

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO GERADOS NA PRÓPRIA OBRA**

**RICARDO ANTÔNIO BARBOSA**

Belo Horizonte

2014

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM  
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO GERADOS NA PRÓPRIA OBRA**

RICARDO ANTÔNIO BARBOSA

Dissertação apresentada junto ao Curso de Pós-graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior  
Coorientadora: Prof. Dr.<sup>a</sup> Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte

2014

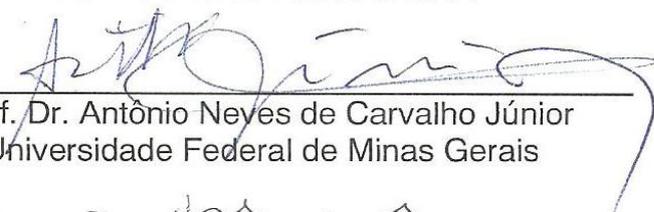
**RICARDO ANTÔNIO BARBOSA**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ARGAMASSAS CONFECCIONADAS COM  
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO GERADOS NA PRÓPRIA OBRA**

Dissertação apresentada junto ao Curso de Pós-graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

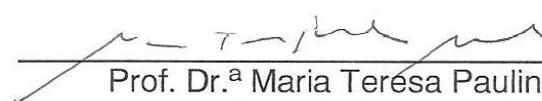
Orientador: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior  
Coorientadora: Prof. Dr.<sup>a</sup> Maria Teresa Paulino Aguilár

COMISSÃO EXAMINADORA



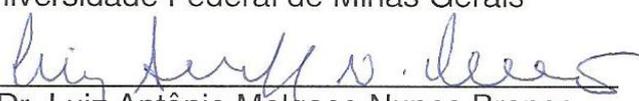
---

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior  
Universidade Federal de Minas Gerais



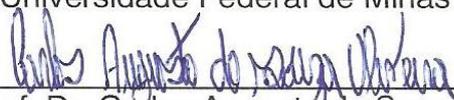
---

Prof. Dr.<sup>a</sup> Maria Teresa Paulino Aguilár  
Universidade Federal de Minas Gerais



---

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco  
Universidade Federal de Minas Gerais



---

Prof. Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira  
Universidade Federal de Itajubá

Belo Horizonte, 16 de Maio de 2014

## Agradecimentos

Agradeço a Deus, autor e consumidor da minha fé, que tem me abençoado com saúde e disposição e assim possibilitando cumprir o trabalho aqui desenvolvido.

À minha família, pelo apoio e compreensão nas horas difíceis, em especial a minha mãe Rute e meu pai Eurico (*in memoriam*), minha irmã Adelaide e minha sobrinha Luiza.

Aos funcionários do corpo técnico e administrativo do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, pelo empenho e dedicação nas horas de dificuldade em especial à Ivonete, pela atenção e informações prestadas sempre com competência e prontidão.

Aos professores Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior e Dr.<sup>a</sup> Maria Teresa Paulino Aguilar, pela prontidão nos atendimentos, pelo auxílio e incentivo constantes, por compartilhar generosamente seus conhecimentos, seu otimismo e, principalmente, pela confiança em mim depositada.

À comissão examinadora: Dr. Professores Antônio Neves de Carvalho Júnior, Dr.<sup>a</sup> Maria Teresa Aguilar, Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco e Dr. Carlos Augusto de Oliveira pelas pertinentes considerações sobre este trabalho.

Aos Professores Dr.<sup>a</sup> Maria Carmen Couto Ribeiro, Dr.<sup>a</sup> Adriana Guerra Gumieri, Dr. Cícero Murta Diniz Starling, Dr. Adriano de Paula e Silva, Dr. Abdias Magalhães Gomes, Dr. Roberto Braga Figueiredo, Dr.<sup>a</sup> Maria Teresa Paulino Aguilar, pelos preciosos conhecimentos transmitidos, extensivo aos demais professores do departamento.

Ao Pr. José Silva Lapa (MSc) pela colaboração e rica troca de informações que muito contribuíram para o meu progresso.

Aos laboratoristas Ramon, do laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais, e ao técnico Marcus do Laboratório de Geotecnia.

Agradeço aos alunos de graduação de Engenharia Civil Antônio, Bruna, Caio, Clara, Diego, Júlia, Pedro, Rafael e Rodrigo e ao professor White José dos Santos pela ajuda na confecção dos corpos e prova, realização dos ensaios e análise dos mesmos com o aprendizado adquirido em comum.

Aos meus colegas de mestrado e amigos, pelo companheirismo e conhecimentos compartilhados: Ulisses, Dayana, Namir, Fábio Cardoso, Carlos Eduardo, Victor, Filipe Fuscaldi, Maria Cristina, Luciane, Thomaz, Natália, Waldemar, Machado, Rondinely, Derival e Gilmar.

Aos meus colegas da Escola Estadual Coronel Manoel Soares do Couto.

Aos irmãos da Igreja Batista Memorial pelas orações.

A todos o meu mais profundo e sincero agradecimento.

Dedicatória

À minha mãe, Rute, pelo carinho, dedicação, pela fé inabalável e o inestimável exemplo de vida.

O SENHOR é a minha luz e a minha salvação; a  
quem temerei? O SENHOR é a força da minha  
vida; de quem me recearei?

Salmos 27:1

## RESUMO

A indústria da construção civil é um dos setores mais importantes da economia e a principal consumidora de recursos naturais. Os resíduos gerados na construção civil são frequentemente dispostos no meio ambiente de maneira inadequada, contaminando o solo e águas. O uso desses resíduos como agregados de argamassas e concretos pode ser uma maneira de reduzir os impactos ambientais e os gastos com reciclagem de materiais. Assim, a substituição parcial do agregado miúdo por RCD em argamassas de revestimento parece ser uma alternativa viável, uma vez que permite a redução dos custos e uma maior racionalidade no uso do espaço físico. Entretanto, ainda existem alguns obstáculos que precisam ser vencidos como o preconceito da sociedade na utilização de materiais reciclados. As argamassas que utilizam RCD como agregado devem atender as prescrições das normas vigentes, por isto é necessário o estudo das propriedades mecânica desses materiais. Tendo em vista as vantagens econômicas, ambientais e sociais além de existir pouco conhecimento técnico-científico sobre a resistência mecânica de agregados produzidos com RCD, este trabalho se propõe avaliar a resistência à flexão e o módulo de elasticidade dinâmico, através dos métodos de emissão de ondas ultrassônicas e frequência ressonante. Para a realização dos ensaios foram utilizados três traços de argamassas (convencional, com RCD e com cal e RCD). Diante dos resultados encontrados, conclui-se que a utilização de agregados naturais e de RCD é adequada para confecção de argamassas, sendo que os traços aqui propostos permitem o aproveitamento de resíduos sem afetar as propriedades mecânicas e durabilidade das argamassas empregadas em revestimentos.

**Palavras-chave:** Resíduo de construção e demolição; argamassa de revestimento; resistência à flexão; módulo de elasticidade dinâmico.

## ABSTRACT

The building construction industry is one of the most important sectors of the economy and it is also the main consumer of the natural resources. The waste generated by the building construction is usually wrongly disposed in the nature therefore it contaminates soil and water. The use of it as concrete and mortar aggregate could be a way to reduce the environment impacts and the material recycling costs. Hence, the partial substitution of the fine aggregate for RCD in surfacing mortar seems to be a viable alternative since it allows a cost reduction and also a better rational use of the physical space. However, there are a few obstacles that need to be overcome such as the prejudices of the society in using recycled materials. The mortars that use RCD as aggregate have to respect the prescription law that are valid; that is why it is necessary to study the mechanical properties of these materials. Considering the economical, environment and social advantages, besides also the existence of only a few studies about the mechanical strength of the aggregates made with RCD, this study aims to evaluate the flexural strength the dynamic modulus by ultrasonic wave propagation methods and resonant frequency. Three mortar ratios (conventional, with RCD and with lime and RCD) were used in the testing. Considering the results found, it is concluded that the use of natural and RCD aggregates are suitable to be used in mortar and the use of the ratios from this study allows the utilization of the waste without affecting the mechanical and durability properties of the mortars used in surfacing.

**Key-Word:** Construction and demolition waste; mortar coating, flexural strength, dynamic modulus.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Usina de reciclagem da Pampulha.....	29
Figura 2 – Processos de calcinação, hidratação e desidratação da cal .....	34
Figura 3 – Tipos de argamassas segundo o uso.....	37
Figura 4 – Módulo de elasticidade em função das relações agregado/aglomerante e cal/cimento para as argamassas com areia natural. ....	43
Figura 5 – Módulo de elasticidade em função das relações agregado/aglomerante e cal/cimento para as argamassas com areia britada. ....	43
Figura 6 – Ilustração da estrutura do agregado de RCD.....	48
Figura 7 – Ensaio de resistência à compressão.....	51
Figura 8 – Ensaio de compressão diametral.....	52
Figura 9 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	54
Figura 10 – Ensaio de ultrassom.....	55
Figura 11 – Ensaio de frequência ressonante forçada.....	56
Figura 12 – Ilustração do processo de medidas para determinação da densidade de massa no estado endurecido. ....	57
Figura 13 – Ensaio de absorção por imersão e massa específica.....	58
Figura 14 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	60
Figura 15 – Curva granulométrica da areia natural.....	62
Figura 16 – Curva granulométrica da areia de RCD .....	62

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Limites de distribuição Granulométrica do Agregado Miúdo - NM 248(2001).....	22
Tabela 2 - Representação esquemática da unidade do agregado.....	23
Tabela 3 - Índices admitidos de impurezas nos agregados. ....	24
Tabela 4 - Resistência à compressão de rochas americanas geralmente usadas como agregados de concreto e argamassas.....	26
Tabela 5 - Classificação dos RCD segundo a Resolução 307/2002 – CONAMA. ....	31
Tabela 6 - Classificação das Argamassas .....	36
Tabela 7 - Classificação das Argamassas segundo a Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido. ....	40
Tabela 8 - Classificação das Argamassas segundo a Resistência à Compressão. ..	40
Tabela 9 - Classificação das Argamassas segundo a Resistência à Tração na Flexão. ....	41
Tabela 10 - Classificação das Argamassas segundo o coeficiente de capilaridade..	41
Tabela 11 – Detalhamento dos traços em massa utilizados. ....	49
Tabela 12 – Detalhamento dos ensaios realizados.....	50
Tabela 13 - Características físicas da areia natural. ....	61
Tabela 14 - Características físicas da areia de RCD.....	61
Tabela 15 – Detalhamento dos traços utilizados.....	63
Tabela 16 – Resultado do ensaio de resistência compressão .....	64
Tabela 17 – Resultado do ensaio de resistência compressão diametral.....	66
Tabela 18 – Resultado do ensaio de resistência a tração na flexão. ....	67
Tabela 19 – Resultado das medidas de velocidade do pulso ultrassônico .....	70
Tabela 20 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico pelo método ultrassônico. ....	71

Tabela 21 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico pelo método da ressonância forçada .....	72
Tabela 22 – Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão.....	74
Tabela 23 – Massa específica no estado endurecido .....	75
Tabela 24 – Absorção de água por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> ).....	76
Tabela 25 – Absorção de água por imersão.....	78
Tabela 26 – Porosidade superficial dos traços de argamassa .....	79

**LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Resultado do ensaio de resistências à compressão.....	64
Gráfico 2 - Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.	65
Gráfico 3 – Correlação entre os ensaios de resistência a tração por compressão diametral e compressão. ....	66
Gráfico 4 – Resultado do ensaio de resistências à tração na flexão. ....	68
Gráfico 5 – Correlação entre os ensaios de resistências à tração na flexão e compressão.....	69
Gráfico 6 – Resultado da velocidade do pulso ultrassônico. ....	70
Gráfico 7 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico pelo método ultrassônico .....	71
Gráfico 8 – Resultado do módulo de elasticidade dinâmico pelo método da frequência de ressonante forçada. ....	72
Gráfico 9 – Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico pelo método da frequência de ressonância forçada e pelo ultrassom. ....	73
Gráfico 10 – Resultado do ensaio massa específica no estado endurecido .....	75
Gráfico 11 – Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade .....	77
Gráfico 12 – Resultado do ensaio de absorção de água por imersão.....	78
Gráfico 13 – Resultado do ensaio de porosidade.....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CSTB: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

PIB: Produto Interno Bruto

PUNDIT: Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester

RCD: Resíduos de construção civil

SLU: Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte

NBR: Norma Brasileira

CP: Cimento Portland

CH: Cal Hidratada

ARI: Alta resistência inicial

RS: Resistente ao ataque de sulfatos

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
1.1	Considerações iniciais.....	17
1.2	Justificativa.....	17
1.3	Objetivos .....	19
1.3.1	Objetivo geral .....	19
1.3.2	Objetivos específicos .....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Considerações iniciais.....	20
2.2	Influência dos agregados nas argamassas e revestimento.....	20
2.2.1	Granulometria e forma .....	20
2.2.2	Porosidade e absorção .....	22
2.2.3	Substâncias deletérias .....	23
2.2.4	Aderência dos agregados .....	25
2.2.5	Resistência à compressão dos agregados.....	25
2.2.6	Módulo de elasticidade do agregado.....	26
2.3	Reciclagem de RCD no Brasil.....	27
2.3.1	Classificação dos resíduos quanto a Resolução CONAMA 307 .....	31
2.4.1	Considerações iniciais.....	32
2.4.2	Cimento Portland.....	32
2.4.3	Cal hidratada .....	33
2.5	ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO .....	36
2.5.1	Considerações iniciais.....	36
2.5.2	Propriedades das argamassas de revestimento .....	38

2.5.2.2	Densidade de massa no estado endurecido .....	39
2.5.2.3	Resistência mecânica .....	40
2.5.2.4	Capilaridade .....	41
2.5.2.5	Módulo de Elasticidade .....	41
2.5.2.6	Retração.....	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	48
3.1	MATERIAIS .....	48
3.2	MÉTODO.....	49
3.2.1	Traços .....	49
3.2.3	Ensaio de resistência à compressão.....	51
3.2.4	Resistência à tração por compressão diametral .....	52
3.2.5	Ensaio de resistência à tração na flexão.....	53
3.2.6	Medição do módulo de elasticidade dinâmico - método ultrassônico.....	54
3.2.7	Medição do módulo de elasticidade dinâmico - frequência ressonante forçada. ....	56
3.2.8	Massa Específica no Estado Endurecido .....	57
3.2.9	Absorção por Imersão e porosidade .....	58
3.2.10	Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade.....	59
4	RESULTADOS E ANÁLISES .....	61
4.1	Resistência à compressão .....	63
4.2	Resistência a tração por compressão diametral .....	65
4.3	Resistência à tração na flexão .....	67
4.4	Velocidade do pulso ultrassônico .....	69
4.5	Módulo de elasticidade dinâmico pelo método do ultrassom .....	70
4.6	Módulo de elasticidade dinâmico pelo método da frequência ressonante forçada .....	71

4.7	Análise de propensão à fissuração .....	73
4.8	Massa específica no estado endurecido .....	75
4.9	Absorção por capilaridade.....	76
4.10	Absorção por imersão .....	78
4.11	Porosidade .....	79
4.12	QUADRO RESUMO DE TODAS AS PROPRIEDADES ANALISADAS.....	80
5	CONCLUSÃO .....	81
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.....	82
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
	APÊNDICE - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS PORMENORIZADOS .....	91

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

A construção civil é um dos principais pilares da economia brasileira, respondendo por 4,0% do PIB (Produto Interno Bruto), conforme dados divulgados pelo IBGE (2013), sendo um setor de grande relevância nos aspectos sociais e econômicos, visto ser um dos que mais demandam mão de obra. Além disso, apresenta um potencial de crescimento e inovação entrelaçados às demais atividades da economia. Porém a tecnologia atualmente empregada nos canteiros de obra é responsável por grandes impactos ambientais, devido às enormes quantidades de resíduos de construção civil (RCD) gerados nesses locais, que tornam-se passivos ambientais. Estes resíduos tem tido estudos visando reaproveita-los como agregados para construção civil em argamassas e concretos.

Estudos desenvolvidos por Pinto (2005) registraram que os resíduos provindos de atividades construtivas representam de 41% a 70% do total dos resíduos produzidos nas cidades brasileiras. Ressalta-se que a utilização dos resíduos da construção civil é desejável por uma questão racional, de forma a reduzir ao mínimo os gastos com reciclagem, evitar a contaminação dos recursos naturais (água e solo) e promover o aproveitamento a estes materiais que são largamente demandados pelo mercado.

A ABNT NBR 13.281 (2005) define as argamassas como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosadas em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada). Estas podem ser utilizadas em vários locais com função diferenciada, cada um dos empregos faz jus a uma série de propriedades que correspondem a um tipo de argamassa específico.

## 1.2 Justificativa

John (2000) concluiu que a construção civil é a maior consumidora de recursos naturais dentre todas as atividades econômicas do planeta. Gusmão (2008) constatou que o grande volume de resíduos gerados pela construção civil não traz

apenas impactos sociais e ambientais, mas também econômicos, sendo observado que somente na cidade de Recife (PE) há 4,5 milhões de toneladas em coletas de resíduos e entulhos distribuídos de forma inadequada, em localidades públicas. Segundo Miranda (2005), entre os principais problemas que têm dificultado a reciclagem de RCD pode-se citar a presença de agentes contaminantes e o preconceito que a sociedade tem com material reciclado.

Segundo a Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), a responsabilidade pela disposição final dos resíduos de construção é dos geradores. Dentre as opções para destinação do RCD, a sua utilização em substituição parcial ou total de agregado miúdo natural em argamassas de revestimento apresenta-se como uma alternativa técnica viável, já que esses processos proporcionam uma redução dos custos, melhoria da imagem da empresa e maior racionalidade no uso do espaço físico.

Segundo Miranda (2000) a utilização do RCD no próprio canteiro de obras apresenta como uma das vantagens evitar a mistura de resíduos de fontes distintas, que podem comprometer a qualidade do rejeito, restringindo sua aplicação a serviços de menor importância e valor agregado.

As argamassas produzidas com RCD devem atender as prescrições normativas aplicáveis aos materiais utilizados na construção civil. Desse modo, para o uso de materiais produzidos com RCD, como argamassas, fazem-se necessários estudos acerca da resistência desses materiais, tendo em vista que não apresentarão as mesmas propriedades do material padrão. Para tanto, o estudo do módulo de elasticidade dinâmico vem contribuir de forma a mensurar a qualidade dos compósitos cimentícios (MIRANDA, 2000).

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico é um ensaio qualitativo não destrutivo que fornece subsídios para uma avaliação da resistência do material à deformação elástica, permitindo inferir o grau de fissuração e defeitos e as fases presentes (MIRANDA, 2005). Segundo Bastos (2003) esse ensaio apresenta como vantagens a rapidez de execução e o fato de ser um ensaio não destrutivo.

