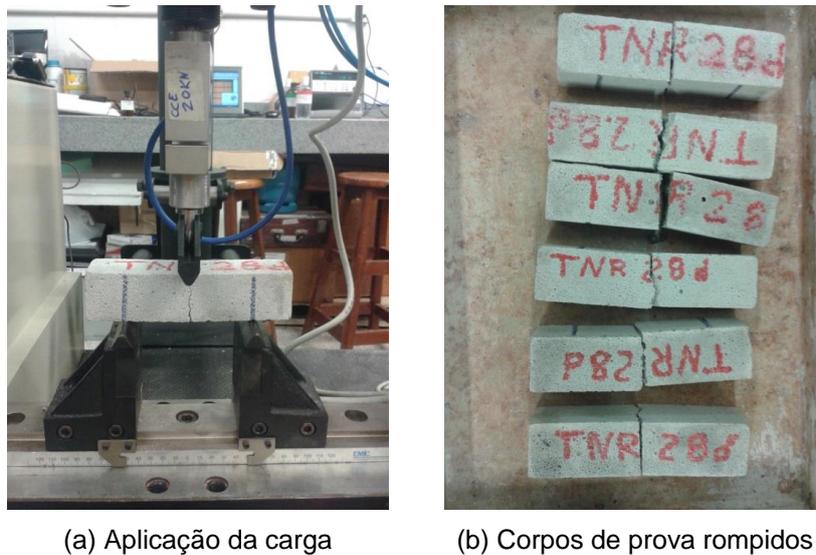
$$R_t = \frac{1,5 * F_t * L}{40^3} \quad (3.4)$$

Onde:  $R_t$  = resistência à tração na flexão (MPa)

$F_t$  = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N)

$L$  = distância entre os apoios (mm)

$40^3$  = volume do corpo de prova ( $mm^3$ )



**Figura 3.23.** Ensaio para resistência à tração na flexão

#### 3.2.6.4 Resistência à Compressão

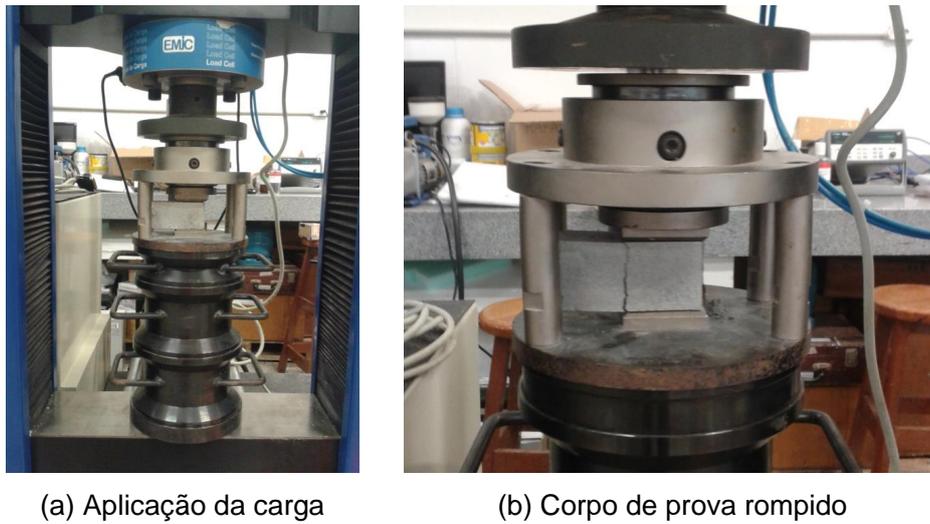
Assim como para tração na flexão a norma ABNT - NBR13279 (2005) prescreve os métodos para determinação da resistência à compressão das argamassas produzidas. Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 28 e 56 dias, em 5 corpos de prova cilíndricos de 50x100mm para cada idade e traço produzidos, utilizando uma prensa Emic, modelo DL 20000, e célula de carga de capacidade de 200 KN que permite maior sensibilidade na aplicação de cargas e obtenção dos resultados. O ensaio consiste em utilizar metade dos corpos de prova prismáticos rompidos nos ensaio de tração na flexão e aplicar um carregamento constante de  $500 \pm 50$  N/s nos corpos de prova devidamente colocados em dispositivo para aplicação das cargas. A resistência à compressão pode ser calculada pela Equação 3.5 apresentada a seguir e a Figura 3.24 ilustra a execução do ensaio.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.5)$$

Onde:  $R_c$  = resistência à compressão (MPa)

$F_c$  = carga máxima aplicada (N)

1600 = área da seção considerada quadrada ( $mm^2$ )



(a) Aplicação da carga

(b) Corpo de prova rompido

**Figura 3.24.** Ensaio para resistência à compressão

### 3.2.6.5 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), obtido para todos os traços produzidos, foi realizado em 5 corpos de prova de argamassa, cilíndricos de 50x100mm, aos 28 dias conforme prescrições da norma ABNT - NBR NM 58 (1996). O equipamento utilizado foi o modelo Tico da fabricante Proceq. A Figura 3.25 a seguir ilustra o equipamento utilizado bem como a realização do ensaio.



(a) Preparação para ensaio

(b) Realização do ensaio

**Figura 3.25.** Realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados foram calculados conforme formulação indica na Equação 3.6.

$$Ed = \gamma * V^2 * \frac{(1 + \nu) * (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (3.6)$$

Onde:

Ed= módulo de elasticidade dinâmico

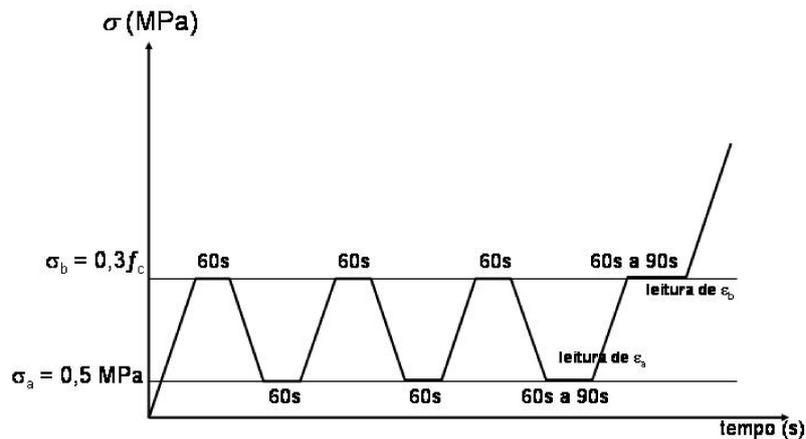
$\gamma$ = densidade de massa no estado endurecido ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

V= velocidade da onda supersônica no sentido longitudinal ( $\text{Km}/\text{s}$ )

$\nu$ = coeficiente de Poisson

### 3.2.6.6 Módulo de Elasticidade Estático

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade das argamassas seguiu as prescrições normativas da ABNT - NBR8522 (2008) e foi realizado aos 28 dias em 4 corpos de prova cilíndricos de 50x100mm, para cada dosagem, utilizando um quinto corpo de prova para obtenção da tensão de ruptura (necessária à realização dos ciclos). O carregamento foi aplicado a uma taxa de  $0,25 \pm 0,05 \text{ MPa}/\text{s}$  utilizando a prensa Emic, modelo DL 20000, e célula de carga de capacidade de 200 KN e a Figura 3.26 a seguir ilustra a representação esquemática do carregamento para determinação do módulo de elasticidade de acordo com a norma.



**Figura 3.26.** Representação esquemática do ciclo de carregamento

Fonte: ABNT - NBR8522 (2008)

Durante a execução do ensaio os corpos de prova sofreram um ciclo de carregamento/descarregamento considerando o patamar inferior cuja tensão seja igual a 0,5 MPa e o patamar superior seja, aproximadamente, 30% da tensão máxima de ruptura. A tensão deve permanecer constante por 60 segundos em cada patamar antes de iniciar novo ciclo. Os resultados para o módulo de elasticidade tangencial inicial ( $E_{ci}$ ), que considera os limites de tensão entre 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura, podem ser calculados de acordo com a Equação 3.7 a seguir.

$$E_{ci} = \frac{(\sigma_b - \sigma_a)}{(\epsilon_b - \epsilon_a)} * 10^{-3} \quad (3.7)$$

Onde:

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade tangencial inicial

$\sigma_b$  = tensão maior ( $\sigma_b = 0,3f_c$ )

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

$\epsilon_b$  = deformação específica média sob a tensão maior

$\epsilon_a$  = deformação específica média sob a tensão básica

A medição das deformações ocasionadas pela aplicação de carga foram obtidas por extensômetro tipo lâmina fabricados pela Excel Sensores, modelo PA-06-800BA-120-L, com fator F.S igual a 2,14. Antes dos extensômetros serem fixados aos corpos de prova, os mesmos foram cuidadosamente preparados, regularizando a superfície com uma fina camada de massa com posterior limpeza utilizando condicionador, neutralizador e álcool isopropílico. Foram fixados dois extensômetros por corpo de prova sendo um na vertical e outro na horizontal realizando o ensaio em quatro corpos de prova por traço na idade de 28 dias. Para aquisição dos dados, os extensômetros foram conectados a um datalogger da marca Agilent (modelo 34972A). A Figura 3.27 a seguir ilustra os procedimentos necessários para determinação do módulo de elasticidade estático das argamassas.



**Figura 3.27.** Determinação do módulo de elasticidade estático

### 3.2.6.7 Expansibilidade

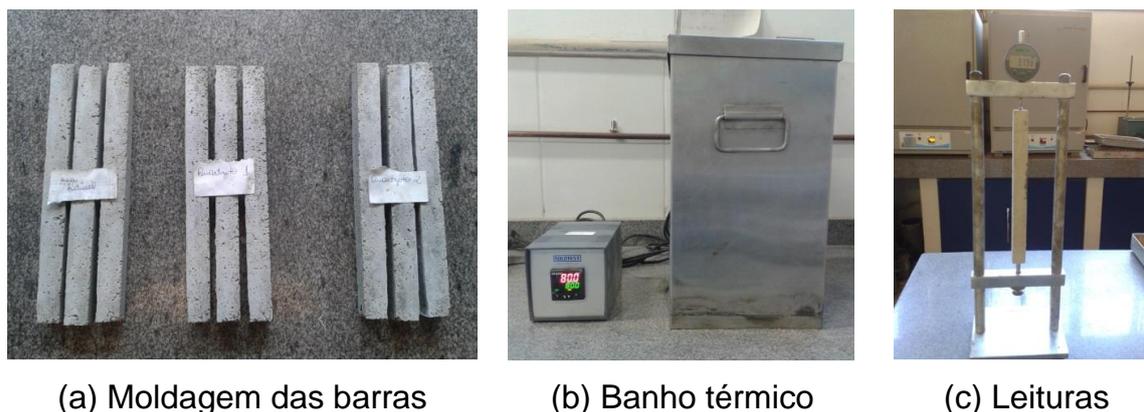
A norma ABNT - NBR15577-4 (2009) prescreve os métodos de ensaio para determinação da expansibilidade em barras de argamassas, verificando a reatividade álcali-agregado. O ensaio consiste de método acelerado para determinar, por meio da variação de comprimento de barras de argamassa, a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva álcali-sílica na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis (sódio e potássio), fazendo-se uso de um cimento padrão prescrito na norma.

Foram utilizados para cada agregado 3 corpos de prova prismáticos, de seção quadrada com 2,50cm de lado e 28,50cm de comprimento. Os corpos de prova continham dois pinos, um em cada extremidade, para a medição das dimensões e suas variações por extensômetro digital de precisão.

As barras de argamassa foram produzidas em acordo com a norma e permaneceram por 24h em câmara úmida para o início da cura. Após a desmoldagem as barras foram colocadas em um banho térmico a  $(80,0 \pm 2,0)^\circ\text{C}$  em água destilada para obtenção das medidas de referência para posterior comparação.

A seguir, as barras foram colocadas em um banho térmico a  $(80,0 \pm 2,0)^\circ\text{C}$  em solução de  $\text{NaOH}$  com concentração molar normativa. Além da leitura de referência, foram efetuadas leituras nas idades de 3, 6, 9, 12, 16, 18, 21, 24, 27 e 30 dias.

A variação de comprimento ou expansão de cada barra de argamassa numa determinada idade representa a diferença entre seu comprimento na idade considerada e seu comprimento inicial (leitura zero), expressa em porcentagem do comprimento efetivo de medida. A Figura 3.28 a seguir ilustra os procedimentos para determinação da expansibilidade das barras de argamassa.



**Figura 3.28.** Procedimentos determinação da expansibilidade das argamassas

### 3.2.7 Caracterização Química das Amostras

Para caracterização química de todos os agregados analisados foram necessárias pequenas quantidades, em estado sólido, com frações granulométricas abaixo de um milímetro conforme especificações ou recomendações dos equipamentos. As amostras foram moídas, em estado bruto, por moinho de alta eficiência utilizando jarros e esferas de aço inoxidável.

Como padronização dos resultados, adotou-se protocolo de cominuição afim de que todas as amostras fossem processadas de forma equivalente. O volume total (esferas + amostra) era igual a  $2/3$  do volume do jarro sendo que 50% do volume do jarro era compostos por esferas (80% de bolas de 12mm e 20% de bolas de 20mm) e o restante pela amostra. O material foi moído por 10 minutos em rotação de 200rpm. O moinho é da marca Retsch, modelo PM100 e pode ser visualizado na Figura 3.29 a seguir.



**Figura 3.29.** Moinho de alta eficiência para preparação de amostras

### 3.2.7.1 Fluorescência de Raios X

Para determinação da composição química das amostras AN, Q1B, Q2B, Q1A e Q2A, foram realizados ensaios de fluorescência de raios X. O equipamento utilizado era da marca Shimadzu, modelo Rayny EDX 720 e o ensaio realizado no vácuo com tempo de análise igual a 100 segundos. As análises de Fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas pelo Laboratório NanoLab pertencente ao Departamento de Metalurgia da Escola de Minas/UFOP.

### 3.2.7.2 Espectroscopia de Absorção Atômica

Para realização da análise de espectroscopia de absorção atômica (EAA) das amostras Q1A e Q2A foi utilizado espectrofotômetro da marca Varina, modelo 725-ES, com fonte de plasma indutivamente acoplada (ICP-OES), pertencente ao Laboratório de Bio&Hidrometalurgia do Departamento de Metalurgia da Escola de Minas/UFOP. Este equipamento é capaz de medir com precisão o teor de metais em amostras sólidas. Este procedimento foi adotado para quantificação mais precisa dos elementos metálicos presente nas amostras de quartzito friável e comparar com os resultados obtidos na FRX.