Diante deste contexto, este trabalho se propõe avaliar a resistência à flexão e o módulo de elasticidade dinâmico, através dos métodos de emissão de ondas e ultrassônicas em argamassas, com a utilização ou não de cal e comparar com dados encontrados na bibliografia especializada. Tendo em vista as vantagens econômicas, ambientais e sociais da utilização de resíduos da construção civil e o fato de haver poucos estudos sobre a resistência mecânica de agregados produzidos com RCD.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é estudar o desempenho mecânico de argamassas de revestimento produzidas com a substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de construção e demolição.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral, tem-se os objetivos específicos:

- caracterizar fisicamente os agregados e aglomerantes utilizados nesta pesquisa;
- determinar as características mecânicas: resistência à tração na flexão e por compressão diametral, compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico (por frequência ressonante forçada e por propagação de ondas ultrassônicas), massa específica no estado endurecido.
- correlacionar as propriedades avaliadas e discutir seus resultados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Considerações iniciais

A reciclagem de RCD é uma alternativa bastante estudada nos últimos anos, sobretudo em argamassas e concretos sem fim estrutural. Para se entender e verificar seu desempenho precisa-se conhecer e compreender os aspectos e características correlacionadas aos agregados, componente o qual ele o substituirá.

Classicamente, as argamassas de revestimento são misturas homogêneas de aglomerantes inorgânicos, de origem mineral, agregados miúdos e água, podendo conter aditivos ou adições, com propriedades adequadas ao fim a que se destinam, (SELMO, 1989).

Diante disto, neste capítulo apresenta-se uma revisão acerca da classificação e propriedades dos agregados e resíduos de construção.

### 2.2 Influência dos agregados nas argamassas e revestimento

Os agregados miúdos nas argamassas desempenham função tanto econômica (redução do consumo de cimento), como técnica (redução da retração). A função econômica deve-se à grande quantidade desses agregados consumidos nas argamassas de revestimento, barateando o custo da mistura já que os aglomerantes usuais (cimento e cal hidratada) custam bem mais caro. A função técnica reside em que os agregados atuam como esqueleto rígido da argamassa, devendo minimizar a sua retração por secagem inicial e as movimentações subsequentes por ação eventual ou cíclica de água, pois esta torna a pasta volumetricamente instável no compósito. Também os agregados podem conferir aumento da resistência superficial e da resistência à abrasão dos revestimentos de argamassa, (SELMO, 1986).

#### 2.2.1 Granulometria e forma

A granulometria dos agregados para argamassas deve ser preferencialmente contínua, o que conduz a uma melhor trabalhabilidade e a uma redução do volume de pasta e dos efeitos da retração por secagem dos revestimentos, como consequência do menor consumo de água nas argamassas (SELMO, 1986). Segundo Carneiro (1999), as argamassas dosadas a partir de distribuições

granulométricas contínuas possuem melhores características no estado fresco e endurecido.

A normalização de agregados para argamassas de revestimento, como se pode constatar pelo trabalho de Selmo (1986), sempre foi presente em países desenvolvidos e no Brasil, através de norma brasileira específica ou através de especificações do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. O agregado miúdo para a produção de argamassas deve ser, preferencialmente, de areia natural lavada de rio ou de cava, com formato o mais esférico possível e com predominância de grãos minerais entre 4,8 mm e 0,075 mm.

Hoje, são cada vez mais usadas areias artificiais de britagem, quem podem em algumas vezes possuir teor impróprio de materiais deletérios ou de partículas finas. Porém têm a vantagem de poderem ser produzidas com controle de qualidade muito constante, o que é extremamente favorável à produção de argamassas. Equipamentos mais modernos já podem controlar melhor a forma das partículas e isto deve favorecer a expansão do seu consumo em argamassas.

Segundo Selmo (1986), a seleção do agregado miúdo deve ser baseada, a priori, na análise visual e em laudo de caracterização mineralógica do material, contendo:

- a forma dos grãos, sendo preferidos aqueles de formas arredondadas ou prismáticas, sem quantidade expressiva de partículas lamelares ou aciculares;
- a composição granulométrica, dando-se preferência a uma distribuição contínua e compatível com o tipo de argamassa e acabamento superficial previsto em cada camada do revestimento. Como regra básica, para granulometria contínua, considerava-se que não deveria haver mais de 50 % de agregado entre duas peneiras consecutivas da série ABNT NBR NM 248: 2003 e, não mais que 25 % entre as peneiras de 0,15 mm e 0,30 mm, vide Tabela 1. Uma forma de melhorar empiricamente a granulometria de agregado para argamassas é pela mistura de areia média com areia fina, em geral na proporção de 50%;
- a composição mineralógica e a presença de impurezas ou materiais deletérios, sendo que nesse aspecto os agregados precisam ser isentos de matéria orgânica, concreções ferruginosas, argilas ou outras impurezas, que comprometam o

desempenho dos revestimentos, pois conforme os grãos sejam deletérios ou friáveis, podem causar os problemas no revestimento, tais como vesículas, descolamento com pulverulência, fissuras horizontais.

Tabela 1 - Limites de distribuição Granulométrica do Agregado Miúdo - NM 248(2001).

Peneira com abertura de malha	PROCENTAGEM (%), EM MASSA, RETIDA ACUMULADA			
	LIMITES INFERIORES		LIMITES SUPERIORES	
	ZONA UTILIZÁVEL <sup>2</sup>	ZONA ÓTIMA <sup>1</sup>	ZONA ÓTIMA <sup>1</sup>	ZONA UTILIZÁVEL <sup>3</sup>
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
0,60 mm	15	35	55	70
0,30 mm	50	65	85	95
0,15 mm	85	90	95	100

OBSERVAÇÃO: (1) O módulo de finura da zona ótima varia entre 2,20 a 2,90.  
 (2) O módulo de finura da zona utilizável inferior varia entre 1,55 a 2,20.  
 (3) O módulo de finura da zona utilizável superior varia entre 2,90 a 3,50.

### 2.2.2 Porosidade e absorção

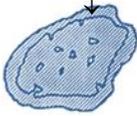
A existência de poros internos nos grãos dos agregados está relacionada com sua massa específica, pois influenciam em propriedades tais como aderência entre agregado/pasta, a resistência ao congelamento e ao degelo, bem como a sua estabilidade química e resistência à abrasão (ANDRADE *et al.*, 1997).

A presença de poros no interior do agregado faz com que a pasta aglomerante tenha dificuldade em penetrar, outros poros se comunicam apenas com a superfície da partícula, quando a água penetrar nos poros, vai haver uma dependência entre o tamanho do poro e o volume total deste. Sendo assim a absorção e a umidade superficial do agregado do sofrem influencias, pois estão diretamente relacionados com a quantidade de água de amassamento para o mesmo tipo de agregado, maior

absorção indica maior porosidade, maior grau de alteração e menor massa específica (ANDRADE *et al.*, 1997).

Embora não seja uma relação definida entre a resistência da argamassa e absorção de água do agregado, os poros da superfície da partícula influenciam na sua aderência com a pasta podendo, portanto exercer uma influência sobre as demais propriedades Mehta e Monteiro (2008). Lee *et al.*, (2005) destacam que a inserção de agregados reciclados ou não com alta porosidade pode diminuir drasticamente a durabilidade do material mesmo em locais de pouca agressividade, vide tabela 2.

Tabela 2 - Representação esquemática da umidade do agregado.

CONDIÇÃO DO AGREGADO	ASPECTO	CARACTERÍSTICAS
<b>Completamente seco (estufa)</b>		Agregado não possui nenhuma umidade
<b>Seco ao ar</b>		Agregado possui umidade interna e não possui a externa (a umidade é menor que a absorção potencial)
<b>Saturado com superfície seca</b>		Vazios permeáveis estão cheios de água (a umidade é igual à absorção potencial)
<b>Saturado ou úmido</b>		Possui água livre em sua superfície (umidade maior que a absorção potencial)

Fonte: SANTOS (2011)

### 2.2.3 Substâncias deletérias

As substâncias deletérias presentes no agregado são as capazes de prejudicar a trabalhabilidade, a pega, a resistência, a estética e as características de durabilidade. Agregados que apresentam alto teor de argila e alta absorção exigem uma demanda elevada de água para adquirirem a mesma trabalhabilidade, mas

como consequência observa-se uma redução da durabilidade, do teor de ar incorporado, e das resistências mecânicas (MUÑOZ *et al.*, 2010).

Há três categorias de substâncias deletérias presentes nos agregados: impurezas que interferem no processo de hidratação do aglomerante; películas que impedem a aderência efetiva entre o agregado e a pasta de cimento hidratada; e partículas fracas ou não sãs; além dos efeitos deletérios envolvendo reações químicas com o aglomerante, como por exemplo, a reação álcali-agregado. A Tabela 3 apresenta os índices admitidos de impurezas nos agregados.

Tabela 3 - Índices admitidos de impurezas nos agregados.

<b>Substâncias nocivas</b>	<b>% máxima em relação à massa total Agregado miúdo</b>	<b>% máxima em relação à massa total Agregado graúdo</b>
Torrões de argila	3,0	3,0
Material pulverulento (concreto submetido a desgaste superficial)	3,0	1,0
Material pulverulento (concreto protegido de desgaste superficial)	5,0	1,0
Materiais carbonosos (concreto não aparente)	1,0	1,0
Materiais carbonosos (concreto aparente)	0,5	0,5

Fonte: adaptado de ABNT NBR 7218: 2010 e ABNT NBR 7211: 2009.

Mehta e Monteiro (2008) e Coura (2009) ressaltam alguns constituintes mineralógicos dos agregados que reagem com os hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução dos poros. Estes hidróxidos alcalinos são derivados geralmente dos álcalis sódio e potássio do cimento Portland, mas os referidos álcalis podem ocasionalmente ser derivados de outras fontes. Um dos produtos formados na reação é o gel higroscópico expansivo, cuja composição química inclui sílica, álcalis e ocasionalmente uma pequena quantidade de cálcio.

McNally e Richardson (2005), em análises petrográficas de agregados com quartzo, indicam cuidados ao classificá-los como potencialmente reativos alcalinos, devido à

presença do sílex (rocha sedimentar silicatada, constituída de quartzo criptocristalino, muito dura e com densidade elevada), no entanto, eles ressaltam que reação é uma função da cristalinidade, logo, se as medidas para minimizar o risco (por exemplo, a limitação da carga de álcali) se revelarem demasiadamente onerosas em uma situação particular, o grau de cristalinidade deve ser investigado.

#### 2.2.4 Aderência dos agregados

A aderência dos agregados ocorre através do seu intertravamento com a pasta de aglomerante, em função da aspereza da superfície das suas partículas. Neville (1997) enfatiza que quanto mais ásperas forem as superfícies, melhor será a aderência. A aderência também influenciada pela composição química e mineralógica do agregado.

É necessário que a superfície do agregado esteja isenta de partícula de argila, mas, todavia, quando um corpo de prova é rompido algumas partículas de agregados são rompidas, mas quando rompidas em excesso pode significar que o agregado é muito fraco.

Geralmente a composição, textura e estrutura do agregado têm uma significativa influência na resistência e na elasticidade do conjunto argamassado. Assim sendo, uma resistência baixa pode ser devida à pequena resistência dos grãos constituintes, ou os grãos podem ser resistentes, mas não estão bem ligados entre si (ANDRADE *et al.*, 1997).

#### 2.2.5 Resistência à compressão dos agregados

A resistência à compressão de argamassas não pode ser expressivamente maior do que a da maior parte do agregado, mesmo não sendo fácil determinar a resistência das partículas isoladas. Por esta razão, a resistência do agregado é usualmente obtida por determinações indiretas, ou seja, resistência ao esmagamento do agregado em fragmentos ou a força necessária para compactar o agregado na mistura de pastas (NEVILLE, 1997).

Em resumo, se o corpo de prova argamassado confeccionado com um agregado a ser estudado, apresentar resistência à compressão insatisfatória e muitas partículas desse agregado rompidas, conclui-se que a resistência do agregado é menor do que a resistência à compressão nominal da mistura. Sengul et al. (2002) destacam que o tipo de agregado interfere nas propriedades do concreto/argamassa; quanto mais forte/resistente for o agregado maior a possibilidade resistiva desse.

Neville (1997) considerou que um bom valor médio da resistência à compressão do agregado é cerca de 200 MPa, porém muitos agregados excelentes têm resistência de até 80 MPa. A Tabela 4 apresenta os valores de resistência de algumas rochas.

Tabela 4 - Resistência à compressão de rochas americanas geralmente usadas como agregados de concreto e argamassas.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				
TIPO DE ROCHA	NÚMERO DE AMOSTRAS	VALOR MÉDIO	VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO
Granito	278	181	257	114
Felsito	12	324	526	120
Basalto	59	283	377	201
Calcário	241	159	241	93
Arenito	79	131	240	44
Mármore	34	117	244	51
Quartzito	26	252	423	124
Gnaisse	36	147	235	94
Xisto	31	170	297	91

Fonte: NEVILLE, 1997.

Andrade *et al.* (1997) mencionam que a rocha ou alguns materiais sintéticos utilizados como agregados apresentam boa resistência mecânica, sendo a zona de transição entre a pasta e o agregado a parte mais fraca do sistema.

### 2.2.6 Módulo de elasticidade do agregado

Segundo Neville (1997) o módulo de elasticidade do agregado influencia na grandeza da retração e da fluência do compósito. Em outras palavras, uma diferença muito grande entre os módulos de elasticidade do agregado e da pasta, acentua o desenvolvimento de microfissuras na interface agregado-matriz (zona de transição).

Raramente se determina o módulo de elasticidade do agregado, pois o módulo de elasticidade dos argamassados é, geralmente, tanto maior quanto maior o módulo dos minerais que o constituem.

Segundo Cetin e Carrasquillo (1998) as características mineralógicas dos agregados são fatores importantes que influenciam nas propriedades mecânicas dos compostos cimentícios. O módulo de elasticidade independe do tamanho dos agregados para um mesmo teor, devido às forças de ligação existentes interna e externamente nestes.

Em concretos e argamassas a escolha pelo tipo de agregado permite eliminar, ou pelo menos reduzir, a possibilidade de incompatibilidade elástica do agregado e da matriz, ou seja, em compostos em que o módulo de elasticidade do agregado é próximo ao da matriz as concentrações de tensões são mais uniformes e ocorrem na interface agregado/matriz (SENGUL *et al.*, 2002). Portanto, a ruptura será forçada a passar através do agregado, resultando em um comportamento mais frágil e do tipo fratura transgranular.

### 2.3 Reciclagem de RCD no Brasil

Constanza *et al.* (2013) afirmam que a "Sustentabilidade" tornou-se uma preocupação central para a população mundial, aliado ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico. Deve-se considerar inclusive que o processo construtivo em todas as suas etapas gera impactos substanciais ao meio ambiente, ocasionando mudanças significativas e irrevogáveis no clima, no ambiente e nos ecossistemas.

Sob esta visão, no Brasil, os processos de reciclagem de RCD de forma comercial teve início entre as décadas de 1980 e 1990 com a instalação de argamassadeiras em canteiros de obras, para triturar os resíduos minerais na própria obra. Esse método de produção de argamassas apresentou problemas por falta de planejamento e de conhecimento técnico por parte dos engenheiros. Em muitos casos, os canteiros de obras não dispunham de espaço suficiente para instalação da máquina e armazenamento de RCD classe A, que varia com o tamanho da obra (MIRANDA, 2003).

Não existia uma gestão racional do resíduo gerado, visando reduzir os gastos com a reciclagem e evitar a contaminação de RCD do tipo classe A por materiais indesejáveis (aço, gesso, plástico, madeira e outros que possam inviabilizar a reciclagem). Desse modo, a proposta deste tipo de reciclagem ia de encontro às metas, então crescentes, de melhoria da qualidade na construção civil (MIRANDA, 2003).

As grandes perspectivas para a reciclagem de RCD estão na instalação de usinas de reciclagem, públicas ou privadas, móveis ou estacionárias, para a produção de agregados, argamassas e pré-fabricados em volumes compatíveis à velocidade de geração de RCD no município ou região metropolitana e com adequado controle tecnológico, para garantir o desempenho dos materiais e componentes produzidos (MIRANDA, 2005).

Aqui no Brasil, cerca de 75% do resíduo da construção civil é proveniente de eventos de informais como construção e demolição realizado pelos próprios usuários. Apenas, 15% a 30% desse resíduo é produzido de construções formais. Assim, é necessária a criação de uma gestão de resíduos para minimizar os impactos ambientes gerados por esses materiais (SINDUSCON, 2005).

A reciclagem de RCD no Brasil está evoluindo por este caminho. Já foram instaladas, pelo menos, 23 usinas de reciclagem no país, distribuídas por Belo Horizonte (MG) (3 usinas), Muriaé (MG), São José do Rio Preto (SP), Ribeirão Pires (SP), São José dos Campos (SP), Vinhedo (SP), Campinas (SP), São Paulo (SP) (2 usinas), Piracicaba (SP), Macaé (RJ), Ciríaco (RS), Ribeirão Preto (SP), Londrina (PR), Brasília (DF) (2 usinas), Jundiá (SP), Socorro (SP), São Bernardo do Campo (SP), Guarulhos (SP) e Fortaleza (CE) (MIRANDA, 2005).

Tem-se alguns fatores que vem motivando este crescimento:

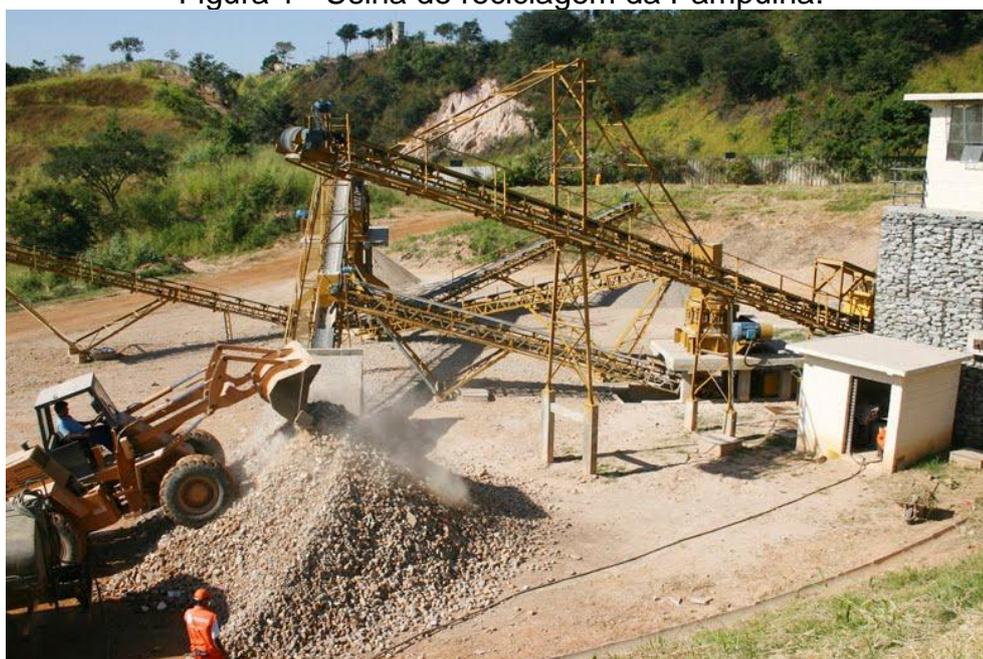
- a Resolução CONAMA 307: 2002 que obriga os geradores de RCD a tomarem uma maior responsabilidade pelos resíduos gerados;
- o Projeto “Entulho Bom” tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento sustentável da indústria de construção civil no município de

Chapecó/SC, através do beneficiamento técnico e econômico dos entulhos de construção, (CENTRIC, 2012);

- o exemplo da primeira usina privada instalada em Socorro/SP, projeto premiado em concurso promovido pela Revista Superinteressante da Editora Abril, em março de 2002, com ampla divulgação na mídia;
- o plano de negócios desenvolvido por Miranda (2005) e outros pesquisadores, chamado Construção Solidária.

Belo Horizonte, com pouco mais de 2,4 milhões de habitantes (IBGE, 2013), é hoje um dos melhores exemplos, no Brasil, de investimento público bem sucedido na reciclagem de RCD, pois tem uma usina que funciona de forma ininterrupta há mais 15 anos. Cerca de 40% dos resíduos coletados diariamente na cidade são de RCD, o que corresponde a, aproximadamente, 1600 toneladas. Conta com três usinas de reciclagem em operação, Pampulha, Estoril e BR040. Conforme a SLU (2013), a usina da Pampulha (Figura 1) foi instalada em dezembro de 1996, em uma área de aproximadamente 12.500 m<sup>2</sup> e com um custo, na época, próximo de R\$ 200.000,00. São reciclados até 400 m<sup>3</sup> por dia de RCD (equivalente a 290 a 480 t/dia).

Figura 1 - Usina de reciclagem da Pampulha.



Fonte: Catapreta *et al.*, 2008

Conforme informação no site da SLU (2013), quando um caminhão chega na usina para despejar entulho, primeiramente é feita uma triagem para avaliar se o resíduo apresenta material orgânico ou gesso, sendo rejeitado se contiver esses componentes. A parcela rejeitada pela inspeção é destinada ao aterro sanitário de Macaúbas, em Sabará. O material aceito é classificado em:

- classe A: resíduos de peças fabricadas com concreto (lajes, pilares, blocos, pavimentação), argamassas, fibrocimento, pedras ornamentais, sem a presença de impurezas. Destinam-se à preparação de argamassa e concreto não estruturais, utilizados na fabricação de bloquetes para calçamento, blocos de vedação, guias para meio-fio, dentre outros.

- classe B: resíduos predominantemente cerâmicos (tijolos, telhas, azulejos etc.). Destinam-se à base e à sub-base de pavimentação de vias, drenos, camadas drenantes e material de enchimento de rip-rap.

Os resíduos são levados pela pá-carregadeira até o alimentador vibratório do britador de impacto e, por gravidade, para a calha simples e ao transportador de correia. Após a britagem, há eliminação de pequenas partículas metálicas ferruginosas pela ação de um eletroímã sobre o material reciclado conduzido pelo transportador de correia.

O material reciclado é acumulado sob o transportador de correia até a expedição, que é feita com o auxílio de pá-carregadeira, dispondo o material reciclado em veículos apropriados.

De acordo com Ângelo, Zordan e John (2010), para a utilização de resíduos na construção civil é necessário todo um processo de pesquisas para a obtenção de um novo produto com qualidade. Assim, eles descrevem uma metodologia voltada para o emprego deste tipo de material. Assim, é necessário, primeiramente, ter um conhecimento do tipo de material que será empregado e se a quantidade de resíduo gerado é suficiente para a utilização na obra. Posteriormente, realizar a caracterização do resíduo, observar sua viabilidade econômica e avaliar as propriedades dos produtos que serão feitos com os resíduos.

### 2.3.1 Classificação dos resíduos quanto a Resolução CONAMA 307

A Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de 5 de julho de 2002 define os RCD como sendo:

*"Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e escavação de terrenos tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc, comumente chamados entulhos de obras, caliça ou metralha" (CONAMA 2002).*

Esta resolução, considerando que existe uma grande heterogeneidade nos resíduos que são gerados em uma obra estabeleceu uma classificação para esses RCD, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação dos RCD segundo a Resolução 307/2002 – CONAMA.

Classe	Tipo	Resíduo
A	Resíduos Reutilizáveis Ou recicláveis.	De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem
		De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto
		De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras
B	Resíduos recicláveis para outras destinações	Plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação	Produtos oriundos do gesso
D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção Resíduos contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos	Tintas, solventes, óleos e outros
		Resíduos oriundos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros

Fonte: CONAMA, 2002.

## 2.4 AGLOMERANTES

### 2.4.1 Considerações iniciais

Os aglomerantes são substâncias finamente pulverizadas e pela mistura com água são capazes de formar uma pasta com poder cimentante. O endurecimento é lento e é resultado de uma reação entre o aglomerante e a água (CINCOTTO, QUARCIONI, JOHN, 2007).

Dentre as diversas classificações existentes para os aglomerantes, a mais consagrada é a que leva em consideração as suas propriedades, sendo aéreos e hidráulicos. Os aglomerantes aéreos, como a cal e o gesso, conservam suas propriedades somente na presença do ar. Já os aglomerantes hidráulicos conservam as suas propriedades na água e no ar, possuindo uma maior resistência mecânica e por isso são os mais utilizados na construção civil (ISAÍÁ, 2007).

Os aglomerantes hidráulicos podem ser subdivididos em:

- simples: constituídos de um único produto sem mistura posterior ao cozimento
- compostos: consistem de uma mistura de um aglomerante simples com adições minerais como a escória de alto-forno, que é um subproduto industrial que melhora as propriedades do cimento Portland do tipo II e III.
- mistos: onde há mistura de dois ou mais aglomerantes como, por exemplo, cimento e cal, utilizados na confecção de argamassas, e os com adição, sendo que na maioria dos casos as adições são materiais inertes cuja finalidade é diminuir a permeabilidade e o calor de hidratação.

### 2.4.2 Cimento Portland

É um aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de clínquer, gesso e adições normatizadas finamente moídas (MARTINS *et al*; 2008). Nas argamassas de revestimento, as funções básicas do cimento Portland são de promover a coesão dos agregados no estado fresco da mistura, sua adesão inicial à base de revestimento, promover o endurecimento, conferir resistência mecânica e reduzir a

permeabilidade dos revestimentos à passagem de água líquida ou vapor, todavia podem aumentar a sua retração por secagem.

A influência do cimento nessas propriedades é tanto maior, quanto maior o seu teor ou proporção no traço, isto é, na dosagem. Os cimentos Portland para argamassas são, em geral, do tipo II, III, IV ou V, com classes de resistência igual a 25, 32 ou 40, sendo fabricados segundo normalização específica.

O tipo e a composição do cimento podem influenciar na retração, uma vez que cimentos de rápida hidratação (elevado teor de C3A - de alta resistência inicial) causam menor retração plástica, já que criam um esqueleto de cimento hidratado mais rapidamente, dificultando a exsudação (NEVILLE, 1997).

Bolorino e Cincotto (1997) observaram que painéis revestidos com as argamassas de cimento CP III não fissuraram, enquanto que os painéis revestidos com argamassas de cimento CP V ARI RS apresentaram fissuras, fenômeno justificado pela velocidade de hidratação acelerada e maior retração inicial, o que é contraditório à opinião de Neville (1997).

O aumento do teor de cimento em argamassas eleva o potencial de retração da argamassa, sendo responsável pelo aumento da retração por hidratação, significativamente superior a variações dimensionais por efeitos de carbonatação (CINCOTTO *et al.*, 1995).

Quanto à influência do cimento na aderência dos revestimentos, Carasek *et al.* (2001) afirmam que, sem a ocorrência de excessos de fissuras, quanto mais fino o cimento, maior a resistência de aderência obtida.

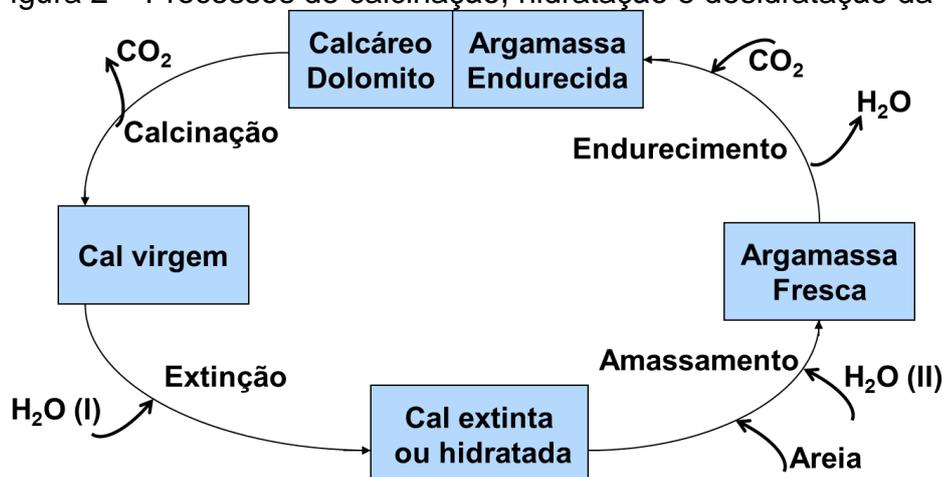
#### 2.4.3 Cal hidratada

É um aglomerante inorgânico produzido a partir de rochas calcárias e dolomíticas, composto de cálcio e magnésio. É um pó muito fino composto de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, além de uma fração de óxidos livres não hidratados, sendo que no mercado existe a cal virgem e cal hidratada.

Esta apresenta uma área específica 10 vezes maior que a área específica do cimento segundo a norma ABNT NBR 7175/2003. A reação de hidratação da cal

virgem é uma reação exotérmica, pois libera energia na forma de calor. A figura 2 mostra os processos de calcinação, hidratação e desidratação da cal.

Figura 2 – Processos de calcinação, hidratação e desidratação da cal



Fonte: Santos, 2011.

As cales hidratadas em pó são aglomerantes de elevada finura e de baixa reatividade, pois em mistura com a água, formam uma pasta, que endurece por reações químicas de médio a longo prazos (30 a 90 dias ou mais), formando compostos de baixa resistência mecânica e que podem ser parcialmente dissolvidos por ação da água. São chamadas de aglomerantes aéreos por não terem resistência à ação prolongada de água, por precisarem da presença de ar para a consolidação da sua microestrutura e das suas propriedades resistentes, que ocorre por reação de carbonatação (CARASEK *et al.*, 2001).

Nas argamassas mistas de revestimento, a principal função da cal hidratada é promover a trabalhabilidade da mistura fresca, aumentando a plasticidade, a retenção de água, a adesão e a extensão de aderência, sobre a base em revestimento, no ato da aplicação. Estas podem ter aderências mais duráveis do que as argamassas somente de cimento, devido à maior extensão de aderência e maior plasticidade. Além disso, o uso de cal aumenta a extensão de aderência devido à sua finura. A cal dolomítica proporciona maior aderência que a cal calcítica, pelo maior tamanho dos cristais formados (CARASEK *et al.*, 2001).

No Brasil, segundo a norma ABNT NBR 7175/2003, a cal hidratada para argamassas pode ser:

- tipo CH - I, cal hidratada especial: é uma cal calcítica hidratada, apresentando alto teor de cálcio e produzida com calcário de alta pureza.
- tipo CH - II, cal hidratada comum (sem controle de óxidos não hidratados e a maioria dos fabricantes exige repouso prévio da cal hidratada);
- tipo CH - III, cal hidratada com carbonatos (sem controle de óxidos não hidratados, e a maioria dos fabricantes exige repouso prévio da cal hidratada).

Para as argamassas de revestimento, simples ou mistas, deve-se dar preferência às cales do tipo I e/ou II, pois são mais puras, de maior finura e conduzirão a misturas mais econômicas (GUIMARÃES, 2002).

A influência da cal sobre a consistência e trabalhabilidade das argamassas provém das condições de coesão interna que a mesma proporciona, em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado (CINCOTTO, 1995). As argamassas de cal apresentam características favoráveis de retenção de água pela elevada superfície específica da cal e pela grande capacidade de adsorção de seus cristais (até 100% do seu volume).

Quanto à natureza da cal, encontra-se na literatura melhores retenções de água com o emprego de cal dolomítica. Quanto ao teor, a retenção de água melhora com o aumento da relação cal/cimento. Quanto maior a proporção e o consumo de cal, na argamassa, maior será a sua responsabilidade sobre a resistência mecânica final do revestimento, e a sua responsabilidade é integral, no caso de se tratar de uma argamassa simples de cal, para reboco, por exemplo (GALLEGOS, 2005).

## 2.5 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

### 2.5.1 Considerações iniciais

De acordo com Carasek (2007), as argamassas são materiais de construção compostos por aglomerante, agregado miúdo e água, formando uma mistura homogênea e com propriedades de endurecimento e aderência. São classificadas, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação das Argamassas

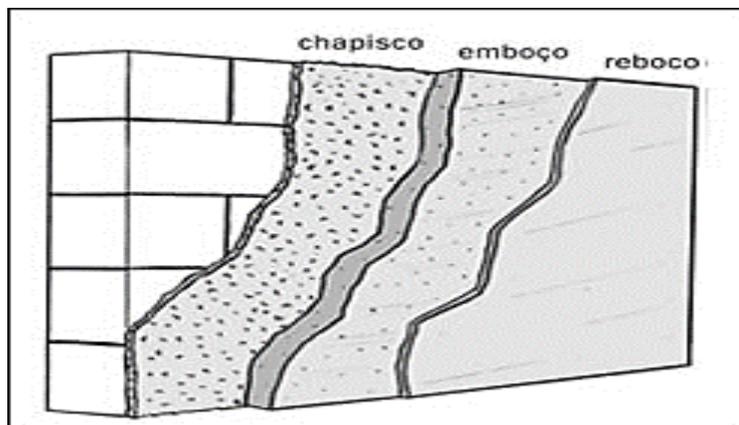
<b>Classificação</b>	<b>Tipo</b>
Quanto à natureza do aglomerante	Argamassa aérea Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerante	Argamassa de cal Argamassa de cimento Argamassa de cimento e cal Argamassa de gesso Argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerantes	Argamassa simples Argamassa mista
Quanto à consistência da argamassa	Argamassa seca Argamassa plástica Argamassa fluida
Quanto à plasticidade da argamassa	Argamassa pobre ou magra Argamassa média ou cheia Argamassa rica ou gorda
Quanto à densidade de massa da argamassa	Argamassa leve Argamassa normal Argamassa pesada
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	Argamassa preparada em obra Mistura semipronta para argamassa Argamassa industrializada Argamassa dosada em central

Fonte: CARASEK, 2007.

Além da classificação das argamassas pelo tipo, estas podem ser classificadas de acordo com as suas funções. Assim, elas podem ser empregadas na execução das alvenarias (argamassa de assentamento e de fixação), revestimento de teto, parede (chapisco, emboço, reboco e argamassa de única camada), piso (contrapiso) e

cerâmico (argamassa colante e rejunte) e como argamassa de reparo (CARASEK, 2007), vide Figura 3.

Figura 3 – Tipos de argamassas segundo o uso.



Fonte: Site Comunidade da Construção

Os revestimentos de argamassa de cimento Portland, objeto desta pesquisa, são aqueles que integram as vedações verticais dos edifícios, paredes internas e fachadas, e ainda as vedações horizontais em tetos das edificações. Em geral, desempenham funções de regularização, acabamento e proteção dos substratos onde são aplicados, elementos de alvenarias e estruturas de concreto armado.

Consideradas as funções inerentes dos revestimentos, pode-se apontar que a durabilidade dos mesmos é um requisito crítico para o seu desempenho. Assim, a durabilidade de revestimentos deve ser atestada pela qualidade da sua integridade e aderência inicial aos substratos onde são aplicados e, quando necessário, por ensaios de previsão de durabilidade, por métodos acelerados de envelhecimento (MIRANDA, 2005).

Os revestimentos de argamassas com areias recicladas exigem mais cuidados e critérios tanto para o controle de qualidade do agregado, quanto da composição das argamassas, pois apresentam algumas propriedades mais críticas para a sua aplicação e o desempenho quanto à fissuração (MIRANDA, 2000).

A finalidade e a forma de aplicação das argamassas são fatores básicos para a definição de suas propriedades. As propriedades básicas, sempre considerada em normas, são a aderência e a resistência no estado endurecido. Porém, pode ser

muito maior o conjunto de propriedades a que as argamassas de revestimento devem atender (SELMO, 1989).

### 2.5.2 Propriedades das argamassas de revestimento

A definição de propriedades críticas não é simples. No Brasil, tais propriedades foram inicialmente discutidas por Sabbatini (1986), Selmo (1989) e depois ainda mais detalhadas e difundidas por Cincotto *et al.* (1995). Conclui-se desses estudos, que há um conjunto básico de propriedades essenciais das argamassas de revestimento, independente do seu uso, factível de ser especificado em projetos e no controle de produção, ainda que com ampla variação de critérios, segundo as condições de aplicação ou de serviço do revestimento considerado, quais sejam: trabalhabilidade e densidade de massa aparente. Estas têm parâmetros definidos pela norma ABNT NBR 13281/2005.

#### 2.5.2.1 Trabalhabilidade e consistência

A trabalhabilidade pode ser considerada como uma propriedade subjetiva das argamassas, uma vez que não existe uma trabalhabilidade padrão a ser utilizada, sendo caracterizada pela consistência e plasticidade que descrevem a facilidade de mobilidade e a coesão, representada pela resistência à exsudação ou à segregação.

Sousa e Lara (2007) afirmam que a trabalhabilidade é uma das propriedades mais importantes no estado fresco, visto que indica convenientemente sua utilização.

A consistência é a propriedade na qual a argamassa no estado fresco tende a resistir às deformações. A quantidade de água existente na argamassa é o principal fator que influencia esta propriedade; além da relação água/aglomerante, aglomerante/agregado, granulometria do agregado, natureza e qualidade do aglomerante. Esta consistência está associada à trabalhabilidade (facilidade de manusear) a argamassa durante a sua aplicação, seja como revestimento de paredes e tetos e/ou pisos e contra-pisos.