### 3.2.7.3 Difração de Raios X

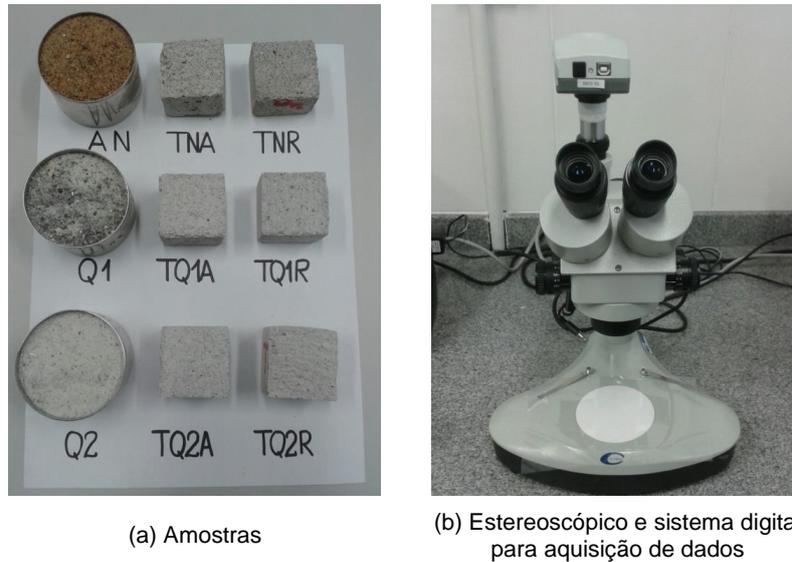
A difração de raios X (DRX) foi utilizada para caracterização mineralógica dos agregados Q1B e Q2B empregados como matéria prima na produção das argamassas. Foram utilizadas as amostras, previamente preparadas, retidas na peneira de 0,075mm e também cominuídas. Foi utilizado um Difratorômetro com radiação  $CuK\alpha$ , tensão de 45 KV, corrente de 40mA, com passo angular de 0,02 e tempo por passo de 20 segundos, com ângulo  $2\theta$  percorrido entre 4 – 80°. O equipamento utilizado pertence ao Laboratório de Difração de Raio X do Departamento de Geologia da Escola de Minas/UFOP.

### 3.2.8 Caracterização Ambiental das Amostras

O procedimento para obtenção de extrato lixiviado, ABNT - NBR10004 (2004), visa classificar o resíduo sólido como classe I – perigoso ou classe II – não perigoso em função da capacidade deste transferir suas substâncias orgânicas e inorgânicas no elemento extrator por meio de dissolução. A metodologia utilizada para obtenção de extrato solubilizado, ABNT - NBR10006 (2004), visa diferenciar o resíduo sólido como classe II A – não inertes ou classe II B – inertes. As argamassas de revestimento (TNR, TQ1R e TQ2R), previamente processadas e com diâmetro inferior a 4,8mm, foram analisados por empresa contratada e certificada para caracterização químico-ambiental. Este tipo de argamassas foi escolhido devido a maior exposição aos agentes externos e de intemperismo.

### 3.2.9 Caracterização Morfológica

A análise da microestrutura dos agregados (AN, Q1A e Q2A) e das argamassas produzidas (TNR, TQ1R, TQ2R, TNA, TQ1A e TQ2A) foram realizadas por microscópio óptico, da marca Olemann e modelo 26600 com ampliação de até 45 vezes, que permitem visualizar a forma dos grãos dos agregados, a distribuição de poros e interface pasta/agregado nas argamassas, entre outros. A Figura 3.30 a seguir ilustra as amostras que foram analisadas bem como o microscópio utilizado.



**Figura 3.30.** Análise morfológica dos agregados e das argamassas

### 3.2.10 Análise Qualitativa da Viabilidade Econômica

Um estudo preliminar da viabilidade econômica seria considerar os preços médios da areia de rio praticados na região metropolitana de Belo Horizonte e adotar um valor médio de venda para o agregado proveniente do quartzito friável. Este estudo levou em conta uma construção de habitação de interesse social, praticados pelo programa do Governo Federal, quantificando o volume de argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos necessárias à sua construção comparando os valores das argamassas produzidas com quartzito em substituição total a areia natural.

# Capítulo 4

## Análise e Discussão dos Resultados

### 4.1 Distribuição Granulométrica

A partir dos resultados obtidos das massas retidas em cada uma das peneiras foi possível traçar a curva ou distribuição granulometria, ilustrada na Figura 4.1, e calcular a dimensão máxima característica (DMC) e o módulo de finura (MF) de cada uma das amostras, analisadas em seu estado bruto e também nas granulometrias usadas nas dosagens para produção das argamassas como parâmetro inicial para enquadramento normativo dos materiais segundo faixas recomendadas para agregados miúdos.

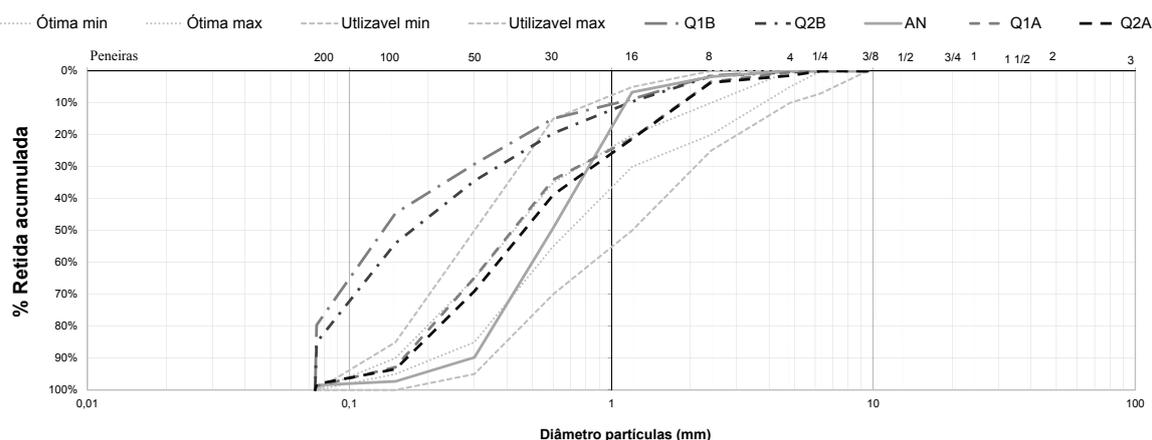


Figura 4.1. Distribuição granulométrica dos agregados miúdos

As amostras de quartzito friável quando no estado bruto, Q1B e Q2B, apresentam distribuição granulométrica fora dos limites prescritos e produzem areias com granulometria excessivamente finas. O agregado natural (AN) apresentou distribuição granulométrica dentro dos limites normativos enquanto os agregados de quartzito friável, Q1A e Q2A, processados segundo protocolo estabelecido no item 3.1.4 ficaram situados dentro dos limites ótimos. Estes resultados sugerem a necessidade de processamento adequado de rejeitos/estéreis para obtenção de agregados quais sejam aplicáveis à produção de argamassas mistas.

A Tabela 4.1 apresentada a seguir indica a classificação dos materiais naturais e estéreis caracterizados segundo suas características granulométricas sendo os limites estabelecidos como zona ótima ( $2,20 \leq MF \leq 2,90$ ), zona utilizável inferior ( $1,55 \leq MF \leq 2,20$ ) e zona utilizável superior ( $2,90 \leq MF \leq 3,50$ ).

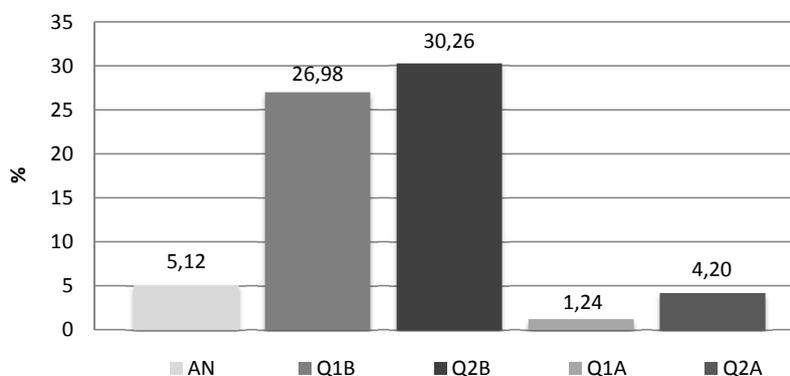
**Tabela 4.1.** Dimensão máxima característica e módulo de finura das amostras

	<b>Q1B</b>	<b>Q2B</b>	<b>AN</b>	<b>Q1A</b>	<b>Q2A</b>
<b>MF</b>	0,99	1,2	2,45	2,2	2,3
<b>DMC (mm)</b>	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4

Desta forma pode-se afirmar que os agregados de quartzito, quando no estado bruto, produzem areias com granulometria excessivamente finas (fora dos limites prescritos) não sendo, portanto, indicadas para o uso na construção civil. No entanto, após o processo de segregação proposto neste trabalho as amostras Q1A e Q2A provenientes do quartzito friável, como também o agregado natural, apresentaram módulo de finura e distribuição dentro dos limites indicados pela NBR, o que os tornam agregados miúdos para utilização em argamassas mistas. Após aplicados os protocolos de processamento para obtenção dos agregados miúdos, a dimensão máxima característica dos materiais foi de 2,4mm.

## 4.2 Teor de Material Pulverulento

Conforme observado no ensaio de granulometria as amostras de quartzito friável no estado bruto apresentam valores excessivos de materiais finos, menores que 0,075mm, mas após aplicação dos protocolos de processamento para obtenção dos agregados miúdos, estes valores reduzem substancialmente de modo que o material Q1A apresenta o menor teor de materiais finos (1,24%), seguido do Q2A (4,20%) e AN (5,12%). A Figura 4.2 a seguir, ilustra o teor de material pulverulento encontrado nas amostras em porcentagem.



**Figura 4.2.** Teor de material pulverulento dos agregados

Neville (1982) afirma que uma grande quantidade material pulverulento pode prejudicar inclusive a hidratação do cimento pois, devido a finura das partículas e sua elevada área superficial, demandam mais água para molhagem das partículas aumentando a relação água/cimento e diminuindo a resistência.

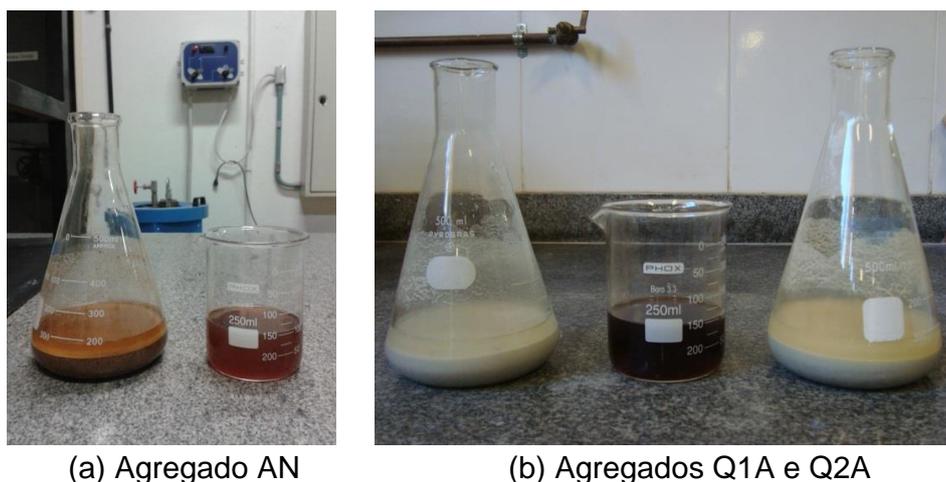
Silva (2006) conclui que o material pulverulento influencia no índice de vazios, nas resistências de aderência, compressão e tração na flexão, na permeabilidade e está relacionado a incidência de fissuras nos revestimentos.

A norma ABNT - NBR 7211 (2005) fixa o limite de finos em até 5%. Afirma-se que a presença de material pulverulento nos agregados miúdos, neste percentual, causa efeitos positivos alterando as massas específicas e unitárias dos materiais, o consumo de agregado e aglomerante, auxiliando na plasticidade e coesão da mistura, aumento na resistência mecânica e durabilidade devido ao fechamentos dos poros (Santos, 2014).

### 4.3 Impurezas Orgânicas

Elementos nocivos como as impurezas orgânicas (folhas, húmus, argilas e outros) podem prejudicar a resistência mecânica das argamassas, pois interferem nas reações químicas resultantes da hidratação do cimento. De acordo com Neville e Brooks (2013) as impurezas orgânicas são resultantes da decomposição de vegetais e como manifestações patológicas pode-se citar a redução da pega, do endurecimento das argamassas, perda de resistência, expansão, deslocamento do substrato, má aderência e eflorescência.

A análise qualitativa para presença de matérias orgânicas nos agregados miúdos, ABNT - NBR NM 49 (2001), permite observar comparativamente, a existência ou não de matérias orgânicas em limites indesejáveis. A Figura 4.3 a seguir ilustra os resultados obtidos para o ensaio de impurezas orgânicas.



**Figura 4.3.** Impurezas orgânicas das amostras

Pode-se observar que o agregado natural apresentou pequena quantidade de impureza orgânica enquanto as amostras provenientes do quartzito friável praticamente não indicaram presença de impurezas, sendo que todas as soluções preparadas com os agregados apresentaram coloração inferior a solução padrão indicando que os agregados não apresentam quantidade suficiente para provocar patologias e, portanto, indicadas para o uso na produção de argamassas.

## 4.4 Inchamento do Agregado Miúdo

Os agregados miúdos tem grande capacidade de reter água e essa capacidade altera o seu volume aparente em decorrência da presença de água, pois a tensão superficial da água mantém as partículas separadas, sendo que para cada teor de umidade ocorre uma respectiva variação volumétrica (Sabbatini, 1986).