Cincotto *et al.* (1995) classificam as argamassas quanto a consistência em:

- Argamassas secas: são aquelas às quais é necessária a aplicação de uma energia para conformá-las em sua forma final, em que a pasta preenche os vazios entre os grãos;
- Argamassas plásticas: são as argamassas que com a aplicação de um pequeno esforço atingem a sua forma final, em que a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados;
- Argamassas fluidas: são as argamassas que escorrem e se auto-nivelam, dispensando qualquer esforço, além da força da gravidade. Neste caso, os grãos ficam imersos na pasta.

Para avaliar a consistência de argamassas realiza-se os procedimentos prescritos na norma ABNT NBR 13276/2005, através da mesa de consistência (flow table) . Contudo conforme mencionado por Gazola (2007) este método é muito criticado, visto que não possui sensibilidade para medir a reologia da argamassa.

#### 2.5.2.2 Densidade de massa no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido está prescrito na norma ABNT NBR 13280/1995, representando a relação entre a massa e o volume aparente da argamassa. O valor da densidade de massa da argamassa é um indicativo da compacidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto; determina indiretamente o volume de vazios incorporados pelos aditivos e a quantidade de água de amassamento perdida por evaporação (FREITAS, 2010).

No estudo efetuado por Silva (2006) em argamassas, empregando areia natural ou britada, constatou-se que o aumento na relação cal/cimento diminui a densidade de massa para ambos os casos; para uma mesma relação agregado/aglomerante, o incremento no teor de cal reduz a densidade de massa além de aumentar o consumo de água.

A norma ABNT NBR 13281/2005 classifica as argamassas, segundo a densidade de massa aparente no estado endurecido, conforme ilustrado na Tabela 7. Essa

propriedade é avaliada segundo o procedimento definido pela ABNT NBR 13280/2005.

Tabela 7 - Classificação das Argamassas segundo a Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido.

Classe	Densidade de Massa Aparente no Estado Endurecido (kg/m <sup>3</sup> )
M1	≤ 1200
M2	1000 a 1400
M3	1200 a 1600
M4	1400 a 1800
M5	1600 a 2000
M6	> 1800

Fonte: ABNT NBR 13281, 2005.

### 2.5.2.3 Resistência mecânica

A resistência mecânica é usualmente definida como sendo a propriedade das argamassas de suportarem as ações de diferentes naturezas como: as oriundas da abrasão superficial, do impacto e de movimentação higroscópica e/ou estrutural; sendo a resistência à tração na flexão e à compressão axial determinadas segundo a norma ABNT NBR 13.279/2005.

A norma ABNT NBR 13281/2005 classifica as argamassas, segundo a resistência à compressão axial, conforme ilustrado na Tabela 8 e na Tabela 9 a resistência a tração na flexão. A ABNT NBR 13279: 2005 define o procedimento experimental.

Tabela 8 - Classificação das Argamassas segundo a Resistência à Compressão.

Classe	Resistência à Compressão Axial (MPa)
P1	≤ 2,0
P2	1,5 a 3,0
P3	2,5 a 4,5
P4	4,5 a 6,5
P5	5,5 a 9,0
P6	> 8,0

Fonte: ABNT NBR 13281, 2005.

Santos (2008) menciona que essa propriedade depende, basicamente, do consumo e da natureza dos agregados e aglomerantes empregados e da técnica de execução, sendo que esta última visa compactar as argamassas durante a sua

aplicação e acabamento. Há de se considerar, inclusive, a significativa influência da temperatura e da umidade no desempenho e vida útil das argamassas, bem como a resistência, que é inversamente proporcional ao consumo de água (relação água/cimento) devido ao aumento do índice de vazios.

Tabela 9 - Classificação das Argamassas segundo a Resistência à Tração na Flexão.

Classe	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
R1	≤1,5
R2	1,0 a 2,0
R3	1,5 a 2,7
R4	2,0 a 3,5
R5	2,7 a 4,5
R6	> 3,5

Fonte: ABNT NBR 13281, 2005.

#### 2.5.2.4 Capilaridade

A capilaridade ocorre quando um material poroso é posto em contato com a água em fase líquida. Este fenômeno resulta de propriedades particulares de umidificação dos grãos sólidos gerando-se a formação de interfaces curvas entre o fluido (água) e o ar contido no interior dos poros (FREITAS *et al.*, 2008). O coeficiente de capilaridade pode ser determinado segundo a norma ABNT NBR 15259/2005.

A norma ABNT NBR 13281/2005 classifica as argamassas segundo o coeficiente de capilaridade, conforme indicado na Tabela 10.

Tabela 10 - Classificação das Argamassas segundo o coeficiente de capilaridade

Classe	Coeficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )
C1	≤1,5
C2	1,0 a 2,5
C3	2,0 a 4,0
C4	3,0 a 7,0
C5	5,0 a 12,0
C6	> 10,0

Fonte: ABNT NBR 13281, 2005.

#### 2.5.2.5 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade estático de um material sob tensão ou compressão é dado pela declividade da curva tensão-deformação para o concreto ou argamassas sob

carga uniaxial, não sendo linear o que permite dividir este módulo em três tipos (MEHTA e MONTEIRO, 2008):

- módulo tangente que é dado pela declividade de uma linha traçada de forma tangente à curva de tensão-deformação em qualquer ponto desta curva;
- módulo secante que é obtido pela declividade de uma linha traçada da origem até um ponto da curva, que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura;
- módulo cordal que é dado pela inclinação de uma linha traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação, sendo o primeiro corresponde a 50  $\mu\text{m}$  e o segundo a 40 % da carga de ruptura.

A qualidade e a durabilidade de um revestimento de argamassa estão diretamente ligadas à capacidade de absorver deformações, que são medidas através do módulo de elasticidade (SILVA, 2006). Um material é considerado perfeitamente elástico se surgem e desaparecem deformações imediatamente após a aplicação ou retirada de tensões (NEVILLE, 1997).

Quando os módulos de elasticidade do substrato e do revestimento são muito distintos, podem ocorrer descolamentos do revestimento, condicionando a durabilidade da solução. Esta situação é agravada no caso do módulo de elasticidade do revestimento ser muito superior ao do substrato, uma vez que o revestimento suportará as tensões de compressão mais fortes e, devido à sua baixa espessura, é mais susceptível a fenômenos de encurvadura que podem provocar descolamentos localizados ou generalizados gerando fissuras (VEIGA, 2001).

Quando se diminui o módulo de elasticidade, o revestimento fica mais deformável, sendo capaz de aliviar parte ou toda a tensão do revestimento originada na sua secagem, (SILVA, 2006).

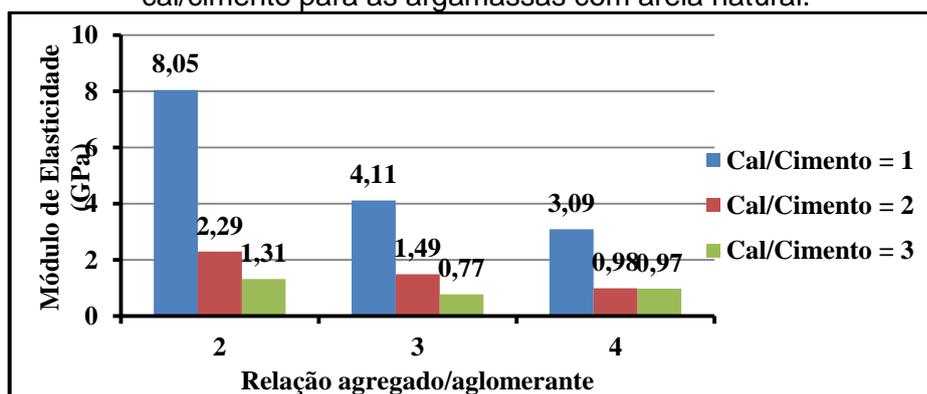
Apesar de o módulo de elasticidade poder influenciar o surgimento de fissuras por retração, segundo Silva (2006), é necessário que outros parâmetros sejam analisados em simultâneo, como o nível de tensão desenvolvido pelo grau de restrição do revestimento, a resistência à tração da argamassa e a distribuição do

tamanho dos poros – esta é afetada pela natureza e teor dos materiais constituintes e da água de amassadura.

O módulo de elasticidade dinâmico corresponde a uma deformação instantânea muito pequena e é dado por aproximação pelo módulo tangente inicial. Geralmente é de 20 a 40 % mais alto que o módulo de elasticidade estático (METHA E MONTEIRO, 2008). É utilizado para avaliar estruturas sujeitas a terremotos e impactos. Pode ser obtido com maior precisão por ensaio ultrassônico.

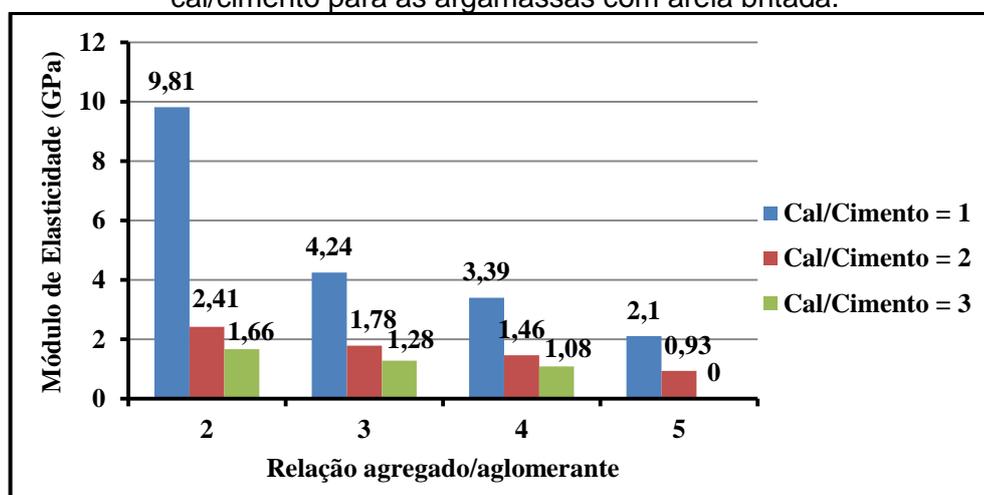
As Figuras 4 e 5 apresentam os valores dos módulos de elasticidade estáticos encontrados para a areia natural e britada para várias relações de agregado/aglomerante e cal/cimento, segundo Silva (2006).

Figura 4 – Módulo de elasticidade em função das relações agregado/aglomerante e cal/cimento para as argamassas com areia natural.



Fonte: Silva, 2006.

Figura 5 – Módulo de elasticidade em função das relações agregado/aglomerante e cal/cimento para as argamassas com areia britada.



Fonte: Silva, 2006.

Observando-se as Figuras 4 e 5, constata-se que à medida que quando as relações cal/cimento e agregado/aglomerante aumentam, diminui o módulo de elasticidade. Nota-se que essa relação é mais acentuada para a proporção agregado/aglomerante igual a 2, quando o teor de cimento for maior. Todas as argamassas produzidas com areia britada possuem módulo de elasticidade e resistências maiores do que as produzidas com areia natural, para um mesmo proporcionamento de materiais.

Materiais argamassados a base de cimento não apresentam o comportamento elástico, por serem heterogêneos. De acordo com Carvalho Jr. (2005) o princípio para determinar o módulo de elasticidade dinâmico consiste na existência de uma relação entre a velocidade de propagação do som através do material a ser analisado e a frequência de ressonância e o módulo de elasticidade desse material.

A velocidade do som é diretamente relacionada às características de vibração, à massa específica e as características elásticas do meio. Elasticidade é a capacidade de deformação que um material apresenta sem que ocorra ruptura, retornando as suas dimensões iniciais quando cessam as solicitações que lhe são impostas (CINCOTTO *et al.*, 1995).

Bastos (2003), através de uma abordagem geral dos conceitos e dos principais métodos de ensaio existentes para determinação do módulo de elasticidade em laboratório, constataram uma grande variabilidade dos resultados de acordo com o método e o formato dos corpos de prova a serem utilizados.

Existem, contudo, os métodos de determinação do módulo dinâmico, não-destrutivos, entre eles o de emissão de ondas ultrassônicas e o de emissão de ondas vibratórias através dos corpos de prova de argamassa. O primeiro é disseminado em diversos países e foi recentemente normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 15630/2008 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica). O segundo ainda é pouco realizado no Brasil.

Quando se aplica a lei de Hooke tem-se um valor que pode estar mascarado, pois o comportamento elástico dos constituintes é heterogêneo. Para que não houvesse essas variantes em um espaço amostral pequeno, optou-se neste trabalho por determinar o módulo de elasticidade através da metodologia da medida dinâmica. Carvalho Jr. (2005) ressalta que o princípio dessa determinação está embasado na existência da relação entre a velocidade do som através do material e a frequência de ressonância, e o módulo de elasticidade do material.

A velocidade do som é diretamente relacionada às características de vibração, à massa específica e às características elásticas do meio. CSTB (1982) *apud* Carvalho Jr.. (2005), apresenta que a avaliação poderia ser realizada através de três corpos de prova prismáticos de 2,5cm x 2,5cm x 28,5cm e o módulo de elasticidade dinâmico seria obtido pela Equação 4.1:

$$E_d = \frac{4L^2F^2P}{g} \times 10^{-6} \quad (4.1)$$

Onde:

Ed: módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, em N/mm<sup>2</sup>

L: comprimento do CP, em metros

F: frequência de ressonância, longitudinal, em hertz

P: peso volumétrico, N/m<sup>3</sup>

g: aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>

Já o módulo de elasticidade dinâmico (Ed) a ser determinado pelo método ultrassônico utiliza a Equação 4.2, de acordo com a norma BS-1881 Part 203.

$$E_d = v^2 \cdot \rho \frac{(1+\mu).(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (4.2)$$

Onde:

Ed = módulo de elasticidade dinâmico

$\rho$  = é a densidade de massa aparente do corpo-de prova, expressa em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ );

$v$  = velocidade com que a onda ultrassônica percorre o corpo-de-prova no sentido longitudinal (km/s);

$\mu$  = coeficiente de Poisson que, segundo Callister (2002), é a razão entre a deformação transversal e longitudinal quando, um corpo de prova é submetido a uma carga de compressão axial. Segundo Carneiro (1999), para argamassas o coeficiente varia de 0,10 a 0,20, sendo tanto menor quanto menor for a capacidade de deformação da argamassa. Foi adotado o valor de 0,20.

A velocidade da onda ultrassônica pode ser obtida utilizando a Equação 4.3.

$$v = \frac{d}{t} \quad (4.3)$$

Onde:

$d$  = altura do corpo de prova (em m);

$t$  = tempo (em segundos) que a onda ultrassônica leva para percorrer a distância  $d$ ,

#### 2.5.2.6 Retração

Segundo Silva (2006) “a retração é um fenômeno que ocorre pela diminuição do volume da argamassa quando da perda de água para o substrato por sucção, por evaporação ou pela reação química dos componentes do cimento e da cal”. (SILVA, 2006, p.57).

As fissuras por retração plástica podem surgir durante a etapa de desempenho e até mesmo depois da finalização do acabamento. Estas podem ser mapeadas, microfissuras ou visíveis a olho nu (SILVA, 2006). Estas fissuras podem ser de dois tipos, prejudiciais ou não. No primeiro caso, as fissuras permitirão a percolação de água na argamassa, prejudicando suas propriedades de durabilidade (Santos, 2008). A avaliação da durabilidade dependerá das características da argamassa.

Assim, quanto maior a estanqueidade melhor seria este parâmetro. Sendo que, aquelas que apresentam menor quantidade de fissuras são menos permeáveis (AGUILAR, *et al.*, 2004).

De acordo com Bastos (2001), a retração poderá ser classificada em plástica e no estado endurecido, de acordo com o estado físico da argamassa. O primeiro caso se caracteriza pela evaporação da água antes da pega de cimento, quando a parte sólida apresenta certa mobilidade de suas partículas, com redução volumétrica. O estado endurecido é conhecido com retração por secagem, sendo dependente do tamanho dos poros.

Segundo Silva (2006) a retração pode acontecer por outros fatores, além de evaporação da água. Estes podem ser provocados por retração térmica, carbonatação, hidratação do cimento e autógena, tipo de aglomerante, incidência da radiação solar, velocidade do vento, etc.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada nesta pesquisa consiste na coleta de dados gerados em laboratório para o entendimento e análise das propriedades constituintes da argamassa com RCD em substituição parcial do agregado miúdo, ampliando o conhecimento tecnológico atual, visando garantir a aplicação correta deste insumo que está ganhando notoriedade no segmento da construção civil.

#### 3.1 MATERIAIS

As argamassas estudadas confeccionadas com os seguintes materiais:

- cimento CP III-32 da marca Holcim do Brasil;
- cal Hidratada CH I da marca ICAL;
- areia natural quartzosa, proveniente do Rio Paraopeba, na cidade de Esmeraldas (MG), vide figura 6 e tabela 11 que classificam de acordo a com a normalização;
- resíduos de construção e demolição provenientes obra da reforma da Igreja Presbiteriana do bairro Nazaré, Belo Horizonte (MG), conforme classificação da figura 7 e tabela 12. O resíduo foi moído e peneirado, vide figura 6.

Figura 6 – Ilustração da estrutura do agregado de RCD.



Percebe-se que tanto o resíduo como a areia natural se enquadram na zona ótima da ABNT NBR NM 248/2003. É importante ressaltar que as diferenças entre diâmetros máximos (4,8 mm e 2,4 mm – RCD e areia natural), teor de argila (2,0% e 0,9%) e material pulverulento (9,7% e 3,1%) podem gerar diferenças expressivas no consumo de água e na trabalhabilidade das argamassas a serem confeccionadas.

Ressalta-se que o uso dos materiais elencados se deve a disponibilidade no laboratório de concreto da Escola de Engenharia da UFMG, assim como das condições ambientais da cidade de Belo Horizonte que permite utilizar um cimento de baixo calor de hidratação e baixa resistência inicial, sem prejuízos no prazo de execução.

Ressalta-se ainda, o uso de até 70% de escoria de alto-forno, neste tipo de cimento, tornando mais sustentável. Sendo que este é o objetivo desta pesquisa – encontrar um material mais sustentável utilizando resíduos.

## 3.2 MÉTODO

Foram adotados traços comumente utilizados no mercado da construção civil, em obras na cidade de Belo Horizonte.

### 3.2.1 Traços

A dosagem dos traços de argamassa foi realizada arbitrando valores de modo a manter a relação aglomerante (cal) + agregado igual a 10,1 kg, ou seja, traços variando de 6,4 a 10,1 na relação aglomerantes/ agregado, vide tabela 11.

Tabela 11 – Detalhamento dos traços em massa utilizados.

Traços				
Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Resíduos (kg)	Água (l)
1,000	0,500	9,600	0,000	2,258
1,000	0,000	5,050	5,050	2,258
1,000	0,500	4,800	4,800	2,258

Fonte: autor

Percebeu-se que com esta correlação, conseguiu-se manter o mesmo fator água/cimento para todos os traços, sem alterar a consistência da argamassa ( $260 \pm 10$  mm), de acordo com a norma ABNT NBR 13276/2005.

### 3.2.2 Programa experimental

Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos (molde 10 x 20 cm) e prismáticos (4 x 4 x 16 cm), de modo a atender os ensaios da tabela 12. Estes ensaios foram definidos em função da disponibilidade de equipamentos e mão de obra no laboratório no momento da execução do projeto.

Tabela 12 – Detalhamento dos ensaios realizados.

ENSAIO	Idade	nº CPs
Consistência <i>Flow Table</i> – ABNT NBR 13276/2005.	0	3
Resistência à tração na flexão - ABNT NBR 13279/2005	7	3
	32	3
	61	3
	110	3
Resistência à compressão Axial - ABNT NBR 13279/2005	7	6
	32	6
	61	6
	110	6
Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas – ABNT NBR NM 58/1996	7	4
	32	4
	61	4
	110	4
Módulo de elasticidade dinâmico pelo ultrassom– ABNT NBR 15630/2008	7	4
	32	4
	61	4
	110	4
Módulo de elasticidade dinâmico por frequência ressonante forçada	7	4
	32	4
	61	4
	110	4
Resistência à tração por compressão diametral - ABNT NBR 7222/2010	7	4
	32	4
	61	4
Absorção de água por imersão ABNT NBR 9778/1987.	110	4
	110	4
	110	4
Absorção de água por capilaridade ABNT NBR 15259/2005.	110	4
Porosidade - ABNT NBR NM 45/2006	110	4
Densidade de massa no estado endurecido – ABNT NBR 13280/1995.	110	4

Fonte: autor

Acredita-se que este são suficientes para este momento da pesquisa, que contempla a caracterização das argamassas e sua análise em relação às duas forma de obtenção do valor do módulo de elasticidade dinâmico (ultrassom e frequência ressonante forçada).

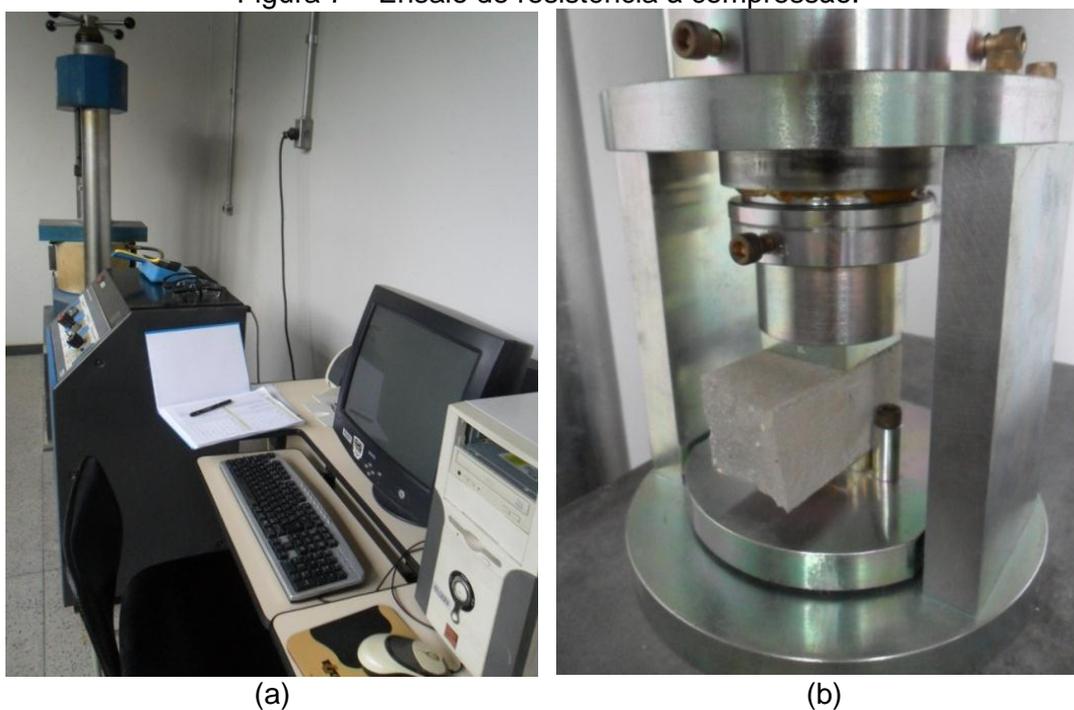
A seguir são descritos os critérios, metodologias e princípios dos ensaios realizados.

### 3.2.3 Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão está prescrita na norma ABNT NBR 13279/2005, sendo os corpos de prova prismáticos, com dimensões de 4 x 4 x 16 cm. Salienta-se que foram utilizados as metades dos corpos de prova do ensaio de tração na flexão, totalizando 6 (seis) corpos de prova para cada idade, a saber: 7, 32, 61 e 110 dias, sendo o resultado adotado a média dos valores e o desvio padrão.

A força de ensaio deve ser aplicada continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento de 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s, sendo a força de ruptura lida em kgf. A resistência à compressão pode ser obtida utilizando-se a Equação 5.1. As figuras 7 (a) e (b) ilustram o ensaio sendo realizado.

Figura 7 – Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: autor

$$f_c = \frac{F}{1600} \quad (5.1)$$

Onde:

$f_c$  – resistência à compressão axial (MPa);

F – força máxima obtida no ensaio (N);

A – área da seção transversal do corpo-de-prova (mm<sup>2</sup>).

### 3.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral está prescrito pela norma ABNT NBR 7222 (2010), sendo conhecido internacionalmente como “Brazilian Test”, por ter sido desenvolvido pelo pesquisador brasileiro Lobo Carneiro, e adotado pelas normas ASTM C 496, BS 1881-117 e ISO 4108. A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela Equação 5.2. A Figura 8 ilustra o ensaio de resistência à tração por compressão diametral em argamassas.

Figura 8 – Ensaio de compressão diametral.



Fonte: autor

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dL} \quad (5.2)$$

Onde:

$f_{ct,sp}$  – resistência à tração por compressão diametral em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F – força máxima obtida no ensaio (N);

d – diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L – altura do corpo-de-prova (mm).

### 3.2.5 Ensaio de resistência à tração na flexão

A resistência mecânica é a capacidade das argamassas de suportarem as tensões de tração, compressão ou cisalhamento às quais o revestimento pode estar sujeito. Conforme as normas técnicas aplicáveis a ensaios mecânicos em argamassas de revestimento, são usados corpos de prova prismáticos, com dimensões de 4 x 4 x 16 cm.

Da moldagem até a idade de ensaio, todos os corpos de prova forma mantidos em câmara úmida, cuja umidade relativa permaneceu acima de 95%, não imersos, com temperatura de  $26 \pm 5$  °C. A resistência à tração na flexão é então medida, de acordo com a norma ABNT NBR 13279/2005. As Figuras 9 (a) e (b) ilustram este ensaio.

A prensa utilizada foi da marca Contenco, com precisão de 1 kgf e carga máxima de 5 toneladas. A força de ensaio deve ser aplicada continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento de 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s, sendo a força de ruptura lida em kgf. A resistência à tração na flexão pode ser obtida utilizando-se a Equação 5.3.

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad (5.3)$$

Onde:

$R_f$  – resistência à tração na flexão (MPa);

$F_f$  – força máxima obtida no ensaio (N);

$L$  – distância entre os suportes (mm).

Figura 9 – Ensaio de resistência à tração na flexão.



(a)



(b)

Fonte: autor

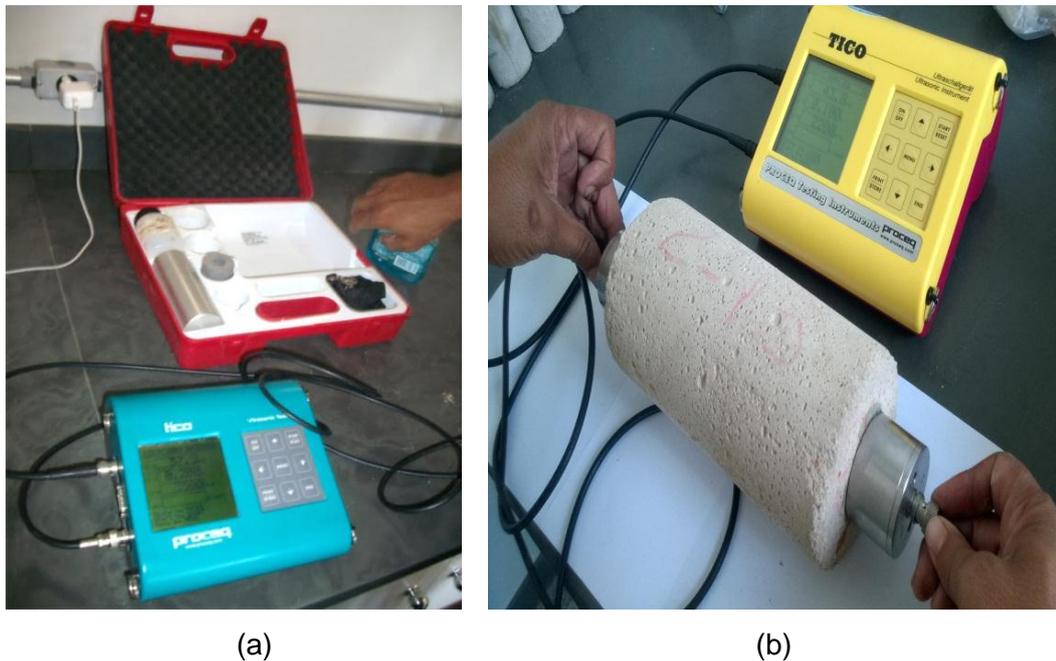
### 3.2.6 Medição do módulo de elasticidade dinâmico - método ultrassônico

Os corpos de prova cilíndricos (molde 10 x 20 cm) a serem utilizados nos ensaios de tração por compressão diametral foram usados para a medição do módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada e pelo método do ultrassom, nesta ordem.

Para avaliação do módulo de elasticidade dinâmico pelo ultrassom é necessário primeiramente realizar a medição da velocidade do pulso, sendo feito pelo aparelho TICO, da marca PROCEQ, com pulso de 54 kHz, vide figura 10.

Salienta-se que imediatamente após a moldagem, os corpos de prova são estocados em câmara úmida, tomando-se o cuidado de proteger a superfície exposta até a idade do ensaio, ou seja, 7, 32, 61 e 110 dias de idade.

Figura 10 – Ensaio de ultrassom.



(a)

(b)

Fonte: autor

São utilizados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) com as superfícies planas, lisas e isentas de sujeira; sendo confeccionados quatro exemplares. A velocidade de propagação de ondas é determinada em km/s, sendo obtida pela equação 5.4.

$$V = \frac{L}{t} \quad (5.4)$$

Onde:

V – velocidade de propagação (km/s);

L – distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores (km);

t – tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s).

$$E_d = v^2 \cdot \rho \frac{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}{1-\mu} \quad (5.5)$$

Onde:

Ed = módulo de elasticidade dinâmico

$\rho$  = é a densidade de massa aparente do corpo-de prova, expressa em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ );

$v$  = velocidade com que a onda ultrassônica percorre o corpo-de-prova no sentido longitudinal ( $\text{km/s}$ );

$\mu$  = coeficiente de Poisson que, segundo CALLISTER (2002), é a razão entre a deformação transversal e longitudinal quando, um corpo de prova é submetido a uma carga de compressão axial. Segundo CARNEIRO (1999), para argamassas o coeficiente varia de 0,10 a 0,20, sendo tanto menor quanto menor for a capacidade de deformação da argamassa. Foi adotado o valor de 0,20.

### 3.2.7 Medição do módulo de elasticidade dinâmico - frequência ressonante forçada.

Alguns corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm a serem utilizados nos ensaio mecânicos serão usados para a medição do módulo de elasticidade por frequência ressonante, utilizando o equipamento mostrado na figura 11. O módulo de elasticidade será calculado pela equação 5.6.

Figura 11 – Ensaio de frequência ressonante forçada.



Fonte: autor

$$E_D = 4 \cdot n^2 \cdot l^2 \cdot \rho \cdot 10^{-12} \text{ (MPa)} \quad (5.6)$$

Onde,

$n$  – frequência em Hz;

$l$  – comprimento em mm;

$\rho$  – massa específica em  $\text{kg/m}^3$ .

### 3.2.8 Massa Específica no Estado Endurecido

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido está prescrito na norma ABNT NBR 13280/1995. Este representa a relação entre a massa e o volume aparente da argamassa, vide figura 12. Pode-se obter medido a massa de um corpo de prova cilíndrico 10 x 20 cm e dividindo-a pelo volume deste corpo de prova. Caso este seja bem simétrico e regular pode avaliar o volume através de um paquímetro. Caso o corpo de prova seja irregular indica-se obter o volume pela balança hidrostática.

Figura 12 – Ilustração do processo de medidas para determinação da densidade de massa no estado endurecido.



(a)



(b)



(c)

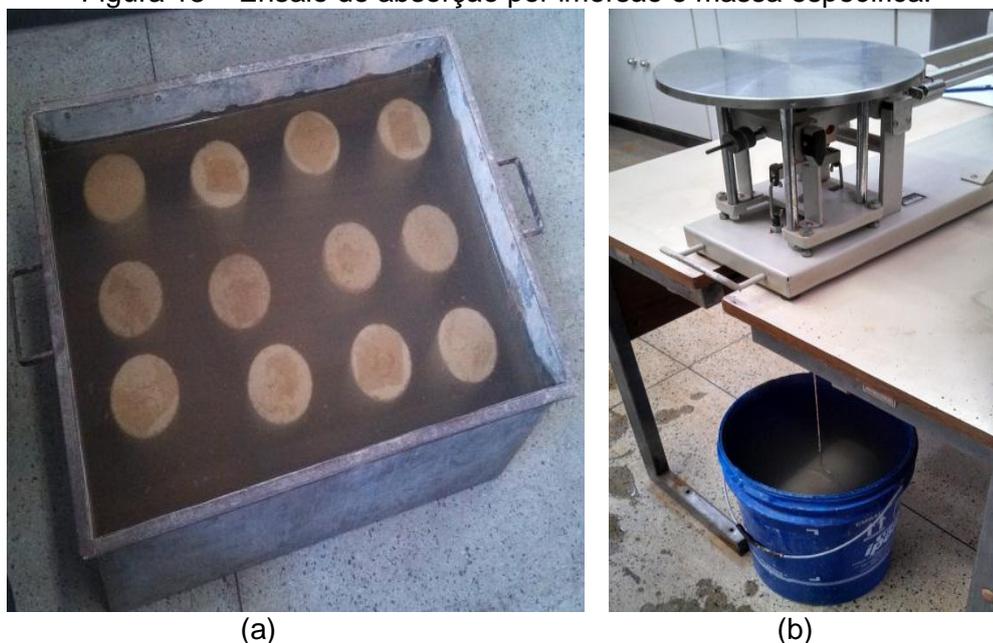
Fonte: autor

### 3.2.9 Absorção por Imersão e porosidade

O ensaio de absorção de água por imersão representa a capacidade máxima da argamassa de absorver água e é descrita pela norma ABNT NBR 9778/1987.

O ensaio consiste em colocar corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm na água e verificar qual máximo valor ele poderá absorver seguindo a sequência: colocar os corpos de prova em um recipiente contendo água por um terço de sua altura por 4 horas; mantê-los mais 4 horas a 2/3 da altura e completamente submersos nas 64 horas restantes. As Figuras 13 (a) e (b) ilustram os ensaios de absorção de água por imersão e massa específica real das argamassas.

Figura 13 – Ensaio de absorção por imersão e massa específica.



(a)

(b)

Fonte: autor.

Deve-se determinar a massa, decorridas 24h, 48h e 72h de imersão, sendo feita com corpo de prova com a superfície seca. Pode-se obter o valor da absorção por imersão pela equação 5.7.

$$A_i = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{seca}}}{M_{\text{seca}}} \times 100 \quad (5.7)$$

Onde:

$A_i$  – absorção de água por imersão (%);

$M_{sat}$  – massa do corpo-de-prova que ficou imerso em água (g) com superfície seca;

$M_{seca}$  – massa do corpo-de-prova seco (g);

$$A_i = \frac{M_{sat} - M_{seca}}{M_{seca} - M_{sub}} \times 100 \quad (5.8)$$

Onde:

$A_i$  – absorção de água por imersão (%);

$M_{sat}$  – massa do corpo-de-prova que ficou imerso em água (g) com superfície seca;

$M_{seca}$  – massa do corpo-de-prova seco (g);

$M_{sub}$  – massa do corpo-de-prova submerso (g);

### 3.2.10 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

Realiza-se o ensaio de absorção de água por capilaridade, segundo a norma ABNT NBR 9779 (1995) para de identificar a quantidade de água que pode ser absorvida pela argamassa através da ascensão capilar. Determina-se ainda o coeficiente de capilaridade segundo a ABNT NBR 15.259 (2005).

As medições das massas são efetuadas em 10 min., 90 min. 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 horas após a exposição dos mesmos à lâmina de água. Às 72 horas, rompem-se os corpos de prova cilíndricos de 10 x 20cm à compressão diametral e verifica-se a altura de ascensão da água no seu interior. A absorção de água por capilaridade é expressa em g/cm<sup>2</sup> e calculada dividindo o aumento de massa pela área da seção transversal da superfície do corpo de prova em contato com a água, de acordo com a Equação 5.9.

$$A_c = \frac{A - B}{S} \times 100 \quad (5.9)$$

Onde:

$A_c$  – absorção de água por capilaridade (%);

$A$  – massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água (g);

$B$  – massa do corpo-de-prova seco (g);

$S$  – área da seção transversal (cm<sup>2</sup>).

A Figura 14 ilustra o ensaio de absorção de água por capilaridade em argamassas. O coeficiente de capilaridade pode ser obtido pela equação 10.

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (5.10)$$

Onde:

$C$  = coeficiente de capilaridade, em g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>.

$m_{90}$  = massa dos corpos de prova a 90 minutos

$m_{10}$  = massa dos corpos de prova a 10 minutos

Figura 14 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: autor.

#### 4 RESULTADOS E ANÁLISES

As tabelas 13 e 14 e as Figuras 15 e 16 apresentam a caracterização dos materiais analisados neste trabalho.

Tabela 13 - Características físicas da areia natural.

<b>Composição granulométrica (NBR NM 248 (ABNT, 2003))</b>	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total Acumulado (%)
4,8	1
2,4	3
1,2	9
0,6	44
0,3	75
0,15	93
<0,15	100
Diâmetro máximo	2,4 mm
Módulo de finura	2,24
Massa específica real (NM 52/2009)	2,59 kg/dm <sup>3</sup>
Massa específica unitária (NM 45/2006)	1,53 kg/dm <sup>3</sup>
Teor de argila (NBR 7218/2010)	0,9 %
Teor de material pulverulento (NM 46/2001)	3,10%
Impureza orgânica (NBR NM 49/2001)	< 300p.p.m.