Tendo em vista que, embora todos os procedimentos e análises tenham sido conduzidos em ambiente controlado em laboratório, importa indicar essa propriedade para aplicação deste novo material sob forma de agregado em canteiros de obras. A Tabela 4.2 a seguir apresenta a umidade crítica ( $U_c$ ) e o coeficiente de inchamento máximo (CI) para cada um dos agregados adotados neste trabalho.

**Tabela 4.2.** Umidade crítica e teor de inchamento dos agregados miúdos

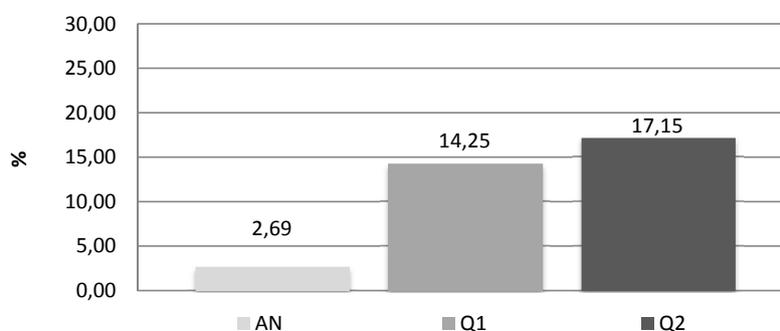
Amostra	$U_c$ (%)	CI
AN	5,15	1,37
Q1A	5,54	1,50
Q2A	5,27	1,55

Os agregados provenientes do quartzito friável apresentam resultados mais elevados sendo que o agregado Q2A apresentou maior coeficiente de inchamento (55%), seguido do agregado Q1A (50%) e do agregado natural (37%) com umidades críticas próximas de 5%. O aumento do coeficiente de inchamento não inviabiliza o uso dos agregados de quartzito como agregado para produção de argamassas mas, quando dosados em canteiros, requerem maior atenção ao fenômeno e ao processo de estocagem.

## 4.5 Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis

O resultado para o teor de argila em torrões e de materiais friáveis podem ser visualizados na Figura 4.4 a seguir. Nota-se que o agregado AN apresenta teor inferior aos limites normativos (2,69%) mas que os agregados Q1 e Q2 provenientes do quartzito friável apresentam valores bem superiores (14,25% e 17,15%, respectivamente). De-

vido ao seu processo geológico com elevado processo de intemperismo, as amostras de quartzito friáveis são mais sensíveis e se desfazem ao toque com maior facilidade.



**Figura 4.4.** Teor de torrões de argila e partículas friáveis

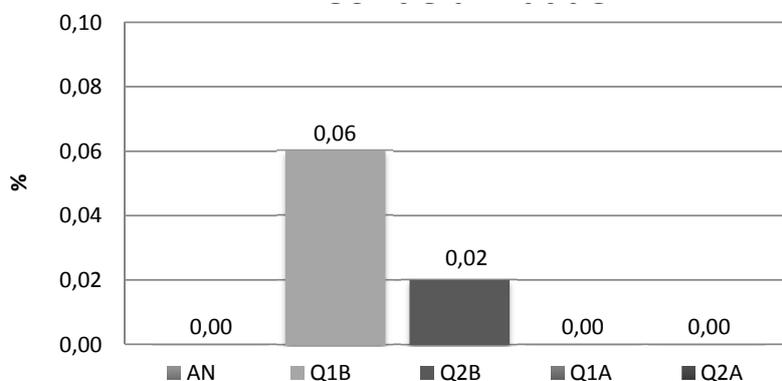
Os materiais friáveis se desfazem com maior facilidade transformando-se em partículas finas que, de acordo com Neville (1982), são prejudiciais pois revestem o agregado de forma semelhante às argilas aumentando a necessidade de água (aumento da área superficial), alterando a trabalhabilidade da argamassa para um mesmo fator água/aglomerante e reduzindo sua resistência.

## 4.6 Teor de Umidade Total

O teor de umidade pode ser definido para qualquer condição como: natural, seca ao ar, seca em estufa, saturada e saturada de superfície seca. Sendo que a massa de água está correlacionada a diferença de massa entre as condições sendo todas elas importantes para a aplicação na construção civil. De acordo com Neno (2010) a taxa de absorção de água e umidade são propriedades de pouca influência quando utiliza-se agregados naturais pois apresentam baixa porosidade mas estas características tornam-se bastante relevantes quando utilizam-se agregados artificiais.

Segundo Andrade (1997) a umidade superficial e a absorção de água pelo agregado são parâmetros de grande importância pois interferem na quantidade de água de amassamento. Neville (1982) afirma que a absorção de água e umidade dos agregados podem influenciar na trabalhabilidade das argamassas, sendo necessários ajustes nas dosagens para redução da variabilidade das propriedades no estado fresco e endurecido.

A Figura 4.5 a seguir ilustra os resultados para o teor de umidade total dos agregados miúdos.



**Figura 4.5.** Teor de umidade total dos agregados

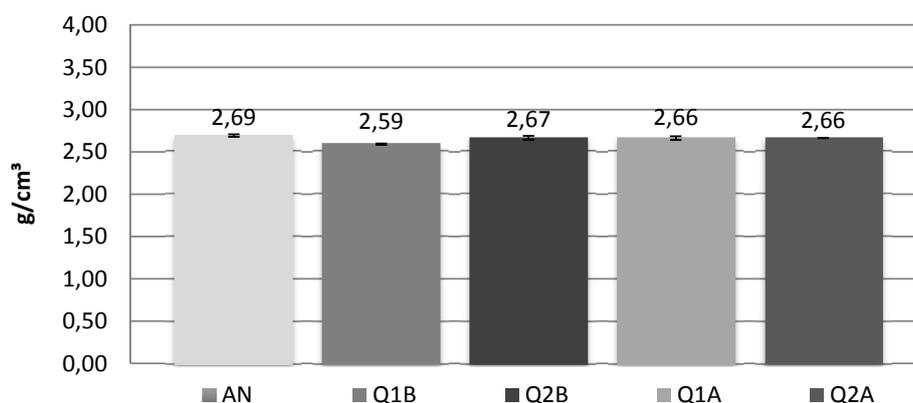
Os valores nulos obtidos para teor de umidade, segundo método aplicado, indicam estabilidade dos materiais na presença da umidade ambiente, o que representa maior estabilidade dimensional e melhores características para emprego como agregados em argamassas mistas. Portanto não foi possível a obtenção da condição saturada de superfície seca dos agregados, condição necessária para a obtenção de outros parâmetros como absorção de água, absorção efetiva e umidade superficial.

## 4.7 Massa Específica

A partir deste parâmetro pode-se estimar a densidade da argamassa que será produzido escolhendo agregados mais leves ou densos de acordo com a finalidade a que se pretende. A Figura 4.6 a seguir apresenta os resultados para a massa específica dos agregados adotados neste trabalho.

Os valores obtidos para os agregados AN, Q1B, Q2B, Q1A e Q2A foram próximos indicando que o agregado não irá interferir nos parâmetros de interesse das argamassas, comparativamente aos agregados naturais.

O processo de peneiramento não alterou significativamente a massa específica das areais produzidas com quartzito friável, onde houve uma redução de 0,4% para o agregado Q1A e um aumento de 2,7% para o agregado Q2A.



**Figura 4.6.** Massa específica dos agregados

A massa específica encontrada para as amostras de quartzito friável e areia natural conferem com os valores obtidos para muitas rochas comumente utilizadas na construção civil (como granitos, arenitos e calcários) que varia entre 2,6 a 2,7  $g/cm^3$  (Mehta e Monteiro, 2008).

## 4.8 Massa Unitária

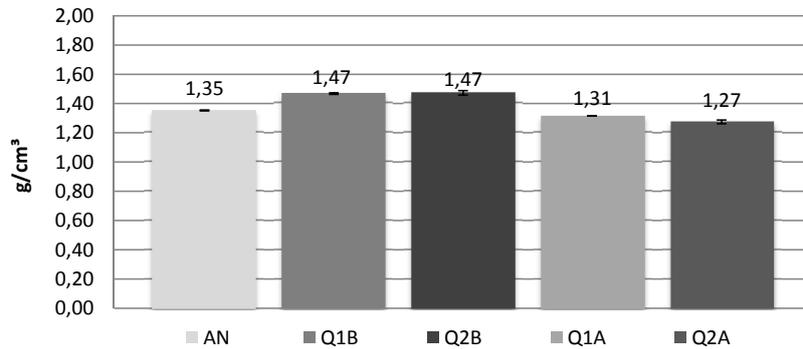
Para o desenvolvimento das dosagens e aplicação dos produtos, além da massa específica, é necessário conhecer a massa unitária, ou seja, a massa das partículas dos agregados que ocupam determinado volume.

Este resultado é especialmente importante no setor da construção civil em função do grande número de empresas que executam a dosagem dos materiais por volume com o auxílio de padiolas.

A Figura 4.7 a seguir ilustra o resultado obtido para os agregados estudados.

As amostras de quartzito quando no estado bruto, Q1B e Q2B, apresentaram o mesmo valor ( $1,47 g/cm^3$ ) sendo mais pesados que as amostras de quartzito após o peneiramento (Q1A e Q2A). Isto se deve ao fato da retirada das partículas finas ( $< 0,075mm$ ) que preenche os vazios deixados entre os agregados.

O agregado AN apresentou massa unitária ( $1,35g/cm^3$ ), valor este ligeiramente superior aos obtidos nas amostras de Q1A ( $1,31 g/cm^3$ ) e Q2A ( $1,27 g/cm^3$ ).



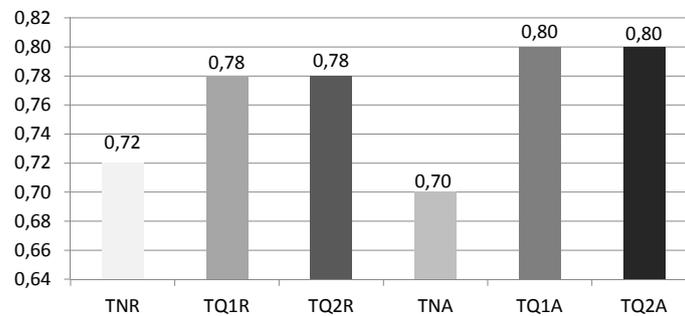
**Figura 4.7.** Massa unitária dos agregados

A massa unitária encontrada para as amostras de quartzito friável e areia natural conferem com os valores obtidos para muitas rochas comumente utilizadas na construção civil cujo peso normal varia entre 1,3 a 1,7  $g/cm^3$  (Mehta e Monteiro, 2008).

## 4.9 Fator Água/Aglomerante e Índice de Consistência

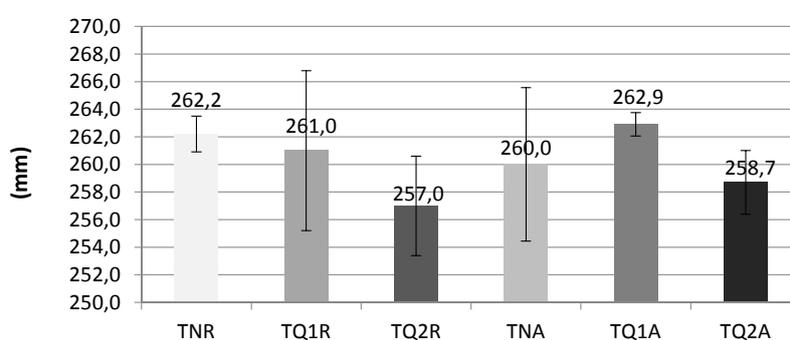
O teor de água/aglomerante (a/a) para a produção das argamassas de assentamento e revestimento foi dosado para obtenção de um índice de consistência de aproximadamente 260 mm, sendo este um valor de referência recomendado por norma, e desenvolvidos com o agregado natural e com os agregados de quartzito friável.

Os resultados podem ser visualizados na Figura 4.8 a seguir.



**Figura 4.8.** Fator água/aglomerante das argamassas

As argamassas de revestimento e assentamento produzidas com cada um dos agregados (AN, Q1A e Q2A), demandaram mesma quantidade de água. A quantidade de água necessária para produção das argamassas foram idênticas para os agregados de quartzito que, comparativamente, necessitam de mais água que o agregado AN. Estes resultados sugerem um maior teor de finos nos agregados Q1A e Q2A. O índice de consistência obtidos para cada uma das argamassas de assentamento e revestimento podem ser visualizadas na Figura 4.9 a seguir.



**Figura 4.9.** Índice de consistência das argamassas

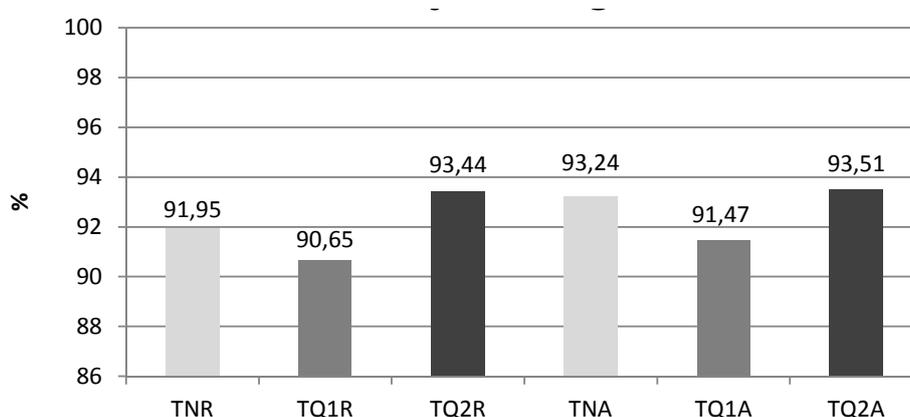
Os índices de consistência obtidos para as argamassas de revestimento e assentamento produzidas com todos os agregados apresentaram pequenas variações, o que sugere mesma fluidez se considerados as variações nos fatores (a/a) de cada argamassas e o teor de finos dos materiais. Além disso o aumento no teor de cal, nas argamassas de assentamento, pode ter contribuído para a formação de argamassas mais plásticas. Embora a proporção de aglomerantes/agregados permaneça 1:3, em ambas as argamassas, a incorporação de maior teor de cal aumenta a quantidade de partículas mais finas na argamassa, que irão demandar maior quantidade de água, e também facilitar a sua fluidez.

Como o fator (a/a) foi mantido entre as argamassas produzidas com os agregados Q1A e Q2A, tanto para assentamento como para revestimento, foi possível comparar a demanda de água e observar que as argamassas produzidas com Q2A demandam maior fator (a/a) para obterem um mesmo índice de consistência das argamassas produzidas com Q1A.

## 4.10 Retenção de Água das Argamassas

Especialmente para as argamassas, o uso da cal como aglomerante traz benefícios que a tornam imprescindível na construção civil destacando-se a trabalhabilidade, maior plasticidade, menor módulo de elasticidade e maior retenção de água (Santos, 2014).

A Figura 4.10 a seguir ilustra os resultados obtidos para as argamassas produzidas sendo que todas as argamassas receberam a mesma classificação, U5, conforme os limites estabelecidos na ABNT - NBR13281 (2005) exceto a argamassa TQ1R que foi classificada como U4. Estes resultados indicam alta capacidade de retenção de água das argamassas.



**Figura 4.10.** Retenção de água das argamassas

Como esperado o aumento no teor de cal como aglomerante permitiu maior retenção de água nas argamassas de assentamento embora os valores obtidos sejam ligeiramente superiores às argamassas de revestimento (aproximadamente 1,4% para o agregado AN; 0,9% para o agregado Q1A e 0,1% para o agregado Q2A).

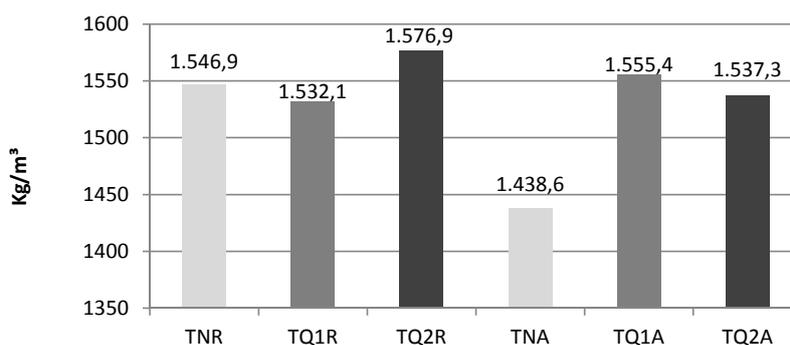
A finura dos materiais também é atribuída relação com a capacidade de retenção de água das argamassas de modo que quanto maior a finura, maior a área específica e maior a capacidade de retenção. Porém um alto teor de finos pode ser prejudicial às argamassas quanto à retração por secagem (Carneiro e Cincotto, 1999).

Segundo Gomes (2005) agregados que apresentam maiores teores de partículas finas podem ser alternativa para aumentar a retenção de água nas argamassas pois elas

auxiliam no confinamento ou aprisionamento do líquido (Gomes, 2005). Comparando os materiais as argamassas de assentamento e de revestimento apresentaram maior retenção de água para os traços produzidos com o agregado Q2A, seguido do agregado AN sendo o agregado Q1A o que apresentou os menores valores. Este resultado é condizente com os valores obtidos para o ensaio de teor de material pulverulento.

### 4.11 Densidade de Massa no Estado Fresco

O resultado para o ensaio de densidade de massa no estado fresco, realizado em acordo com as prescrições da norma ABNT - NBR 13278 (2005), podem ser visualizados na Figura 4.11 a seguir.



**Figura 4.11.** Densidade de massa no estado fresco

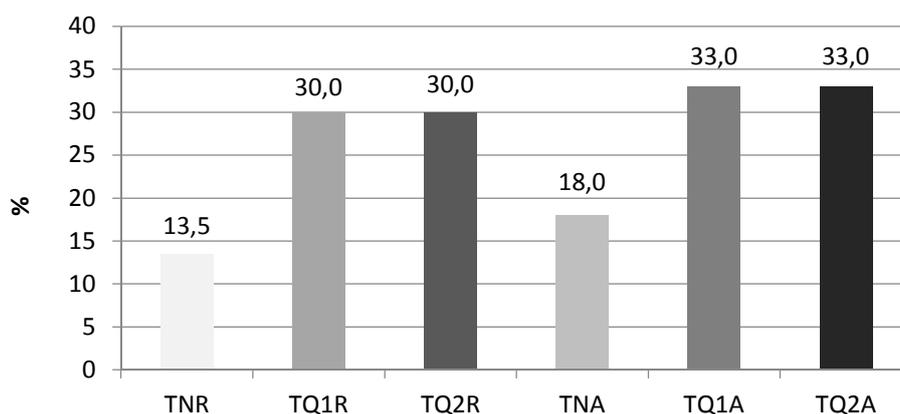
As argamassas de assentamento e revestimento produzidas com o agregado AN e com os agregados Q1A e Q2A apresentaram valores próximos em torno de  $1500\text{Kg}/\text{m}^3$  exceto para o traço TNA cujo resultado foi, aproximadamente,  $1440\text{Kg}/\text{m}^3$ .

Segundo Silva (2006) o aumento na relação cal/cimento diminui a densidade da argamassa e aumenta o consumo de água. Martins Neto e Djanikian (1999) apresentam resultados para a densidade de massa de argamassas dosadas em volume com proporção de 1:1:6 como sendo, aproximadamente,  $1950\text{Kg}/\text{m}^3$  com um teor de ar incorporado de 4,7% enquanto a argamassa de assentamento dosada em volume 1:2:9 apresentou a mesma densidade mas com um teor de ar incorporado de 5,7%.

Carasek (1996) encontrou valores semelhantes de aproximadamente  $2000\text{Kg}/\text{m}^3$  para teores de ar incorporado entre 4-5%. Desta forma os resultados mais baixos para as densidades de massa obtidos para as argamassas de assentamento e revestimento justificam-se pelos teores de ar incorporado mais elevados.

## 4.12 Teor de Ar Incorporado

Este parâmetro depende da relação água/aglomerante, do volume ocupado pelo agregado, dos processos de mistura e compactação e dos aglomerantes utilizados, influenciando na consistência e na resistência mecânica das argamassas. A Figura 4.12 a seguir apresenta os resultados obtidos para o teor de ar incorporado.



**Figura 4.12.** Teor de ar incorporado nas argamassas

O teor de ar incorporado foram idênticos para as argamassas produzidas com quartzo friável sendo 30% e 33% para as argamassas de revestimento e assentamento, respectivamente. A argamassa TNR apresentou 13,5% de ar incorporado enquanto a argamassa TNA obteve 18%. Devido ao aumento do teor de cal como aglomerante, as argamassas de assentamento apresentaram maior teor de ar incorporado em relação as argamassas de revestimento (aumento de 4,5% para AN e 3% para Q1A e Q2A).

Gomes e Neves (2002) fixam em sua metodologia de dosagem valores para o teor de ar incorporado entre 8% e 17% considerando uma retenção de água superior a 75% e o uso de agregados naturais. Segundo Silva (2006) o teor de ar incorporado

para argamassas correntes, sem aditivos, fica em torno dos 6%. Elevados teores de ar incorporado nas argamassas podem ser prejudiciais pois as bolhas de ar consomem os espaços que seriam ocupados pela pasta reduzindo os produtos de hidratação e promovendo redução da capacidade mecânica e de aderência (Silva et al., 2005). Ainda segundo o autor, o ar incorporado melhora certas características das argamassas mesmo que em teores mais elevados (25%) mas alerta sobre a possibilidade de redução da resistência mecânica.

### 4.13 Absorção de Água por Capilaridade

A Figura 4.13 a seguir ilustra os resultados para absorção de água dos corpos de prova nos tempos de 10 e 90 min e a Figura 4.14 o coeficiente de capilaridade das argamassas.

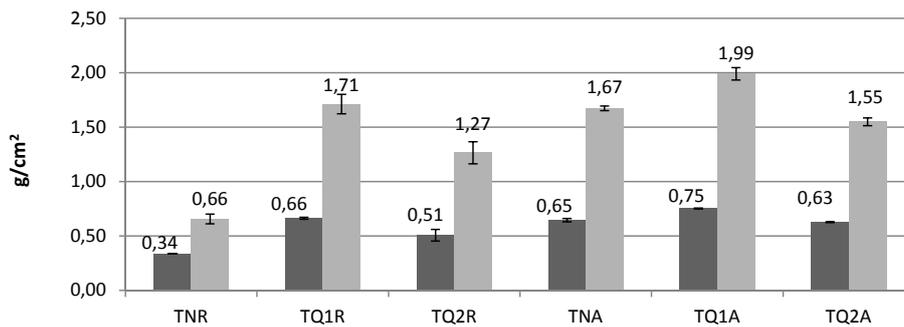


Figura 4.13. Absorção de água por capilaridade

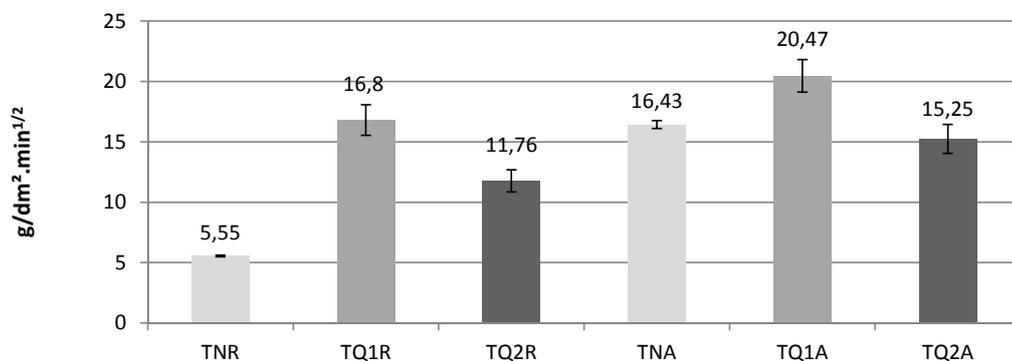


Figura 4.14. Coeficiente de capilaridade

As argamassas de assentamento, devido ao maior teor de cal, apresentam maiores teores de absorção e também coeficiente de capilaridade. De acordo com os resultados verificou-se que as argamassas produzidas com os agregados de quartzito friável absorvem mais água por capilaridade que os traços naturais.

As argamassas de revestimento e assentamento produzidas com o agregado Q1A apresentaram valores mais elevados que os demais agregados para a absorção de água e coeficiente de capilaridade. Este resultado pode estar associado ao maior teor de partículas finas dos agregados de quartzito. De forma análoga, os coeficientes de capilaridade também foram maiores para os traços TQ1R e TQ1A.

Com exceção da argamassa de revestimento TNR, que foi classificada como C4, as demais argamassas foram classificadas como C6 de acordo com a ABNT - NBR13281 (2005). Este resultado indica que as argamassas TNA, TQ1A, TQ2A, TQ1R e TQ2R são muito absorptivas.

#### 4.14 Densidade de Massa no Estado Endurecido

Segundo de Freitas (2010) o valor da densidade de massa da argamassa é um indicativo da compactação resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto. O resultado para o ensaio de densidade de massa no estado endurecido, realizado em acordo com as prescrições da norma ABNT - NBR 13280 (2005), podem ser visualizados na Figura 4.15 a seguir.

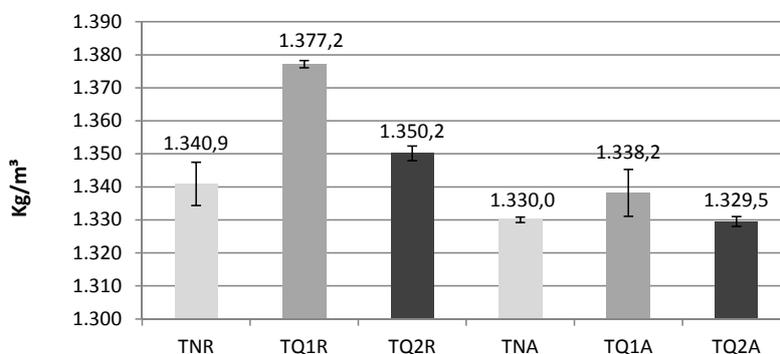


Figura 4.15. Densidade de massa no estado endurecido

O uso de cal na produção de argamassas mistas reduz a densidade das argamassas em função do aumento de vazios pela incorporação de ar. Desta forma, como esperado, as argamassas de assentamento apresentaram menor densidade no estado endurecido em relação as argamassas de revestimento.

As argamassas de assentamento e revestimento permaneceram dentro de uma mesma classe, para todos os traços, sendo classificadas como M3 de acordo com a norma ABNT - NBR13281 (2005).

As argamassas produzidas com o agregado Q1A apresentaram maior densidade no estado endurecido que as argamassas produzidas com Q2A e AN, onde os resultados foram próximos. Considerando que o processo de moldagem foi padronizado e que as argamassas produzidas com Q1A e Q2A tiveram o mesmo teor de ar incorporado, este resultado induz que as argamassas TQ1R e TQ1A possuem estruturas mais rígidas devido a maior intensidade dos produtos de hidratação.

#### 4.15 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados obtidos para a resistência mecânica de tração na flexão das argamassas de assentamento e revestimento podem ser visualizados na Figura 4.16 a seguir.

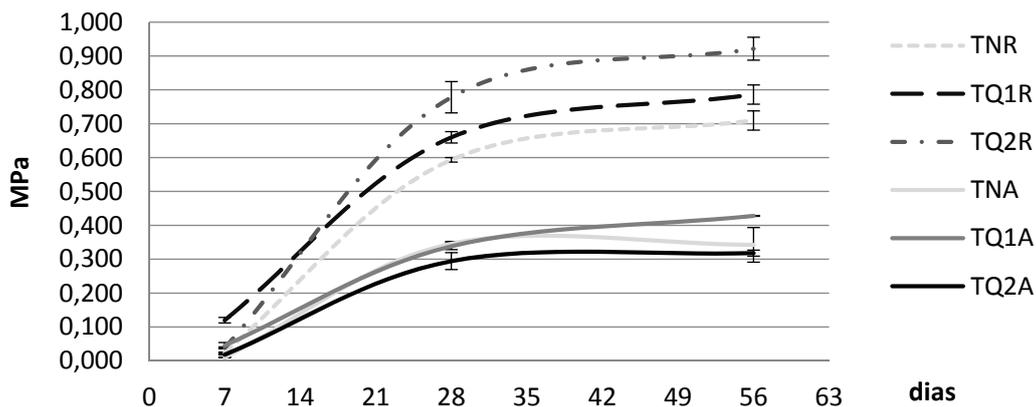


Figura 4.16. Resistência à tração na flexão

A incorporação de cal para produção de argamassas mistas ajuda nas características das argamassas (aumento da retenção de água, aumento no teor de ar incorporado,

maior plasticidade, dentre outros) conferindo maior trabalhabilidade entretanto reduz a resistência mecânica. Desta forma os resultados obtidos para as argamassas de revestimento, que apresentam menor teor de cal, foram mais elevados que as dos resultados obtidos para as argamassas de assentamento. Aos 56 dias a diferença na resistência à tração na flexão das argamassas de assentamento para a de revestimento foram de, aproximadamente, 207,3%; 183,6% e 289,6%, para as argamassas produzidas com os agregados AN, Q1A e Q2A, respectivamente.