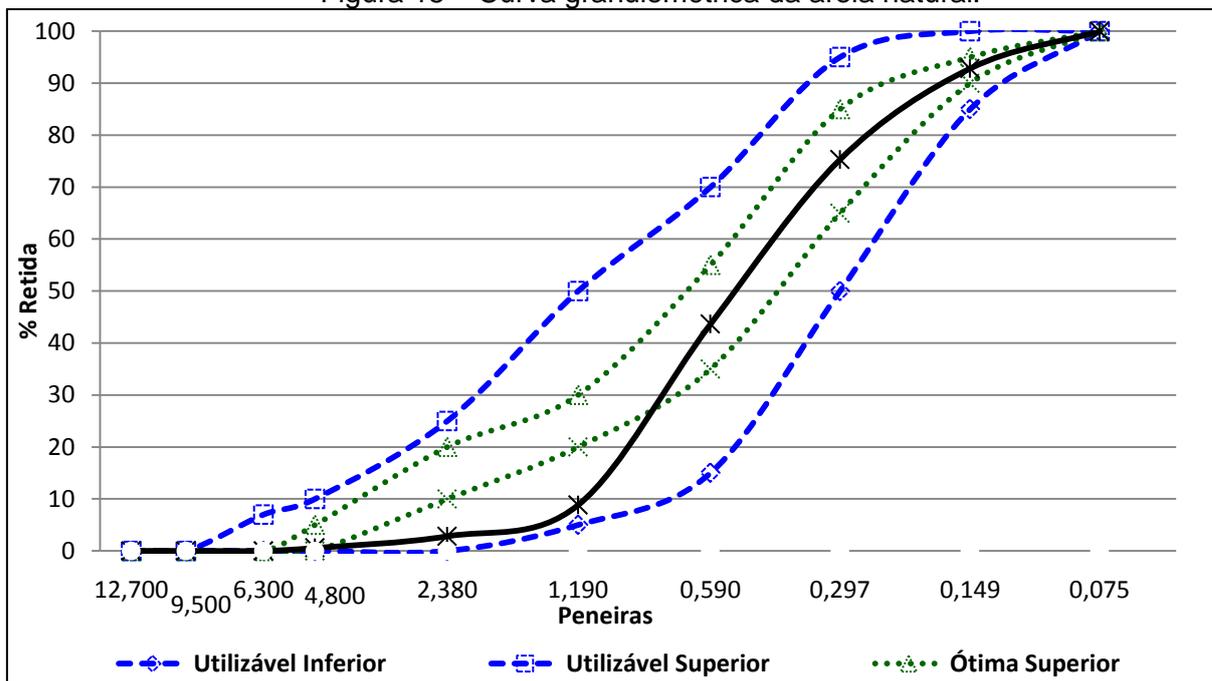
Fonte: autor

Tabela 14 - Características físicas da areia de RCD.

<b>Composição granulométrica (NBR NM 248 (ABNT, 2003))</b>	
PENEIRA – Abertura (mm)	Total Acumulado (%)
4,8	1
2,4	16
1,2	29
0,6	51
0,3	74
0,15	85
<0,15	100
Diâmetro máximo	4,8 mm
Módulo de finura	2,54
Massa específica real (NM 52/2009)	2,45 kg/dm <sup>3</sup>
Massa específica unitária (NM 45/2006)	1,27 kg/dm <sup>3</sup>
Teor de argila (NBR 7218/2010)	2,0 %
Teor de material pulverulento (NM 46/2001)	9,7 %
Impureza orgânica (NBR NM 49/2001)	< 300p.p.m.

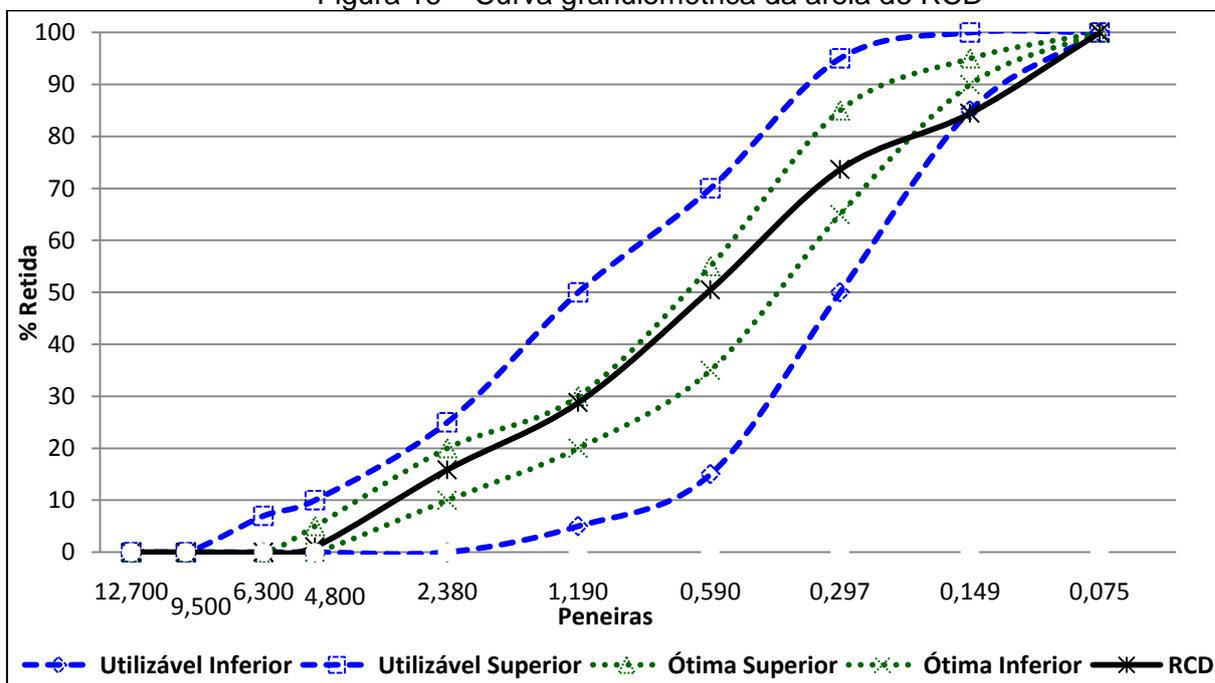
Fonte: autor

Figura 15 – Curva granulométrica da areia natural.



Fonte: autor.

Figura 16 – Curva granulométrica da areia de RCD



Fonte: autor

Percebe-se que ambos se enquadram-se na zona ótima, e com característica adequadas ao uso como agregado na construção civil, conforme ABNT NBR NM 248 (2003).

Neste capítulo são apresentados os resultados por propriedade avaliada, segundo projeto de pesquisa. A Tabela 15 traz as composições dos três traços utilizados: cimento, cal, areia, resíduo e água, para a confecção dos corpos de provas de argamassa. O fator água cimento se manteve constante em todos casos, cujo valor é 2,258, para uma consistência (*flow table*) de 260±10 mm.

Tabela 15 – Detalhamento dos traços utilizados.

	Traços				
	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Resíduos (kg)	Água (l)
1°(cal)	1,000	0,500	9,600	0,000	2,258
2° (resíduo)	1,000	0,000	5,050	5,050	2,258
3° (cal+resíduo)	1,000	0,500	4,800	4,800	2,258

Fonte: autor

#### 4.1 Resistência à compressão

Os resultados médios da resistência à compressão para diferentes idades para os três tipos argamassas analisadas são apresentados na Tabela 16 e no gráfico 1. Também são relatados na tabela os desvios padrões relativos a cada situação. No gráfico se tem os valores médios da resistência assim como a curva de melhor ajuste para cada tipo de argamassa. Observa-se que a evolução da resistência a compressão com idade é típica: quanto maior a idade maior a resistência. Os dados mostram que as argamassas confeccionadas com cal/areia e com areia/resíduo apresentam resistências próximas para todas as idades analisadas.

De acordo com a literatura agregados de resíduos absorvem mais água pois são mais porosos (ZORDAN, 1997). Sendo assim ao se comparar uma argamassa de areia com substituição parcial da areia por resíduo, para um mesmo fator a/c é de se esperar que a argamassas com resíduo apresentem maior resistência, pois a água efetiva para a reação é menor nessas argamassas, pois parte da água foi absorvida pelo resíduo: tudo ocorre como se a mistura tivesse uma menor relação água cimento nas argamassas com resíduo, o que implica uma maior resistência. Quando se adiciona cal nas argamassas confeccionadas com areia se tem uma relação água aglomerante menor, ou seja, esta argamassa apresentaria uma resistência maior. Dessa forma, ao se comparar uma argamassa com areia/resíduo com a argamassa areia/cal o aumento de resistência esperado para a argamassa com resíduo é

similar ao aumento proporcionado pela cal, o que explicaria os resultados obtidos (somatório dos efeitos positivos da mistura cal e resíduo na mesma argamassa).

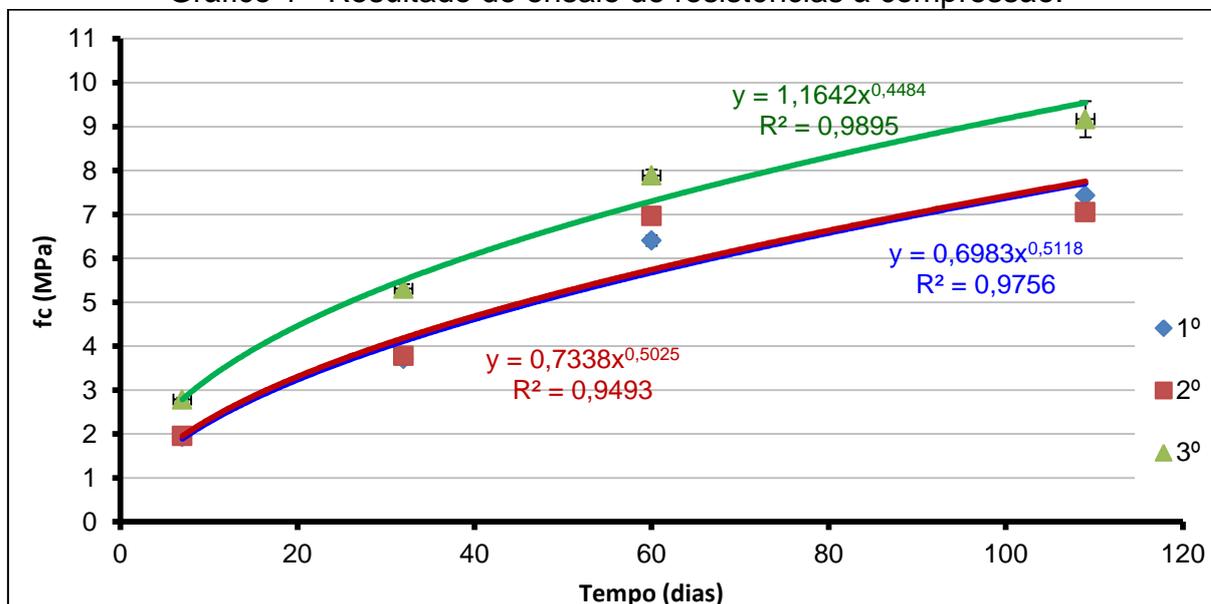
Os dados da Tabela 16 e no gráfico 1 também mostram que a resistência a compressão para argamassa com cal e resíduo apresentam valores superiores para todas as idades, ou seja, o efeito aglomerante somado a maior absorção de água do resíduo, para um mesmo fator água cimento, leva a maiores resistências.

Tabela 16 – Resultado do ensaio de resistência compressão

Traço	7 dias		32 dias		61 dias		110 dias	
	f <sub>c</sub> (MPa)	Desvio padrão (MPa)						
1 (cal)	1,93	0,08	3,70	0,04	6,40	0,12	7,43	0,07
2 (resíduo)	1,96	0,04	3,78	0,07	6,96	0,16	7,05	0,18
3 (cal+resíduo)	2,79	0,04	5,31	0,10	7,89	0,14	9,17	0,41

Fonte: autor

Gráfico 1 - Resultado do ensaio de resistências à compressão.



Fonte: autor

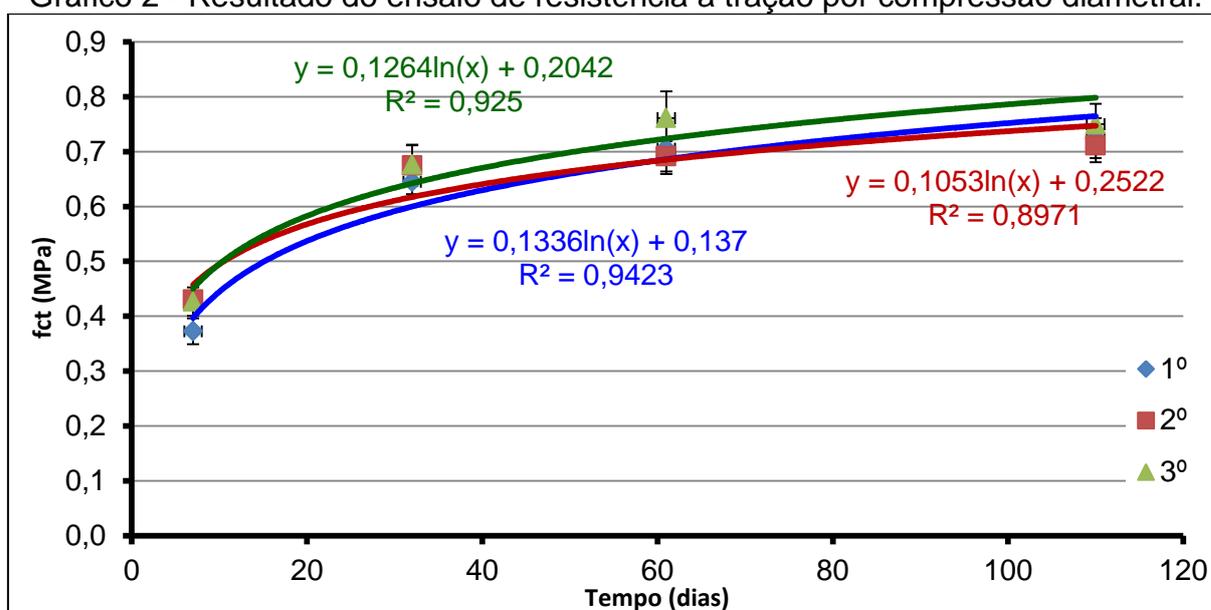
É importante destacar que para as 3 situações analisadas não observa uma tendência de estabilização da resistência com a idade, mesmo após 100 dias de cura. Isto provavelmente está relacionado com o uso do cimento CPIII cujas reações de hidratação são lentas.

Ressalta-se ainda que as argamassas são classificadas pela norma ABNT NBR13279/2005 aos 32 dias em P3/P4, ou seja, argamassas de resistência a compressão mediana para revestimento de paredes e tetos. Contudo, ao se analisar aos 110 dias, estas são classificadas com P6, ou seja, argamassas de alta resistência.

#### 4.2 Resistência a tração por compressão diametral

Os resultados médios da resistência à compressão diametral para diferentes idades para os três tipos argamassas analisadas são apresentados na Tabela 17 e no gráfico 2. Também são relatados na tabela os desvios padrões relativos a cada situação.

Gráfico 2 - Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.



Fonte: autor

No gráfico são apresentados os valores médios da resistência assim como a curva de melhor ajuste para cada tipo de argamassa. Observa-se que a evolução da resistência a compressão diametral com a idade é típica: quanto maior a idade maior a resistência. Os dados mostram que as argamassas confeccionadas com cal/areia e com areia/resíduo apresentam resistências próximas para todas as idades analisadas.

Tabela 17 – Resultado do ensaio de resistência compressão diametral

Traço	7 dias		32 dias		61 dias		110 dias	
	$f_{ct}$ (MPa)	Desvio padrão (MPa)						
1 (cal)	0,37	0,02	0,64	0,02	0,71	0,16	0,72	0,07
2 (resíduo)	0,43	0,08	0,67	0,07	0,69	0,05	0,71	0,03
3 (cal+resíduo)	0,43	0,05	0,68	0,07	0,71	0,16	0,75	0,07

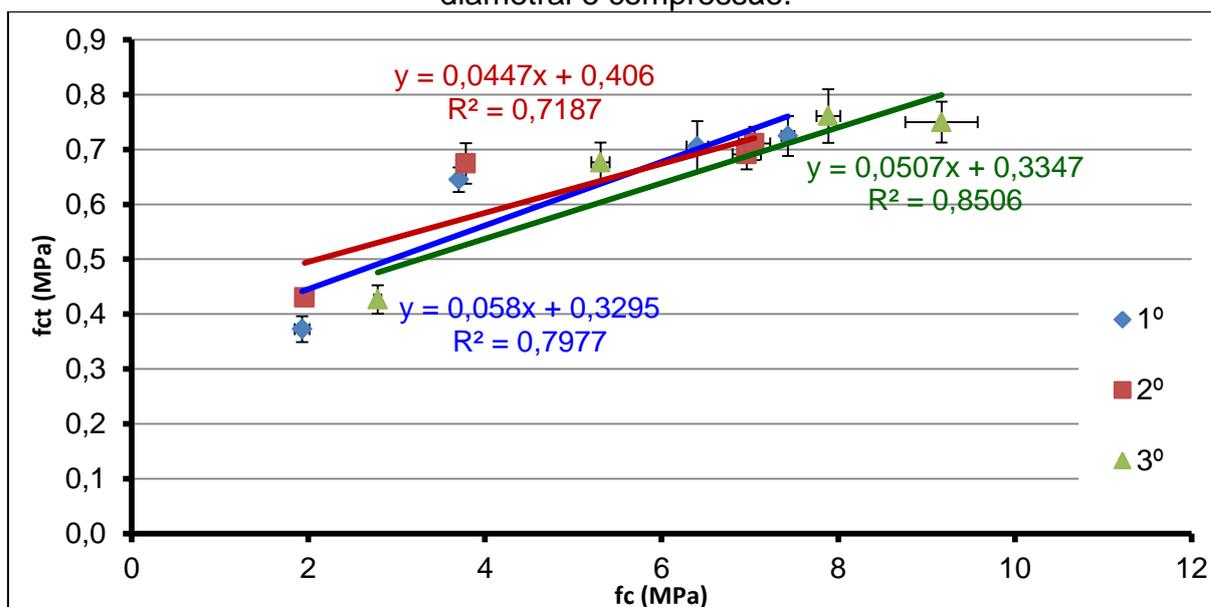
Fonte: autor

Considerando os erros experimentais inerentes as medições, pode-se inferir pelos dados acima que os valores de resistência à compressão diametral para as 3 idades não dependem dos constituintes das argamassas.