As argamassas de assentamento apresentaram resistência inferior a 0,5 MPa aos 56 dias sendo classificadas como R1 enquanto as argamassas de revestimento obtiveram resistência inferior a 1,0 MPa sendo, também, classificadas como R1 de acordo com a norma ABNT - NBR13281 (2005).

As argamassas produzidas com quartzito friável desenvolveram maior resistência à tração na flexão em todas as idades analisadas sendo o TQ2R o mais resistente para as argamassas de revestimento e o TQ1A para as argamassas de assentamento. Este resultado pode estar associado ao maior teor de partículas finas que preencheram os poros produzindo uma matriz mais resistente.

## 4.16 Resistência à Compressão

Os resultados obtidos para a resistência mecânica de tração na flexão das argamassas de assentamento e revestimento podem ser visualizados na Figura 4.17 a seguir.

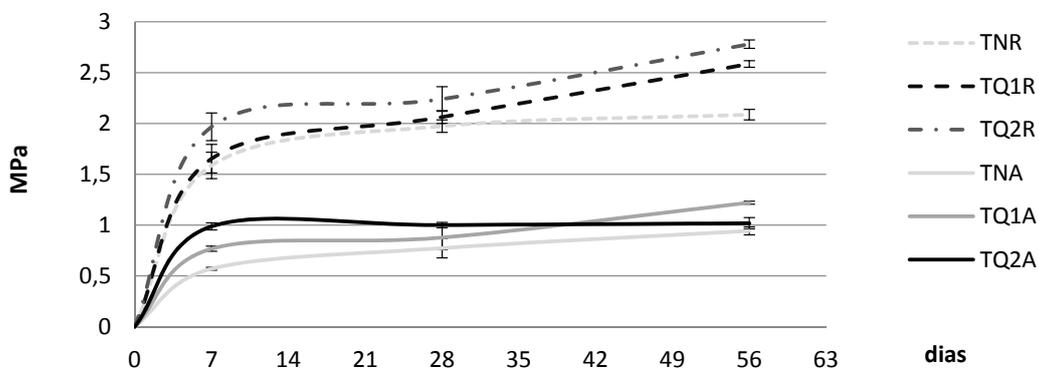


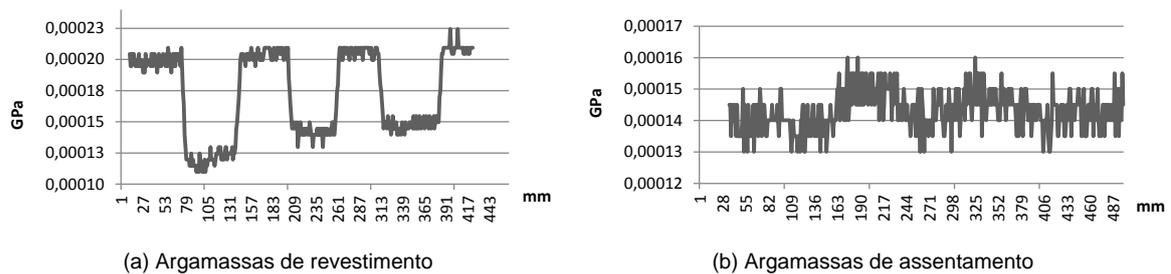
Figura 4.17. Resistência à compressão

A incorporação de cal reduz a resistência mecânica tanto na tração na flexão quanto na compressão. Desta forma os resultados obtidos onde para as argamassas de revestimento foram mais elevados que as os resultados obtidos para as argamassas de assentamento. Aos 56 dias a diferença na resistência à compressão das argamassas de assentamento para a de revestimento foram de, aproximadamente, 221,3%; 211,9% e 273,1%, para as argamassas produzidas com os agregados AN, Q1A e Q2A, respectivamente. As argamassas de assentamento apresentaram resistência à compressão inferior a 1,5 MPa aos 56 dias sendo classificadas como P1 enquanto as argamassas de revestimento obtiveram resistência inferior a 3,0 MPa sendo classificadas como P2 de acordo com a norma ABNT - NBR13281 (2005).

As argamassas produzidas com quartzito friável desenvolveram maior resistência à compressão em todas as idades analisadas sendo o TQ2R o mais resistente para as argamassas de revestimento e o TQ1A para as argamassas de assentamento. Este resultado pode estar associado ao maior teor de partículas finas que preencheram os poros produzindo uma matriz mais resistente.

## 4.17 Módulo de Elasticidade Estático

A Figura 4.18 a seguir ilustra o digrama tensão x deformação das argamassas de assentamento e revestimento obtidos pelo método de elasticidade estático.



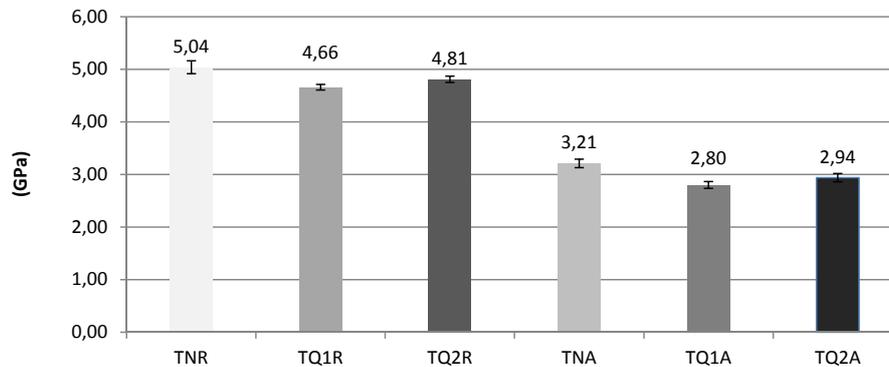
**Figura 4.18.** Diagrama Tensão x Deformação para as argamassas

A norma ABNT - NBR8522 (2008) estabelece os critérios para realização deste ensaio com ciclos de carregamento até um limite superior de 30% da carga máxima

de ruptura e um descarregamento até o limite inferior de 0,5 MPa. As argamassas de assentamento e revestimento confeccionadas não desenvolveram competências mecânicas suficientes para se obter patamares distintos neste ciclos. Para as argamassas de revestimento, que apresentaram maior resistência a compressão, foi possível identificar os patamares embora as oscilações e ruídos tenham sido elevadas. Para as argamassas de assentamento não foi possível identificar os patamares. Além das baixas cargas de ruptura outros fatores como a sensibilidade da célula de carga, espessura da massa regularizadora da superfície, perpendicularidade dos extensômetros, soldagem ou outras influências operacionais podem ter contribuídos para as interferências na leitura dos sinais.

## 4.18 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico pode ajudar a prever a capacidade do revestimento de absorver deformações sendo que quanto menor for o módulo maior será a capacidade do revestimento de absorver tais deformações. A Figura 4.19 a seguir ilustra os resultados para o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.



**Figura 4.19.** Módulo de elasticidade dinâmico

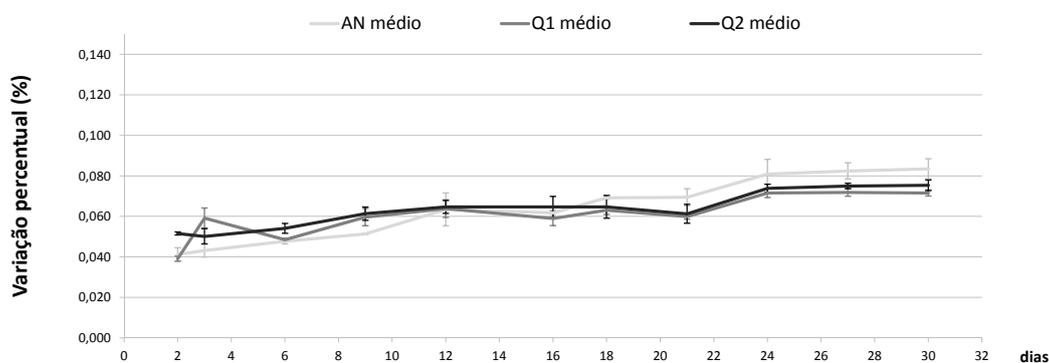
O uso de cal na produção de argamassas mistas reduz esta propriedade em função do aumento de vazios pela incorporação de ar. Desta forma, como esperado, as argamassas de assentamento apresentaram módulo de elasticidade dinâmico menor que as argamassas de revestimento. De acordo com Gomes (2005), argamassas que apre-

sentam módulo de elasticidade dinâmico inferiores a 7,0 GPa tem baixa fissurabilidade destacando que valores elevados podem indicar estruturas muito rígidas não permitindo acomodações necessárias. Todas as argamassas apresentaram módulo de elasticidade abaixo de 5,0 GPa indicando grande capacidade de absorver as deformações.

Quando comparamos o resultados obtidos para as diferentes argamassas percebe-se que o comportamento foi similar para as argamassas de assentamento e revestimento onde o agregado AN produziu argamassas com maior módulo de elasticidade em relação os agregados Q1A e Q2A, que apresentaram mesmo módulo de elasticidade. Um aumento do módulo de elasticidade dinâmico pode ser observado quando as argamassas apresentam estruturas mais rígidas, com maior densidade no estado endurecido, menores teores de água, menor teor de porosidade ou ar incorporado e maior teor de finos. Dentre estas relações as argamassas com agregados AN apresentaram valores inferiores para o fator (a/a) e teor de ar incorporado que podem justificar os resultados apresentados.

## 4.19 Expansibilidade por Método Acelerado

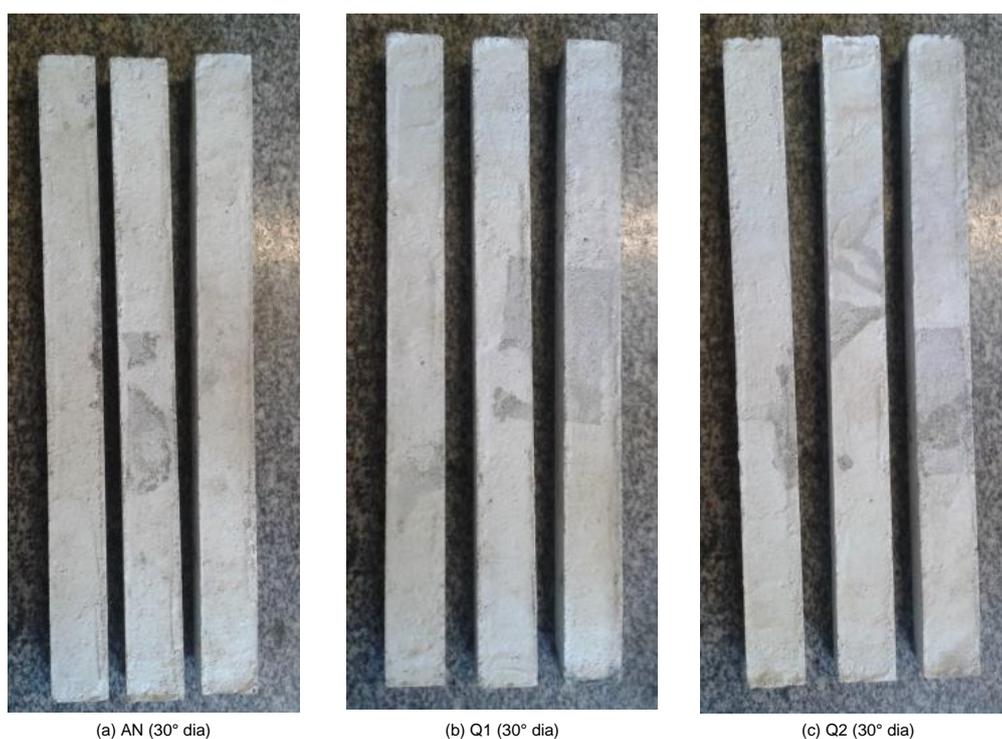
Alguns agregados apresentam a suscetibilidade de participar da reação expansiva alcali-silica na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis (sódio e potássio). Devido aos teores de potássio encontrados nas FRX e absorção atômica este ensaio foi realizado e os resultados podem ser visualizados na Figura 4.20 a seguir.



**Figura 4.20.** Expansibilidade por método acelerado (ataque químico)

Analisando o conjunto de barras produzidas com cada agregado houve uma expansibilidade média em torno de 0,08% e dentro do tratamento estatístico podemos afirmar que as barras apresentam mesma expansibilidade sendo ela não deletéria, pois esta abaixo do limite de 0,19% prescrito na ABNT - NBR15577-1 (2008), e os agregados podem ser classificados como potencialmente inócuos.

A expansão observada para as todas as argamassas foram inferior a 0,09% ao final de 30 dias de exposição à solução de NaOH e nenhuma manifestação patológica foi observada visualmente conforme Figura 4.21 a seguir. Estes resultados indicam que os agregados são inertes e que o potássio encontrado nos agregados de quartzito friável estão em uma configuração mineralógica estável e portanto, não induzem a processos deletérios.



**Figura 4.21.** Superfícies das argamassas após o ensaio de ataque químico

## 4.20 Fluorescência de Raios X

O ensaio de fluorescência de raios X nos permite conhecer melhor os materiais utilizados neste trabalho e ainda construir uma análise entre os naturais e os extraídos das jazidas de quartzito. Por meio deste ensaio é possível identificar as principais composições químicas presentes nos agregados e prever a potencialidade de certas reações ocorrerem ou não nas matrizes cimentícias. A Tabela 4.3 a seguir apresenta os resultados obtidos para o ensaio de fluorescência de raios X.

**Tabela 4.3.** Fluorescência de raios X das amostras

Elementos	AN	Q1B	Q2B	Q1A	Q2A
<b>SiO<sub>2</sub></b>	51,87	93,38	83,05	90,51	73,80
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,67	4,89	14,30	5,64	16,07
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	29,77	-	-	-	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	1,10	-	-	3,19	7,56
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	13,18	1,20	2,01	0,36	0,71

O agregado natural é composto basicamente por sílica ( $SiO_2$ ), alumina ( $Al_2O_3$ ), óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ) e óxido de potássio ( $K_2O$ ) sendo este último em menor quantidade.

As amostras de quartzito friável apresentaram predominância por sílica e óxido de potássio. Quando no estado bruto a amostra Q1B tem aproximadamente 93,4% de  $SiO_2$  e 4,9% de  $K_2O$  enquanto a amostra Q2B teores de 83% e 14,30% para os mesmos elementos. Após o peneiramento das amostras de quartzito houve redução da sílica (2,87% e 9,25%) com aumento do óxido de potássio (0,75% e 1,77%) para os agregados Q1A e Q2A, respectivamente.

Percebe-se que qualquer das frações, nos estado bruto ou após o peneiramento, os agregados de quartzito apresentam teores de sílica superiores ao agregado natural, sendo o agregado Q1A com maior teor de sílica e com considerável teor de óxido de potássio enquanto o agregado Q2 eleva os teor de óxido de potássio reduzindo a sílica.

## 4.21 Espectrofotometria por Absorção Atômica

Tendo o entendimento que a presença de potássio pode significar uma redução das competências mecânicas das matrizes contendo cimento Portland (Andrade, 1997), procurou-se por nova análise para constituintes metálicos, onde pudessem ser confirmados os resultados obtidos na fluorescência de raios X. Dessa forma, procedeu-se análise por espectrofotometria por absorção atômica das amostras de quartzito. Para a realização deste ensaio foram utilizadas materiais com granulometria inferior a 0,1mm sendo utilizadas as amostras moídas conforme explicitado na metodologia. A Figura 4.22 a seguir ilustra os resultados obtidos.

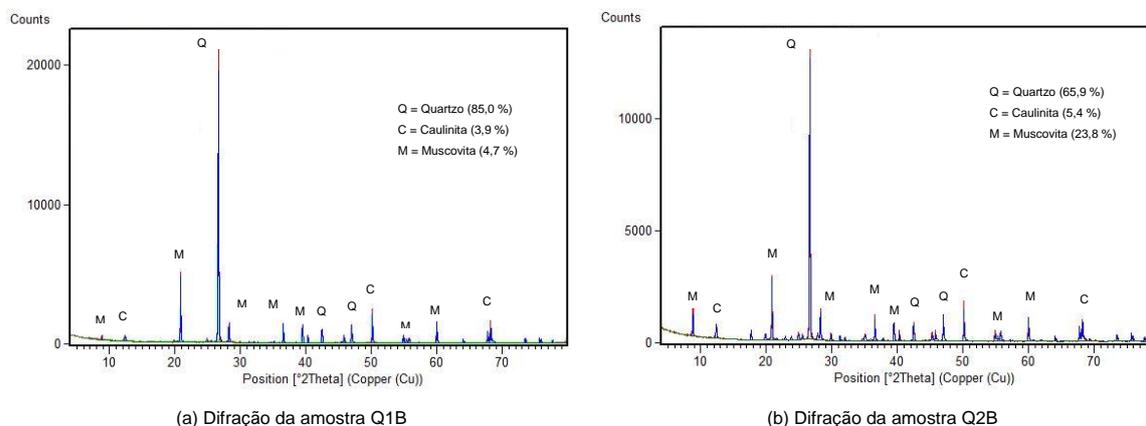
<b>Elementos (%)</b>	<b>Q1B</b>	<b>Q2B</b>	<b>AN</b>	<b>Q1A</b>	<b>Q2A</b>
SiO <sub>2</sub>	93,38	83,05	51,87	90,51	73,80
K <sub>2</sub> O	4,89	14,30	1,67	5,64	16,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	29,77	-	-
SO <sub>3</sub>	-	-	1,10	3,19	7,56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,20	1,20	13,18	0,36	0,71

**Figura 4.22.** Espectrofotometria por absorção atômica

O resultado obtido da absorção atômica mostrou que existe uma maior concentração de potássio nas amostras de Q2 conforme foi identificado na FRX. No entanto, a concentração destes elementos é significativamente menor. Verifica-se ainda a presença de alumínio, em proporções equivalentes às concentrações de potássio, o que sugere a presença de estruturas combinadas, quais pudessem ser desagregadas com o tratamento mecânico.

## 4.22 Difração de Raios X

A composição mineralógica dos agregados de quartzito friável foi determinada pelo processo de difração de raios X. A Figura 4.23 a seguir ilustra o difratograma das amostras de quartzito.



**Figura 4.23.** Difração de raios X dos agregados de quartzito friável

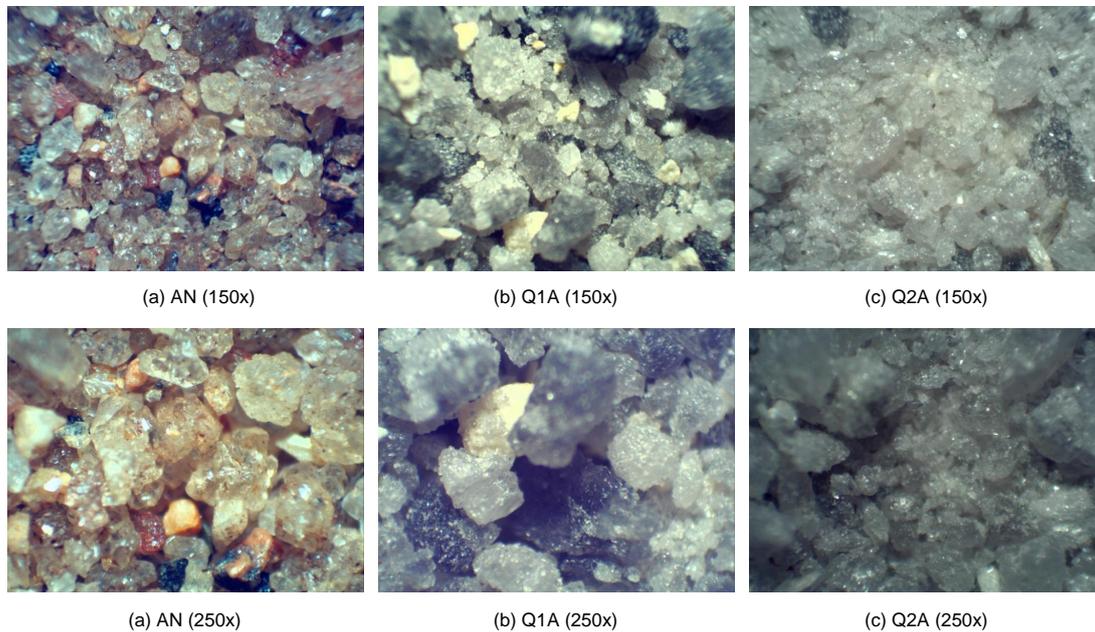
Por meio deste ensaio foi possível verificar, nas amostras de quartzito friável, a presença do quartzo e da caulinita e que o potássio poderia estar associado a alumina e ao enxofre, sempre na presença de sílica, sob as prováveis formas: muscovita, ortoclássio, potássico e kasilita.

O refinamento das análises por meio de Rietveld, utilizando a adição de fluorita em teor de 10% em massa, permitiu realizar uma análise quantitativa dos minerais presentes nas amostras. O agregado Q1 apresentou 85% de quartzo, 3,9% de caulinita e 4,7% de muscovita enquanto o agregado Q2 obteve 65,9% para o quartzo, 5,4% para a caulinita e 23,8% para a muscovita. Esta análise concorda com os resultados obtidos para a fluorescência de raios X e espectrofotometria por absorção atômica onde foi identificado maior presença de sílica no agregado Q1 e maiores teores de potássio e alumínio no agregado Q2.

## 4.23 Morfologia dos Agregados e das Argamassas

As imagens capturadas aos 56 dias por estereoscopia, permitiram visualizar a morfologia dos agregados AN, Q1A e Q2A, afim de que pudessem ser analisadas sua forma e textura, bem como sua estruturas nas diferente argamassas. A Figura 4.24 a seguir apresenta as imagens da morfologia dos agregados utilizados com ampliações das

imagens de 150 e 250 vezes.



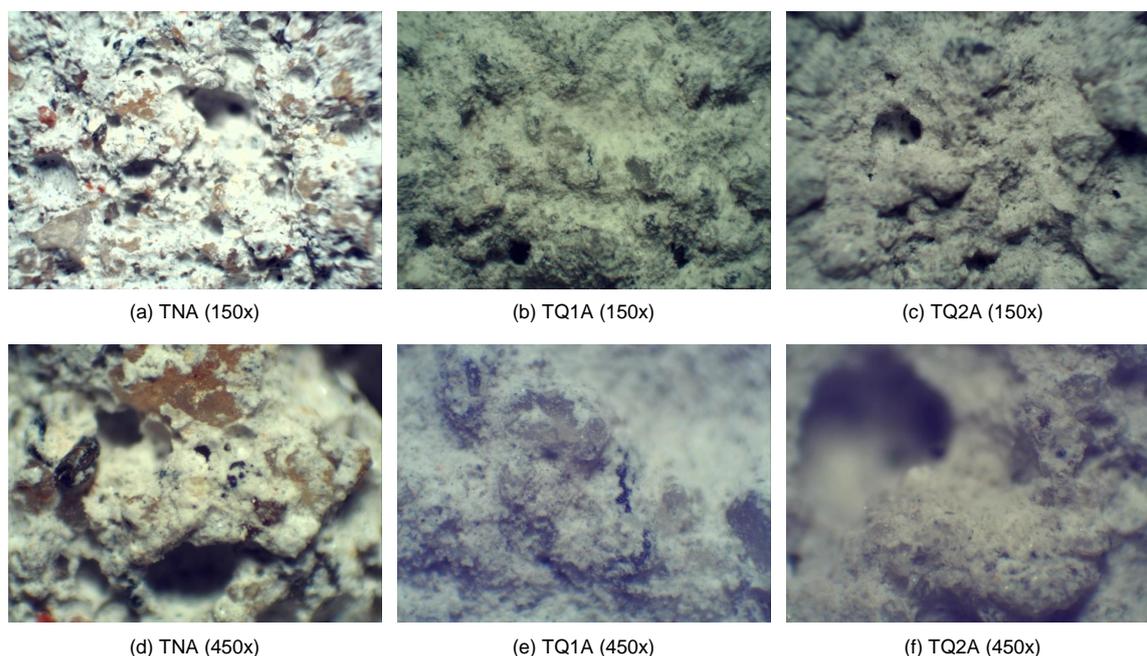
**Figura 4.24.** Morfologia dos agregados

Percebe-se que os agregados provenientes do quartzito friável são mais homogêneos (especialmente o Q2A). Estes resultados foram observados também na FRX onde haviam três elementos principais para os agregados de quartzito friável: a sílica, o óxido de potássio (associado a outros elementos como a alumina) e o óxido sulfúrico.

Sabe-se que as areias de rio devido ao processo geológico de sua formação passaram por diversos graus de intemperismo pelos rios e ventos que conferem aos seus grãos formatos mais esféricos que são vistos nas imagens apresentadas. Os agregados de quartzito (Q1A e Q2A) também apresentam forma mais volumétrica e seguem raciocínio análogo visto que são materiais intemperizados.

A Figura 4.25 a seguir apresenta as imagens da microestrutura das argamassas de assentamento produzidas com os agregados AN, Q1A e Q2A com ampliações da matriz de 150 e 450 vezes.

A matriz da argamassa de assentamento TQ1A é menos porosa e com poros menores que as demais. Possivelmente devido ao teor de materiais finos que agiram como filler preenchendo os poros.

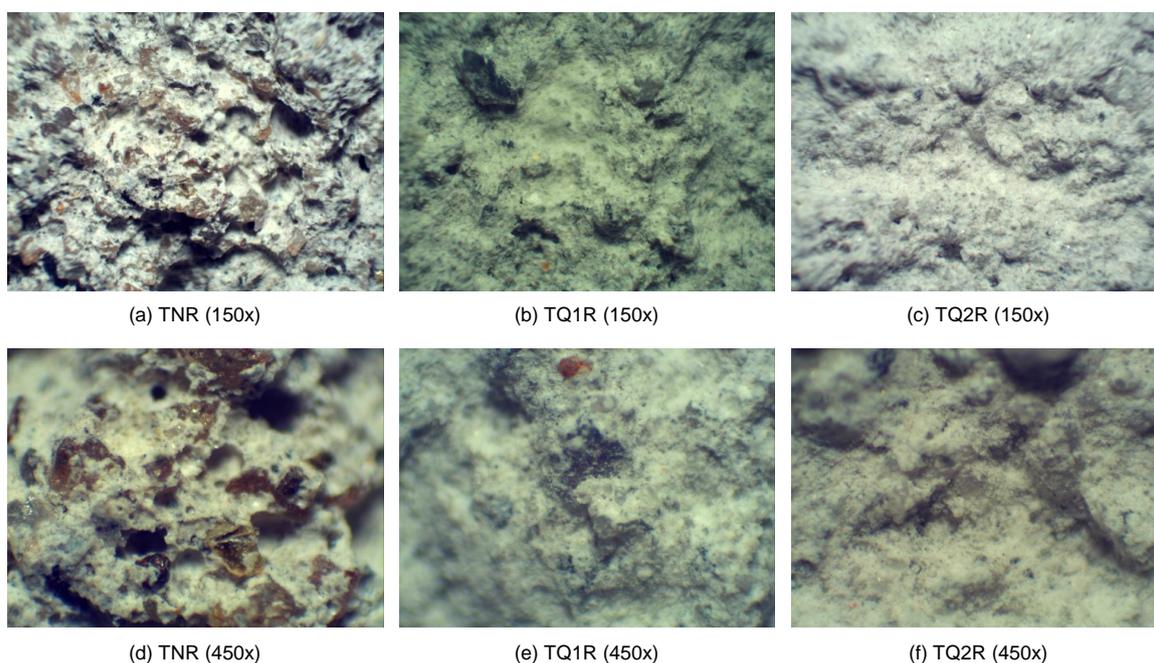


**Figura 4.25.** Microestrutura das argamassas de assentamento

Este fato pode refletir em um ganho de resistência mecânica na tração na flexão e compressão (matriz mais rígida), maior módulo de elasticidade (matriz mais rígida), menor retenção de água (menor porosidade), maior densidade de massa no estado endurecido (menor porosidade) e maior absorção de água (poros capilares menores). As argamassa TNA e TQ2A apresentam matriz e porosidades similares.