Com o desejo de entender a correlação entre a resistência a tração por compressão diametral e compressão axial traçou-se o gráfico 3.

Constata-se que aos 110 dias analisando o gráfico 3 que a correlação entre a compressão e tração por compressão diametral encontrados (em torno de 4,5% para o traço 1 e 5% para os traços 2 e 3) estão bem abaixo do indicado pela bibliografia que é entre 10% e 15% (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Gráfico 3 – Correlação entre os ensaios de resistência a tração por compressão diametral e compressão.



Fonte: autor

### 4.3 Resistência à tração na flexão

Os resultados médios da resistência a tração na flexão para diferentes idades para os três tipos argamassas analisadas são apresentados na Tabela 17 e no gráfico 2. Também são relatados na tabela os desvios padrões relativos a cada situação. No gráfico são apresentados os valores médios da resistência assim como a curva de melhor ajuste para cada tipo de argamassa. Observa-se que a evolução da resistência a tração na flexão com a idade é típica, assim como ocorreu com a resistência à compressão: quanto maior a idade maior a resistência.

Os dados mostram que as argamassas confeccionadas com cal/areia e com areia e resíduo apresentam resistências próximas para todas as idades analisadas. Sendo assim ao se comparar uma argamassa de areia com uma com substituição parcial da areia por resíduo, para um mesmo fator a/c, é de se esperar que a argamassas com resíduo apresente maior resistência, pois a água efetiva para a reação é menor nessas argamassa pois parte dela foi absorvida pelo resíduo, conforme frisado anteriormente.

Considerando a amplitude das medições observa-se que as argamassas com areia/cal e areia/resíduos apresentam resultados próximas e a argamassa com Areia/cal/resíduo apresenta resistência superior. Ou seja, foram observadas as mesmas tendências do ensaio de resistência a compressão.

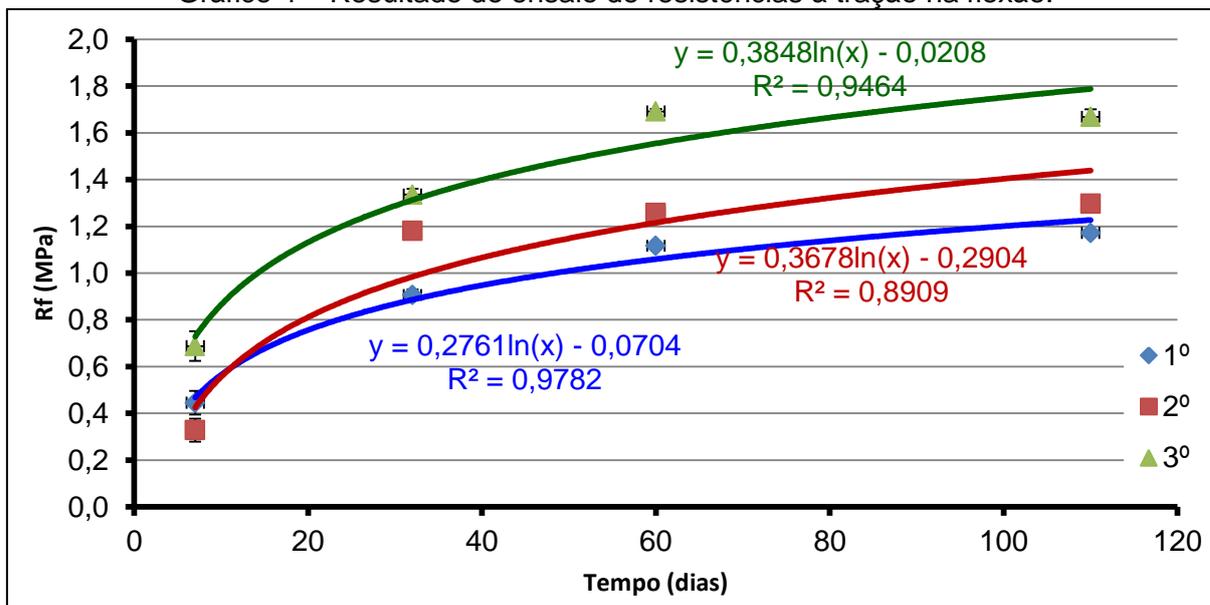
Tabela 18 – Resultado do ensaio de resistência a tração na flexão.

Traço	7 dias		32 dias		61 dias		110 dias	
	R <sub>f</sub> (MPa)	Desvio padrão (MPa)						
1 (cal)	0,45	0,05	0,91	0,02	1,12	0,01	1,17	0,01
2 (resíduo)	0,33	0,05	1,18	0,00	1,26	0,02	1,30	0,10
3 (cal+resíduo)	0,69	0,06	1,34	0,03	1,69	0,01	1,67	0,03

Fonte: autor

A partir dos 32 dias, observou-se que ocorreu aumento na resistência a tração na flexão quando na inclusão de RCD, sendo que o acréscimo foi mais expressivo na argamassa 3, em que a resistência aumentou 94%.

Gráfico 4 – Resultado do ensaio de resistências à tração na flexão.



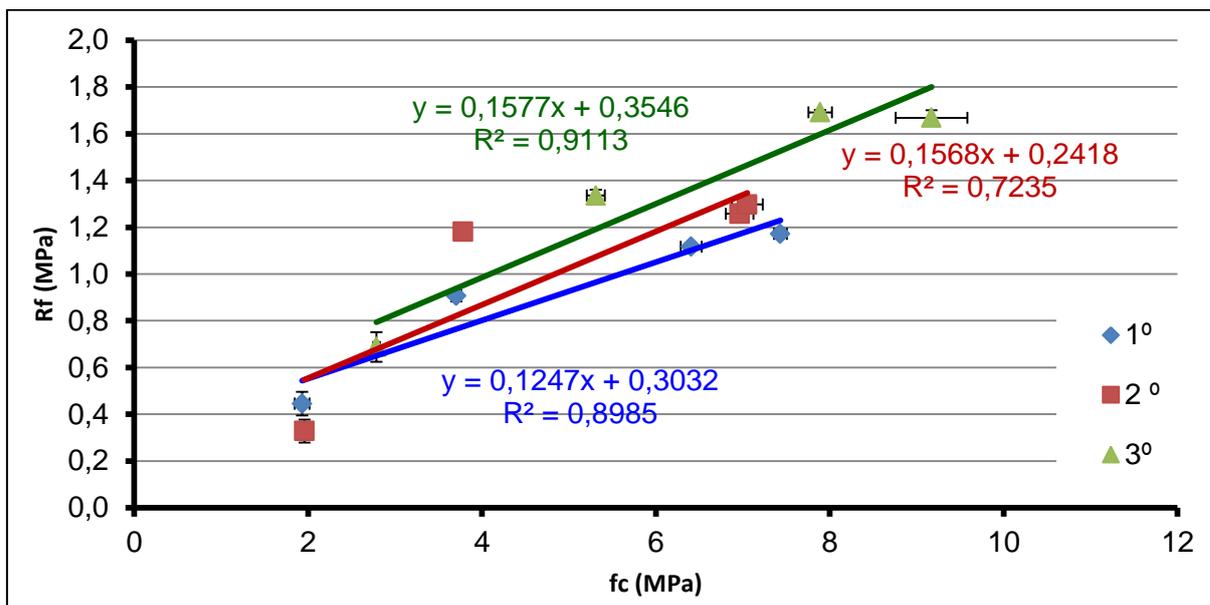
Fonte: autor

Observa-se que as argamassas são classificadas pela norma ABNT NBR13279 (2005) aos 32 dias em R2/R3, ou seja, argamassas de resistência a compressão mediana para revestimento de paredes e tetos. Mesmo com o aumento considerável da resistência a tração na flexão, percebe-se ao se analisar aos 110 dias estes ainda são classificadas com R2/R3.

O Gráfico 5 mostra a correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão.

Percebe-se que a resistência a tração na flexão se encontra entre 12,5% e 15,4% da resistência à compressão, revalidando as afirmações da bibliografia (MEHTA e MONTEIRO, 2008) e que a aproximação linear se apresenta de forma bem eficiente para estas propriedades. Isto posto, nota-se que provavelmente o ensaio de tração na flexão seja mais representativo para avaliação dessa propriedade que o ensaio de compressão diametral, conforme valores apresentados anteriormente.

Gráfico 5 – Correlação entre os ensaios de resistências à tração na flexão e compressão.



Fonte: autor

#### 4.4 Velocidade do pulso ultrassônico

Os resultados médios da velocidade do pulso ultrassônico para diferentes idades para os três tipos argamassas analisadas são apresentados na Tabela 19 e no gráfico 6. Também são relatados na tabela os desvios padrões relativos a cada situação. No gráfico são apresentados os valores médios das velocidades assim como a curva de melhor ajuste para cada tipo de argamassa. Observa-se que quanto maior a idade maior a velocidade do pulso.

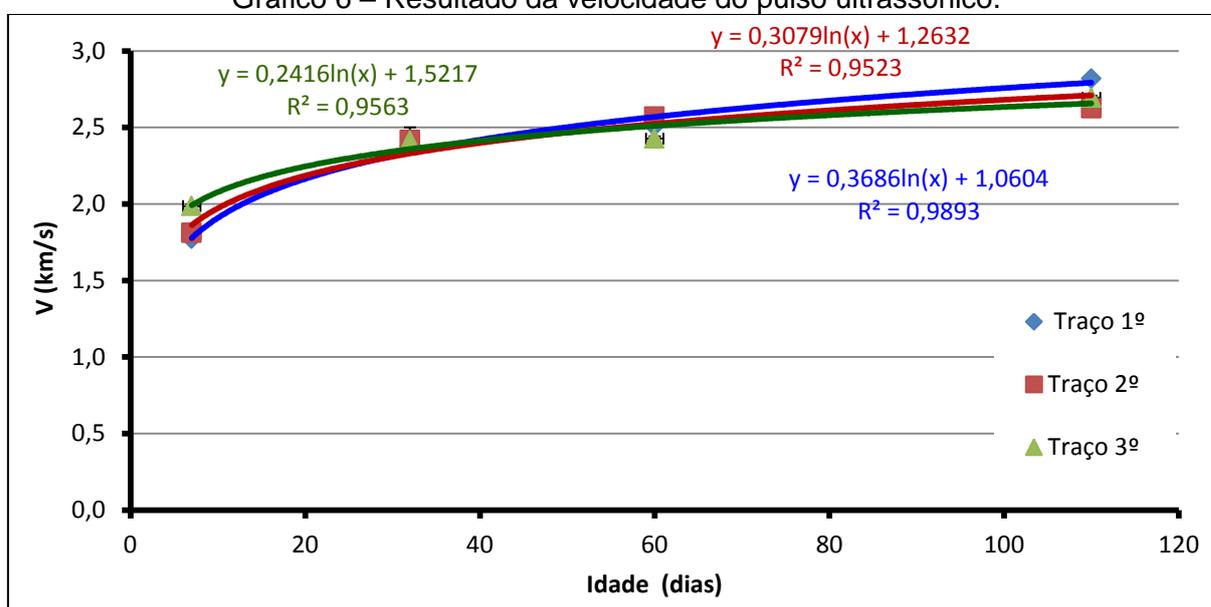
Os dados revelam que a velocidade do pulso ultrassônico, para todas as idades, independe da composição química da argamassa. O fato da velocidade crescer com a idade é esperado devido as reações de hidratação, uma vez que quanto maior a velocidade de propagação do pulso ultrassônico maior será a densidade do material e conseqüentemente menor a sua porosidade. Por outro lado, a velocidade ao retratar a porosidade do material é um indicativo da resistência: por este ensaio a composição da argamassa, que apresenta densidade da mesma ordem de grandeza, não afeta a resistência.

Tabela 19 – Resultado das medidas de velocidade do pulso ultrassônico

Traço	7 dias		32 dias		61 dias		110 dias	
	V (km/s)	Desvio padrão (km/s)						
1 (cal)	1,77	0,01	2,38	0,02	2,51	0,04	2,82	0,02
2 (resíduo)	1,81	0,01	2,42	0,01	2,57	0,03	2,62	0,02
3 (cal+resíduo)	1,99	0,01	2,41	0,09	2,43	0,02	2,69	0,01

Fonte: autor

Gráfico 6 – Resultado da velocidade do pulso ultrassônico.



Fonte: autor

#### 4.5 Módulo de elasticidade dinâmico pelo método do ultrassom

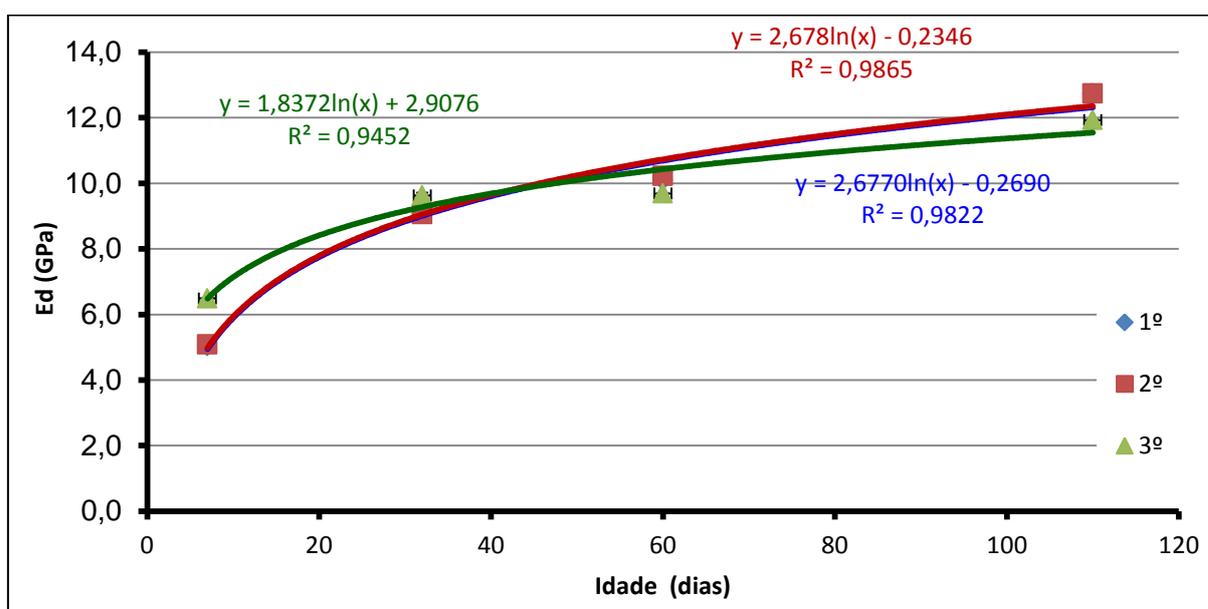
Os valores de módulo de elasticidade dinâmico determinado pelo método do ultrassom utilizando a equação 4.2 estão apresentados na Tabela 20 e no gráfico 7. São apresentados os valores médios do módulo de elasticidade e os desvios padrões obtidos para cada situação estudada. Os dados mostram que o módulo evolui de forma típica: o módulo aumenta com o tempo de cura. Praticamente não se observa a influência da presença de cal e de resíduos nos resultados. Os resultados mostram que a cal e os resíduos afetam de modo diferente a resistência e o módulo.

Tabela 20 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico pelo método ultrassônico.

Traço	7 dias		32 dias		61 dias		110 dias	
	Ed (GPa)	Desvio padrão (GPa)						
1 (cal)	5,04	0,03	9,08	0,15	10,10	0,35	12,74	0,15
2 (resíduo)	5,08	0,08	9,06	0,08	10,23	0,27	12,74	0,19
3 (cal+resíduo)	6,49	0,08	9,63	0,66	9,69	0,13	11,93	0,12

Fonte: autor

Gráfico 7 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico pelo método ultrassônico



Fonte: autor

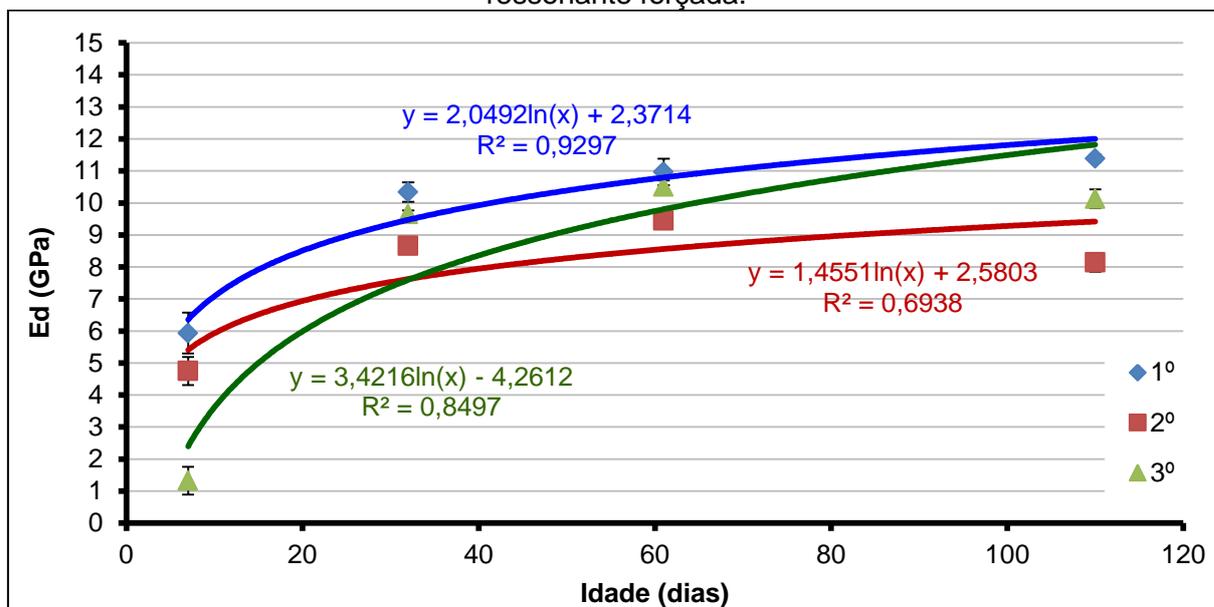
#### 4.6 Módulo de elasticidade dinâmico pelo método da frequência ressonante forçada

Os resultados médios do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pelo método da ressonância forçada para diferentes idades para os três tipos argamassas analisadas são apresentados na tabela 21 e no gráfico 8. Também são relatados na tabela 21 os desvios padrões relativos a cada situação. No gráfico 8 são

apresentados os valores médios da resistência assim como a curva de melhor ajuste para cada tipo de argamassa.

Os resultados, diferentemente dos obtidos com ultrassom, mostram influência da cal e dos resíduos nos valores obtidos. Também mostram tendências diferentes das observadas no ensaio de compressão. Isto é razoável uma vez que os mecanismos que regem tais comportamentos são distintos. O traço areia/cal/resíduo apresentou o menor valor nas primeiras idades, entretanto, teve um aumento considerável aos 61 dias, apresentando valor similar ao do traço areia/cal, que apresentou valores superiores em todas as idades.