A Figura 4.26 a seguir apresenta as imagens da microestrutura das argamassas de revestimento produzidas com os agregados AN, Q1A e Q2A com ampliações da matriz de 150 e 450 vezes.

A matriz das argamassas de revestimento TQ1R e TQ2R são menos porosas que a TNR, e idênticas entre si. Possivelmente devido ao teor de materiais finos que agiram como filler preenchendo os poros. Este fato pode refletir, de forma análoga à explicação para as argamassas de assentamento, em um ganho nas propriedades da argamassa.



**Figura 4.26.** Microestrutura das argamassas de revestimento

## 4.24 Análise Ambiental

As análises ambientais foram realizadas para as argamassas de revestimento produzidas com os agregados AN, Q1A e Q2A, segundo parâmetros de lixiviação e solubilização, em concordância com os procedimentos e limites normativos. As argamassas TQ1R e TQ2R foram classificadas, segundo a norma ABNT - NBR10004 (2004), como resíduo classe IIB - não perigoso e inerte. O resultado indica a presença de teores de potássio e alumínio em limites superiores aos normativos. Da mesma forma espera-se que as argamassas de assentamento apresentem mesma a classificação obtida para as argamassas de revestimento. A argamassa de revestimento produzida com o agregado AN obteve mesma classificação (resíduo classe IIB).

## 4.25 Análise Qualitativa da Viabilidade Econômica

Além de todas as vantagens sociais, como a geração de empregos, e ambientais, com a minimização dos impactos, podemos destacar também vantagens econômicas devido à redução dos custos dos insumos básicos, agregados, que afetam diretamente o preço final dos produtos formados. Para comparação usou-se uma casa de habitação de interesse social (HIS), de aproximadamente  $45,70 m^2$ , desenvolvida pelo prof. Ricardo Fiorotti (em projeto de pós graduação em desenvolvimento) no projeto da construção de uma Vila Sustentável dentro do campus universitário da UFOP, ilustrada na Figura 4.27 a seguir.



**Figura 4.27.** Habitação de Interesse Social usada para análise econômica

Para a construção de uma casa HIS foram considerados dois tipos de argamassa, uma de assentamento e outra para revestimento (em camada única de 2cm revestindo os dois lados da alvenaria) com os traços adotados nesta pesquisa. A quantidade de água deve ser determinada segundo índice de consistência e não influencia, comparativamente, nos valores finais do custo. A área necessária a ser revestida é de  $140m^2$ , considerando a construção com um bloco de concreto de dimensões  $14x19x39cm$  e espessura das juntas de 1cm totalizando  $1,45 m^3$  de argamassa de assentamento e  $5,6 m^3$  de argamassa de revestimento.

Para os agregados de quartzito friável adotou-se valor para composição dos custos baseados nos processos industriais necessários para sua produção que consistem, basicamente, de: maquinário para extração e transporte, secador aero-classificador, silos,

correias transportadores e balanças de pesagem. Na Tabela 4.4, a seguir, pode-se visualizar a tabela de preços médios comumente praticados na região metropolitana de Belo Horizonte para os insumos necessários.

**Tabela 4.4.** Preço médio dos insumos para construção civil

<b>Material</b>	<b>Preço médio/Unidade</b>
Areia	R\$80,00 m <sup>3</sup>
Quartzito friável*	R\$20,00 m <sup>3</sup>
Cimento CP II-32	R\$22,00/50kg
Cal Hidratada CHI	R\$8,00/20kg

\* Valor adotado para composição dos custos  
Fonte: SINDUSCON (2015)

Com base nos valores em massa ou volume apresentados e determinando a proporção de cada material que compõe o traço é possível determinar o valor a ser gasto com os insumos para assentar e revestir a casa padrão HIS considerada. O custo para produção das argamassas de assentamento e revestimento produzidas com agregado natural e com agregado de quartzito friável pode ser visualizado na Tabela 4.28 a seguir.

**Figura 4.28.** Custo comparativo na produção das argamassas

<b>Elementos</b>	<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço Total</b>
Argamassa de assentamento	Natural	1,45 m <sup>3</sup>	R\$ 393,50
	Quartzito friável	1,45 m <sup>3</sup>	R\$ 256,80
Argamassa de revestimento	Natural	5,6 m <sup>3</sup>	R\$ 1522,40
	Quartzito friável	5,6 m <sup>3</sup>	R\$ 1000,00

O custo total para produção das argamassas de assentamento e revestimento com agregado natural foi de, aproximadamente, 1.920,00 reais enquanto o custo com os agregados de quartzito friável ficou próximo de 1.260,00 reais gerando uma redução de 34,4% nos custos.

É importante ressaltar que o custo de mão de obra não é alterado para a construção quando se utiliza os agregados provenientes do quartzito friável e que o rendimento dos traços não foram quantificados. A redução de 34,4% no custo final da obra é relativa à redução no preço dos insumos básicos e segundo dados laboratoriais a utilização dos agregados de quartzito em substituição aos agregados naturais podem melhorar suas características inclusive de resistência mecânica. Este fato, de forma qualitativa ainda, indica possibilidade na redução de cimento e cal utilizados nos traços o que promoveria redução ainda maior nos custos finais.

Caso o valor de venda do metro cúbico de quartzito friável fosse metade do valor da areia comercializada no mercado, haveria aumento na lucratividade da empresa e a redução para produção das mesmas argamassas seria de 23,5% em relação ao agregado natural sendo ainda viável seu uso. Panoramas ainda melhores podem ser traçados caso sejam desenvolvidas argamassas industrializadas com melhor controle tecnológico das características essenciais, rendimento e agilidade na aplicações.

# Capítulo 5

## Conclusões e Considerações finais

### 5.1 Conclusões

Os agregados de quartzito friável, quando no estado bruto, não apresenta características desejáveis para aplicação como agregados na produção de argamassas com excesso de partículas finas (menores que 0,075mm), o que demonstra a necessidade de um processo de beneficiamento antes de sua aplicação como agregado. O protocolo adotado neste trabalho demonstrou-se adequado produzindo materiais dentro dos limites prescritos nas normas.

Os resultados da análise física, segundo os parâmetros estudados neste trabalho, indicam que o agregado de quartzito friável é semelhante aos agregados naturais exceto para o teor de materiais friáveis. Os materiais AN, Q1A e Q2A apresentam módulo de finura dentro dos limites ótimos ( $2,20 \leq MF \leq 2,90$ ) e mesma dimensão máxima característica ( $DMC=2,40\text{mm}$ ). O AN apresentou distribuição dentro faixa que descreve o limite utilizável e os agregados Q1A e Q2A dentro da faixa que descrevem o limite ótimo. Em relação ao teor de material pulverulento, após o processo de beneficiamento, os agregados Q1A e Q2A apresentaram teores inferiores aqueles obtidos para AN e dentro dos limites normativos (inferior a 5%). Os agregados AN, Q1A e Q2A não apresentaram impurezas orgânicas em quantidade suficientes significativas. O coeficiente de inchamento obtido para Q1A foi de 50% e para Q2A 55%, superiores ao valor encontrado para o coeficiente de inchamento AN (35%). AN, Q1A e Q2A apresentaram

valores em torno de 5% para umidade crítica. O teor de materiais friáveis para AN foi de 2,69%, inferior ao limite normativo de 3%. O teor de materiais friáveis para Q1A foi de 14,25% e Q2A 17,15%, superiores ao valor obtido para AN e ao limite de referência. A massa específica obtida para AN foi de  $2,69g/cm^3$ , ligeiramente superior a massa específica para Q1A e Q2A, cujos valores foi de  $2,66g/cm^3$ ; a massa unitária obtida para AN foi de  $1,35g/cm^3$ , valor este ligeiramente superior aos obtidos para Q1A ( $1,31g/cm^3$ ) e Q2A ( $1,27g/cm^3$ ); sendo este agregados classificados como normais com massa unitária inferior a  $1,70g/cm^3$ .

As argamassas produzidas com AN, Q1A e Q2a apresentam mesma trabalhabilidade e um mesmo consumo de água para fluidez determinada independente do agregado utilizado. O aumento no teor de cal como aglomerante permitiu maior retenção de água nas argamassas de assentamento, classificando-as como argamassas como alto potencial de retenção de água (maior de 90%). A densidade de massa obtida para as argamassas de assentamento e revestimento, no estado fresco, variaram de  $1438,60Kg/m^3$  à  $1576,90Kg/m^3$  que as classifica como argamassas do tipo 3. O aumento do teor de cal é responsável pelo incremento da incorporação de ar das argamassas o que pode ser verificado para todos os tratamentos. O teor de ar incorporado foi superior para as argamassas TQ1R, TQ2R, TQ1A e TQ2A, comparativamente aos tração TNR e TNA. Os resultados obtidos indicam que as argamassas com agregados Q1A e Q2A tem maior absorção que aquelas produzidas com AN, função do maior teor de partículas finas.

A densidade de massa, no estado endurecido, encontra-se entre  $1329,50Kg/m^3$  à  $1377,20Kg/m^3$  o que permite classificá-las como argamassas do tipo 3. Todas as argamassas em relação ao coeficiente de capilaridade podem ser classificadas como do tipo 6, exceto a argamassa TNR que é classificada como tipo 4. Os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão, para todos os tratamentos, foi inferior a  $1,50MPa$  o que classifica todas as argamassas como do tipo 1. Observa-se que os valores para a resistência à tração na flexão foram superiores para as argamassas de revestimento comparativamente com as argamassas de assentamento. Os resultados obtidos para a resistência à compressão, para os tratamentos TNR ( $2,09MPa$ ), TQ1R ( $2,59MPa$ ) e TQ2R ( $2,78MPa$ ) classificam estes tratamentos como argamassas do tipo

2. Os resultados obtidos para a resistência à compressão, para os tratamentos TNA (0,94MPa), TQ1A (1,22MPa) e TQ2A (1,02MPa) classificam estes tratamentos como argamassas do tipo 1. Observa-se que o aumento no teor de cal reduzem os valores para resistência à compressão e para resistência à tração na flexão. Em função das características mecânicas para as argamassas estudadas e as limitações dos *straing gages* não foi possível a determinação do módulo de elasticidade estático para nenhum dos modelos estudados. O módulo de elasticidade dinâmico confirma os resultados obtidos para a resistência à compressão e para resistência à tração na flexão. Os módulos de elasticidade foram superiores para TNR (5,05MPa), TQ1R (4,66MPa) e TQ2R (4,81MPa), aqueles obtidos para os traços TNA (3,21MPa), TQ1A (2,80MPa) e TQ2A(2,94MPa). Esses valores indicam boa capacidade de estabilidade frente as solicitações de serviço destes elementos.

Os resultados obtidos para expansibilidade por método acelerado por exposição à solução de NaOH mostrou serem os agregados Q1A e Q2A inertes; o mesmo comportamento pode ser observado para AN, em análise comparativa, sendo todos os valores inferiores a 0,10% aos 30 dias. A estabilidade determinada pode estar relacionada aos altos teores de sílica presente nos agregados Q1A e Q2A, consideravelmente superiores aos valores presente em AN.

A análise química por FRX apontou a presença de teores de potássio sob a forma de óxidos de 5,64 para Q1A e 16,07 para Q2A. Considerando a grandeza destes resultados procederam-se análises por de espectrofotometria por absorção atômica onde foram obtidos teores relativamente inferiores para Q1A (3,43%) e Q2A (7,13%). A análise por DRX mostrou que os teores de potássio presente nas amostras Q1A e Q2A estavam associados à sílica sob a forma de muscovita. Essas observações justificam a estabilidade dimensional e a integridade dos corpos de prova submetidos a determinação de expansibilidade pelo método acelerado.

Morfologicamente os agregados apresentam formas mais volumétricas. As argamassas de revestimento TQ1R e TQ2R apresentam matrizes, morfologicamente idênticas, e menos porosas comparativamente a TNR. A argamassa TQ1A apresenta estrutura menos porosa que as argamassas TNA e TQ2A; sendo a matriz de TQ1A influenciada

pelo maior teor de materiais finos.

Todas as argamassas produzidas foram classificadas como classe II-B, não perigoso e inerte. A utilização dos agregados Q1A e Q2A não alteram a classificação ambiental das argamassas comparativamente aquelas produzidas com AN.

Uma análise econômica preliminar indica viabilidade para substituição dos agregados AN por agregados Q1A e Q2A. A utilização de Q1A e Q2A em substituição a AN significa uma redução de 34,40% nos custos de produção dessas argamassas.

A substituição integral dos agregados naturais por agregados obtidos da utilização de estéril de quartzito na produção de argamassas consiste de alternativa tecnicamente adequada, durável e economicamente viável.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Identificação de processamento dos estéreis de mineração capazes de produzir areias com menores teores de materiais friáveis.
- Estudo do comportamento das argamassas em condições de utilização aplicadas em estruturas a campo para o ciclo de uma ano (verão/inverno/verão).
- Estudar o comportamento das areias obtidas do processamento de quartzito friável como material de base tecnológica para produção de outras matrizes de cimento Portland (argamassas colantes, argamassas poliméricas, graute, micro-concreto e concreto de cimento Portland).
- Estudar a aplicação dos agregados obtidos do processamento de quartzito na produção de peças cerâmicas e porcelanatos, curados química ou termicamente.
- Estudar a destinação das frações não utilizáveis em argamassas ou concretos para aplicação em outros setores industriais.
- Estudar detalhadamente rotas de processamento para o beneficiamento dos estéreis e determinação do custo unitário de produção de matérias primas para obtenção de insumos para construção civil.

# Referências Bibliográficas

ABNT - NBR 10007 (2004). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos.

ABNT - NBR 13278 (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13278 - Armagassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

ABNT - NBR 13280 (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13280 - Armagassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.

ABNT - NBR 15259 (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15259 - Armagassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.

ABNT - NBR 7211 (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificações.

ABNT - NBR 7218 (2010). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 7218 - Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.

ABNT - NBR NM 248 (2003). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 248 - Determinação da composição granulométrica.

ABNT - NBR NM 45 (2006). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 45 - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

ABNT - NBR NM 46 (2003). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 46 - Determinação do material fino que passa através da peneira de 0,075 mm por lavagem.

ABNT - NBR NM 49 (2001). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 49 - Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas.

ABNT - NBR NM 58 (1996). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 58 - Concreto Endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrasônica.

ABNT - NBR10004 (2004). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 1004 - Resíduos sólidos - Classificação.

ABNT - NBR10006 (2004). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 1006 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.

ABNT - NBR11578 (2014). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 11578 - Cimento Portland composto - Especificação.

ABNT - NBR13276 (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.

ABNT - NBR13277 (1995). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13277 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.

ABNT - NBR13279 (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

ABNT - NBR13281 (2005). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13281 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Requisitos.

- ABNT - NBR15577-4 (2009). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 15577 -4: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.
- ABNT - NBR6467 (2006). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6467 - Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio.
- ABNT - NBR8522 (2008). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8522 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.
- ABNT - NBR8802 (2013). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8802 - Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.
- Almeida, S. L. M. e Luz, A. a. B. (2009). Manual de agregados para construção civil. *Centro de tecnologia mineral (CETEM) e Ministério da ciência e tecnologia (MCT)*.
- Alvarez, J.; Sequeira, C. e Costa, M. (2005). Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. *1 Congresso Nacional de Argamassas de Construção da APFAC, Lisboa*.
- ANBT - NBR NM 52 (2009). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR NM 52- Determinação da massa específica e massa específica aparente.
- Andrade, L.; Leite, M. G. e Bacellar, L. (2009). Influência geológica em assinaturas químicas das águas e solos do Parque Estadual do Itacolomi, Minas Gerais. *REM (Revista da Escola de Minas)*, 62.
- Andrade, W. (1997). Concretos – massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. *Editora PINI*.
- ANEPAC (2012). Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC). *Anuário Anepac*.

- ANEPAC (2014). Associação Nacional de Entidade de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC). *Acessado em: <http://anepac.org.br/wp/agregados/> em novembro de 2014.*
- Angelim, R.; Angelim, S. e Carasek, H. (2003). Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC.*
- ASTM - 632E (1996). Association Standard Test Method (ASTM) - 632E - Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials.
- ASTM/C-1260 (2014). Association Standard Test Method (ASTM) - C 1260 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).
- ASTM/C-227 (2010). Association Standard Test Method (ASTM) - C227 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method).
- ASTM/C-289 (2007). Association Standard Test Method (ASTM) - C289 - Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method).
- ASTM/C-295 (2012). Association Standard Test Method (ASTM) - C295 - Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete.
- Azeredo, H. (1978). *Dosagem das argamassas empregadas na construção de edifícios.* Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo.
- Barros, L. (2013). *Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária.* Dissertação de mestrado, NUGEO - Universidade Federal de Ouro Preto.
- Bastos, P. (2001). *Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento.* Tese para doutorado em engenharia civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- Bauer, E. (1997). Geração de parâmetros de referência para controle de recebimento de agregados para argamassas de revestimento. *II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador*.
- Bauer, E.; Souza, J. e Guimarães, E. (2005). Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. Anais - ANTAC*.
- Bauer, L. F. a. (1979). Materiais de construção. *Livros Técnico Científicos, Rio de Janeiro, Brasil*.
- Bavaresco, C. (2001). *Utilização de entulho reciclado para produção de argamassas*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Braga Filho, A. (2004). *Bambu: generalidades e seu emprego como reforço em vigas de concreto*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB.
- Carasek, H. (1996). *Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.
- Cardoso, F. A. (2009). *Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico*. Tese para doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Carneiro, A. e Cincotto, M. (1999). Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas. *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Boletim Técnico n. 237*.
- Cascudo, O.; Carasek, H. e Carvalho, A. (2005). Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. Anais. Florianópolis: ANTAC*.

- Cincotto, M. (1985). Propriedades de cimento:cal:areia. *Seminário sobre argamassas, IBRACON*.
- Cincotto, M.; Silva, M. e Carasek, H. (1995). Argamassas de revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio. *Publicação IPT 2378. 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas*.
- Collares, E. G. (2013). Estudo pioneiro propõe o uso de resíduos de quartzito como agregado de concreto. *IBRAM, Instituto Brasileiro de Mieração. Acessado em: www.ibran.org.br , outubro de 2013*.
- Cortes, D.; Kim, H.-K.; a.M. Palomino e Santamarina, J. (2008). Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. *Cement and Concrete Research*, 38(10):1142–1147.
- Costa, R. (2007). *Análise de dados de cargabilidade, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética na mina do Brucutu, MG*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Coutinho, Antônio, S. e Gonçalves, A. (1994). Fabrico e propriedades do betão. *Volume III, Lisboa: LNEC*.
- Cruz, N. T. C. (2008). *Estudo da influência da granulometria das areias no desempenho de rebocos de ligante hidráulico*. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- de Freitas, C. (2010). *Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido*. Dissertação de mestrado em construção civil, Universidade Federal do Paraná.
- Duarte, C. (2007). Argamassas, ano 10000. *Argamassas para a reabilitação, Humidade em construções antigas, Revista Pedra & Cal. Lisboa: GECORPA, (ISSN 2645-4863)*.
- Dujab, E. (2000). *Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizados em Porto Alegre*. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Eui-Hawn, H. e Soo Ko, Y. (2008). Comparison of mechanical and physical properties of SBR-polymer modified mortars using recycled waste materials. *Journal of Industrial e Engenharia Química. Volume 14*,.
- FEAM (2009). Gestão de passivos ambientais na Mineração - Federação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). pp. 1–143.
- Ferreira, J. (1980). Dicionário de Geociências. *Ouro Preto (MG). Minas Gerais: Fundação Gorceix*.
- Filomeno, O. L. (1993). *Caracterização das argamassas de assentamento empregadas na região de Florianópolis e estudo comparativo entre argamassas de assentamento de cimento e cal e cimento e saibro*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Fontes, W. C. (2013). *Rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento*. Dissertação de mestrado, PROPEC - Universidade Federal de Ouro Preto.
- Gobbo, L. (2003). *Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios X e quantificação por refinamento de rietveld*. Dissertação de mestrado., Universidade de São Paulo. Instituto de geociências.
- Gomes, A. d. O. (2005). *Propriedades das argamassas de revestimentos de fachadas*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Guimarães, J. (1985). A evolução da consolidação dos revestimentos das alvenarias com argamassas contendo cal hidratada. *Seminário sobre argamassas, IBRACON. São Paulo*.
- Hanson, A. (1995). Silica and Microspheres. In: Raw Materials for Pigments, Fillers and Extenders. *Consumers Survey, Industrial Minerals*, pp. 87–91.
- IBRAM (2012). Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). *7ª Edição de informações e análises da economia mineral brasileira*.

- Januzzi, R. (2014). *Modelagem do comportamento mecânico de blocos e prismas produzidos com escória de aciaria elétrica para alvenaria estrutural*. Dissertação de mestrado, PROPEC - Universidade Federal de Ouro Preto.
- John, V. (2003). Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*.
- John, V. e Ângelo, S. (2002). Metodologia para reciclagem de resíduos vegetais. *Coleção Habitar: Utilização de resíduos na construção habitacional*. Editora Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4. Porto Alegre/RS.
- Karasahin, M. e Terzi, S. (2007). Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. *Construction and Building Materials, Volume 21*.
- Lima, L. e Ramonich, E. (1999). *Hormigones com escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. Tese de doutorado, Universidade Politécnic de Catalunya.
- Lima, R. (2007). Caracterização Tecnológica de Resíduos de Pedreiras de Quartzito da Região de Ouro Preto/MG. *Revista da Escola de Minas (REM), Ouro Preto*.
- Margalha, M. G. L. B. (2010). *Ligantes aéreos minerais. Processos de extinção e o factor tempo na sua qualidade*. Dissertação de doutoramento em engenharia civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;.
- Martins, A. (2008). *Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco*. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Instituto Superior Técnico -Universidade Técnica de Lisboa.
- Martins Neto, A. e Djanikian, J. (1999). Aspectos de desempenho da argamassa dosada em central. . *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. SãoPaulo, SP*.
- Mauri, J.; Cordeiro, G. e Dias, A. (2009). Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico. *Revista Matéria, Vol. 14, Nº 3, 2009, pp. 1039-1046*.

- Mehta, K. e Monteiro, P. (2008). *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008.
- Monteiro, P.; Shomglin, K.; Wenk, H. e Hasparik, N. P. (2001). Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal*.
- Munhoz, F. (2008). *Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato*. Dissertação (mestrado em construção civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Mustra, C. (2009). *Aplicação da técnica de espectrofotometria de absorção atômica na análise de metais e metalóides em amostras biológicas*. Dissertação de mestrado., Universidade de Lisboa. Faculdade de medicina de Lisboa.
- Neno, C. (2010). *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão – integração de RCD*. Dissertação de mestrado., Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Neville, A. M. (1982). *Propriedades do Concreto*. PINI.
- Neville, A. M. e Brooks, J. J. (2013). *Tecnologia do Concreto*. Editora Bookman, São Paulo, 2 edição.
- Nsambu, R. (2007). *Avaliação do desempenho de argamassas de reparação para betão armado*. Tese de doutorado., Instituto Superior Técnico -Universidade Técnica de Lisboa.
- Peixoto, R. A. F.; Diniz, D. e Oliveira, J. R. (2011). Caracterização do resíduo de manta cerâmica usada para isolamento térmico e sua utilização na fabricação de argamassa. *REM (Revista da Escola de Minas)*, 1:32–40.
- Peixoto, R. A. F.; Oliveira, J. R.; Maia, N. d. S.; Kamada, C. E.; Franca, M. e Singulani, M. (2008a). Viability study for production of concrete using recycled siderurgy residue. *ACI Materials Journal*, 1:145–155.

- Peixoto, R. A. F.; Padula, F.; Franca, M. e Kamada, C. E. (2008b). Estudo da viabilidade técnica e econômica do uso da escória de aciaria na fabricação de argamassas para alvenarias. *Revista Internacional Construlink*, 6:10–21.
- Petrucci, E. (1980). *Materiais de Construção. 5 ed. Editora Global. Porto Alegre.*
- Pfaltzgraff, P. (1994). *Aspectos ambientais da lavra de areia, exemplo da área produtora do Rio São João.* Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Pinto, A. P. e Gomes, A. M. (2006). Módulo 12 “Argamassas”. *Materiais de Construção I - 2006/2007 - Volume IV. Lisboa: IST.*
- Pirsson, L. (1952). *Rocks and Rock Minerals. 3 ed. Revised by Adolph Knopf, John Wiley and Sons, Inc., New York, London.*
- Ramirio, R. F.; Pamplona, D.; I, F. J. e G., C. E. (2008). Estudo comparativo de rejeitos de quartzito com outros agregados comercialmente utilizados como materiais de construção no sudoeste de Minas Gerais. *Ciência et Praxis v. 1.*
- Rato, V. N. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas.* Tese de doutorado em engenharia civil na especialidade de reabilitação do património edificado, Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- Recena, F. (2008). *Conhecendo Argamassa. EDIPUCRS.*
- Ribeiro, L. e Lopes, R. (2007). As argamassas na antiguidade Greco-Romana: usos, definições e traduções. *2 Congresso Nacional de Argamassas de Construção da AP-FAC, Lisboa.*
- Rodrigues, M. P. S. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas – Contribuição para o estudo da influência dos ligantes.* Dissertação de doutoramento em engenharia civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa,.
- Sabbatini, F. (1984). *O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílicoalcalária.* Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- Sabbatini, F. (1986). Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente. *Boletim técnico - Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo*.
- Santos, C. (2005). Aplicações do método de Rietveld.
- Santos, S.; Gambale, E. e Andrade, M. (2006). Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto. *48 congresso Brasileiro do Concreto - Ibracon*.
- Santos, S. R. (2009). *Argamassas pré-doseadas para rebocos de edifícios recentes*. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa;.
- Santos, W. J. (2014). *Desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento e assentamento*. Tese de doutorado em engenharia civil., Universidade Federal de Viçosa.
- Sauoma, V. e Perotti, L. (2006). Constitutive Model for Alkali-SAggregate Reactions. *ACI Materials Journal*.
- Selmo, S. d. S. (1989). *Dosagem de argamassas de Cimento portland e Cal para revestimento Externo de Fachada de edifícios*. Dissertação de mestrado – departamento de construção civil, , Escola Politécnica da USP – São Paulo.
- Sengul, O.; Tasdemir, C. e Ali, T. M. (2002). Influence of aggregate type on mechanical behavior of normal- and high-strength concrete. *ACI Materials Journal*.
- Silva, A. e Kahn, H. (2003). Caracterização tecnológica do quartzito friável de Iutinga, MG, com vista à produção de carbetão de silício(Sic). *São Paulo: EP/USP, 2003. [s.p.]. (Série BT/PMI/201)*.
- Silva, C.; Simões, L. e Ruiz, A. (2002). CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS VEIOS DE QUARTZO AURÍFEROS DA REGIÃO DE CUIABÁ (MT). *Revista Brasileira de Geociências*.
- Silva, N.; Buest, G. e Campiteli, V. (2005). Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI. Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANTAC*.

- Silva, N. G. (2006). *Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária*. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- SINDUSCON (2015). Custos unitários básicos de construção. *Sindicato da Indústria da Construção Civil. Janeiro de 2015*.
- Souza, J. (2008). *Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz*. Tese de doutorado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT.
- Souza, S. (1993). *Tijolos de terra crua reforçada com fibras vegetais*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, CAMPUS II. Campina Grande/PB,.
- Valduga, L. (2002). *Reação álcali-agregado - mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo*. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Universidade Estadual de Campinas.
- Veiga, M. R. (1998). *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes - contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*. Dissertação de doutoramento em engenharia civil, LNEC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Weitz, D. (2004). Packing in the Spheres. *Science. n.303*.
- Westphal, E. (2004). Argamassas. *Florianópolis, UFSC. Disponível em [www.arq.ufsc.br/~labcon/arq5661/argamassas](http://www.arq.ufsc.br/~labcon/arq5661/argamassas). Acesso em novembro de 2014*.
- Yoshida, A. e Barros, M. (1995). Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridade na análise de argamassas industrializadas. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, I., 1995, Goiânia. Anais... Goiânia: ANTAC*.