Gráfico 8 – Resultado do módulo de elasticidade dinâmico pelo método da frequência de ressonante forçada.



Fonte: autor

Tabela 21 – Resultado do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico pelo método da ressonância forçada

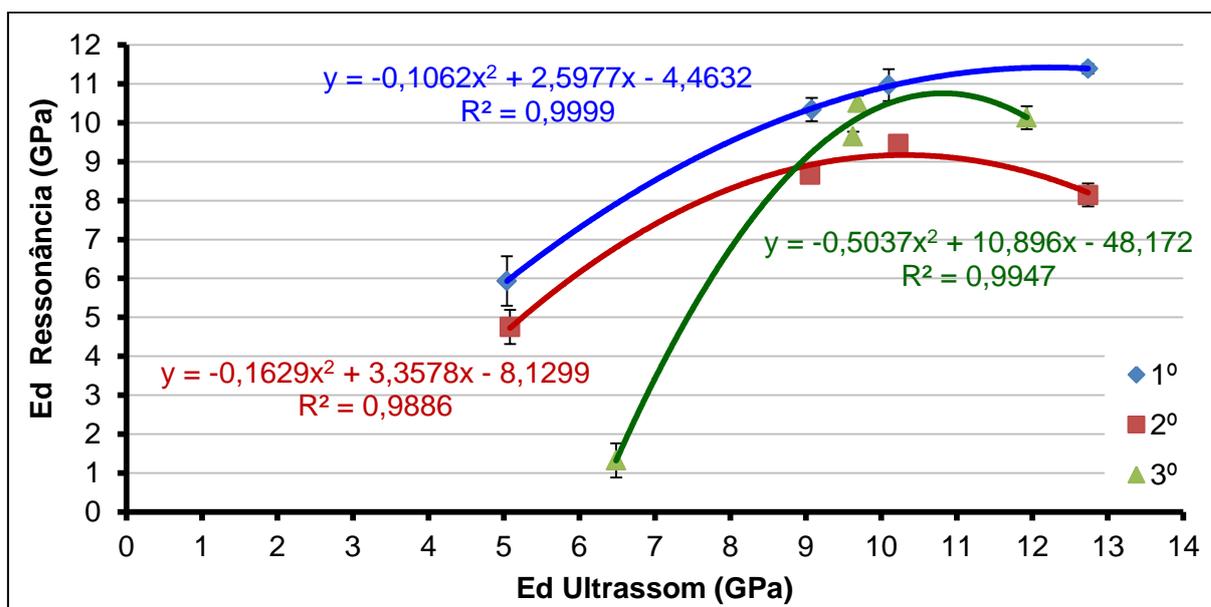
Traço	7 dias		32 dias		61 dias		110 dias	
	$E_D$ (GPa)	Desvio padrão (GPa)						
1 (cal)	5,93	0,64	10,34	0,30	10,97	0,41	11,39	0,12
2 (resíduo)	4,75	0,43	8,67	0,12	9,45	0,19	8,14	0,29
3 (cal+resíduo)	1,32	0,28	9,65	0,13	10,51	0,38	10,13	0,08

Fonte: autor

Observou-se que o uso do RCD não proporcionou melhores resultados quando comparado com a argamassa de referencia, (argamassa 1).

O gráfico 9 mostra a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico pelo método da frequência de ressonante forçada e pelo ultrassom. Não se observa uma relação esclarecedora entre os dois. Essa diferença poderia estar relacionada ao valor de Coeficiente de Poisson de 0,2 utilizado no cálculo do modulo utilizando a velocidade de propagação, sendo que talvez não seja o mais adequado para as argamassa analisadas, devido a não linearidade dos resultados obtidos.

Gráfico 9 – Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico pelo método da frequência de ressonância forçada e pelo ultrassom.



Fonte: autor

Indica-se pesquisas adicionais quanto a medição do módulo e normas de modo que essa propriedade possa ser melhor avaliada.

#### 4.7 Análise de propensão à fissuração

De acordo com Gomes (1995), existe uma interessante correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à tração na flexão das argamassas,

apontando para a propensão à fissuração das mesmas em função dos valores obtidos (referência: CSTB, 1982) conforme reproduzido na tabela a seguir.

As três argamassas analisadas (com cal e areia, com resíduo e com resíduo e cal) a partir dos 32 dias de idade apresentam valores de módulo de elasticidade dinâmico por ressonância forçada entre 7.000 e 12.000 Mpa, conforme a tabela 22, enquadrando-se na faixa de média fissurabilidade.

Tabela 22 – Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão

<b>Propriedade</b>	<b>Baixa Fissurabilidade</b>	<b>Média Fissurabilidade</b>	<b>Alta Fissurabilidade</b>
$E_d$ Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)	$E_d \leq 7000$	$7000 \leq E_d \leq 12000$	$E_d \geq 12000$
$\Delta l / l$ Retração (mm/m)	$\Delta l / l < 0,7$	$0,7 < \Delta l / l < 1,2$	$\Delta l / l > 1,2$
$E_d / f_t$ Correlação entre Módulo de elasticidade dinâmico e tração na flexão	$E_d / f_t \leq 2500$	$2500 < E_d / f_t < 3500$	$E_d / f_t > 3500$

Pela correlação entre o módulo de elasticidade pela frequência ressonante forçada e a resistência à tração na flexão ( $E_d/f_t$ ), os valores apresentados (9735, 6262 e 6365 MPa, respectivamente), estão acima de 3500 MPa, ou seja, são enquadrados como alta fissurabilidade. Nota-se que tanto a argamassa com resíduo como a argamassa com resíduo e cal apresentaram valores de correlação significativamente menores do que a argamassa com cal e areia.

Já a avaliação do módulo de elasticidade pelo método ultrassônico apresentou valores acima de 12.000 MPa para as argamassas com areia e cal e as argamassas com resíduo, ao passo que a argamassa com resíduo e cal apresentou valor inferior a 12.000 MPa. As duas primeiras enquadram-se com de alta fissurabilidade enquanto a terceira é enquadrada como média fissurabilidade.

A correlação entre o módulo de elasticidade pelo método ultrassônico e a resistência à tração na flexão ( $E_d/f_t$ ) apresentou valores de 10889, 9800 e 7144 MPa, respectivamente, indicando que as argamassas enquadram-se como alta fissurabilidade.

#### 4.8 Massa específica no estado endurecido

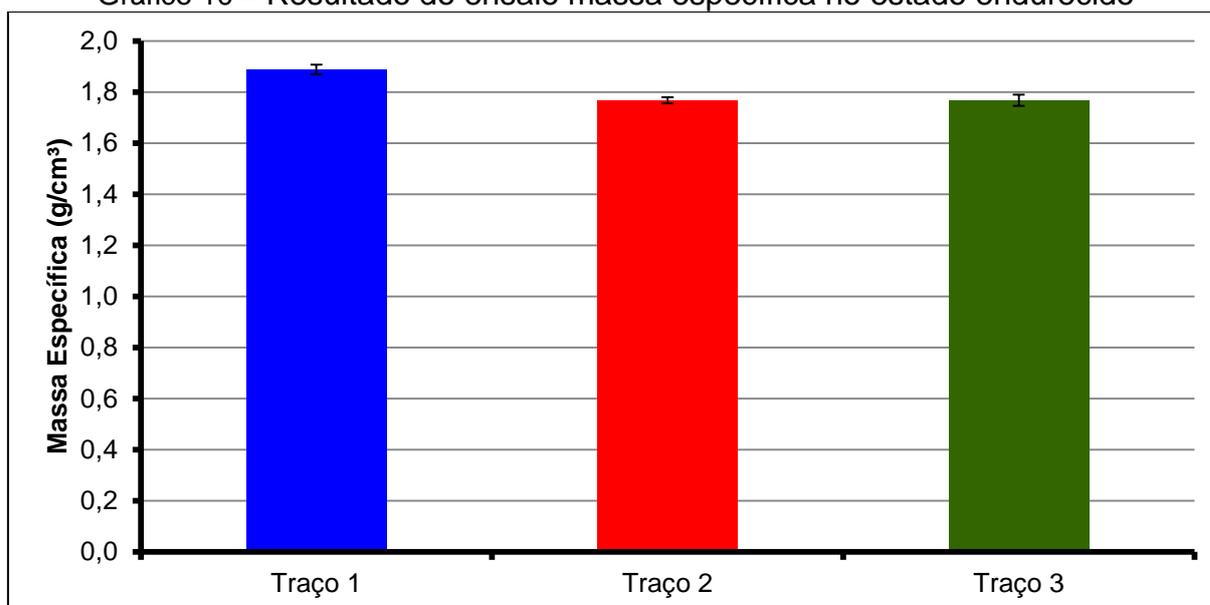
A Tabela 23 e o gráfico 10 apresentam os resultados dos ensaios de massa específica no estado endurecido dos corpos de provas cilíndrico (10 x 20cm).

Tabela 23 – Massa específica no estado endurecido

Traço	32 dias	
	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão (g/cm <sup>3</sup> )
1 (cal)	1,888	0,019
2 (resíduo)	1,768	0,012
3 (cal+resíduo)	1,768	0,022

Fonte: autor

Gráfico 10 – Resultado do ensaio massa específica no estado endurecido



Fonte: autor

Constatou-se ligeira diferença entre os resultados encontrados na idade de 32 dias, sendo adotado portanto esta idade como a de referência. Isto pode ser atribuído a menor massa específica do agregado de RCD em comparação com o agregado natural. As argamassas 2 e 3, apresentam resultados iguais, porem com comportamentos mecânicos distintos.

A diferença na massa específica no estado endurecido, inferior à 10%. Como descrito na literatura o uso de agregados reciclados conduz a compostos cimentícios de menor massa pois são agregados mais porosos (Zordan, 1997).

Quanto à classificação das argamassas em relação à norma ABNT NBR13279 (2005), tem-se M3/M4, ou seja, argamassas de densidade e massa no estado endurecido em condição mediana, logo, adequadas ao uso como revestimento de paredes e tetos.

#### 4.9 Absorção por capilaridade

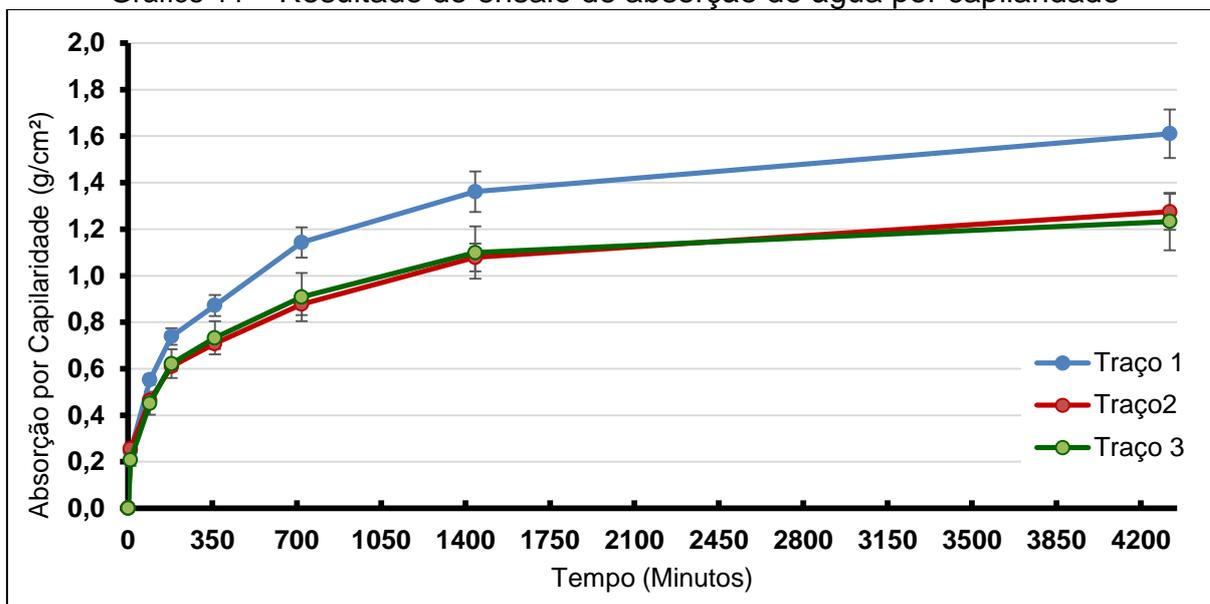
A Tabela 24 e o gráfico 11 apresentam os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade dos corpos de provas cilíndricos de argamassa (10 x 20cm) aos 110 dias de idade. Os dados são coerentes com os obtidos na resistência a compressão indicando que argamassas mais porosas absorvem mais.

Tabela 24 – Absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)

Tempo	t <sub>0</sub>	t <sub>10 min</sub>	t <sub>90 min</sub>	t <sub>3 horas</sub>	t <sub>6 horas</sub>	t <sub>12 horas</sub>	t <sub>24 horas</sub>	t <sub>48 horas</sub>
Traço 1	0,000	0,246	0,552	0,739	0,872	1,143	1,361	1,610
Desvio padrão T1	0,000	0,050	0,021	0,035	0,046	0,065	0,087	0,104
Traço2	0,000	0,256	0,464	0,610	0,708	0,877	1,078	1,275
Desvio padrão T2	0,000	0,010	0,014	0,019	0,023	0,047	0,059	0,077
Traço 3	0,000	0,208	0,451	0,621	0,733	0,908	1,099	1,233
Desvio padrão T3	0,000	0,027	0,049	0,062	0,071	0,103	0,112	0,123

Fonte: autor

Gráfico 11 – Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: autor

Constata-se ao analisar a tabela 23 e o gráfico 11 que a argamassa confeccionada com cal e areia apresentou valores superiores em relação as demais argamassas confeccionadas com resíduo e areia e com resíduo, areia e cal, que apresentaram valores próximos. Os resultados indicam que os resíduos dificultam a penetração da água, provavelmente devido à sua finura (efeito filler).

Outro fato a destacar é a classificação quanto ao coeficiente de capilaridade obtido pela norma ABNT NBR13279 (2005) aos 110 dias, sendo os valores obtidos de T1 =  $(11,86 \pm 0,64)$  g, T2 =  $(8,70 \pm 0,27)$  g e T3 =  $(9,54 \pm 0,96)$  g; convergindo para uma classificação de T1 como C6 e T2 e T3 como C5, de acordo com a norma ABNT NBR 13281/2005, corroborando a afirmação de que os dois últimos traços são melhores quanto a esta propriedade.

Percebe-se uma ligeira diferença entre os traço 2 e 3 o que pode ser justificado pela variação da relação aglomerante/agregado, promovendo a ocorrência de diferenças entre os vazios no traços devido ao efeito filler associada a ação aglomerante da cal.

Tem-se ainda a condição do traço 1 (cal e areia) que se apresenta superior ao traço 2 (resíduos e areia) e ao traço 3 (resíduo areia e cal), respectivamente, demonstrando que a presença do RCD promoveu o preenchimento dos poros, devido ao efeito filler dos seus finos reduzindo os valores desta propriedade. Pode-

se admitir, baseando-se nestes dados, que os traço 2 (resíduos e areia) e o traço 3 (resíduo areia e cal) apresentam-se como mais duráveis que o primeiro.

#### 4.10 Absorção por imersão

A Tabela 25 e o gráfico 12 apresentam os resultados dos ensaios de absorção por imersão dos corpos de provas cilíndrico de argamassa aos 110 dias de idade.

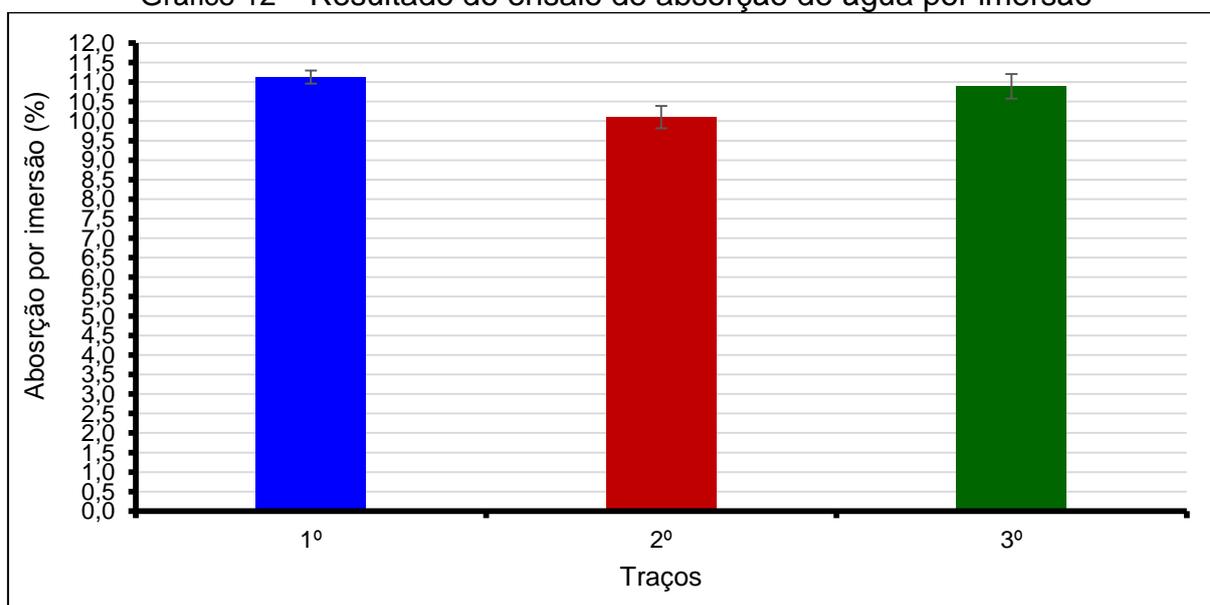
Tabela 25 – Absorção de água por imersão

Traço	110 dias	
	Ai (%)	Desvio padrão (%)
1 (cal)	11,16	0,17
2 (resíduo)	10,10	0,29
3 (cal+resíduo)	10,89	0,32

Fonte: autor

Constata-se pela tabela 23 e pelo gráfico 11, que da mesma forma que a absorção por capilaridade, os traço 2 (resíduos e areia) traço 3 (resíduo areia e cal) apresentam-se menos porosos e portanto mais duráveis, uma vez que a menor condição de absorção reduz a possibilidade da inserção de elementos nocivos, tais como cloretos e sais solúveis.

Gráfico 12 – Resultado do ensaio de absorção de água por imersão



Fonte: autor

#### 4.11 Porosidade

A Tabela 26 e o gráfico 13 apresentam os resultados dos ensaios porosidade superficial dos corpos de provas cilíndrico de argamassa aos 110 dias de idade.

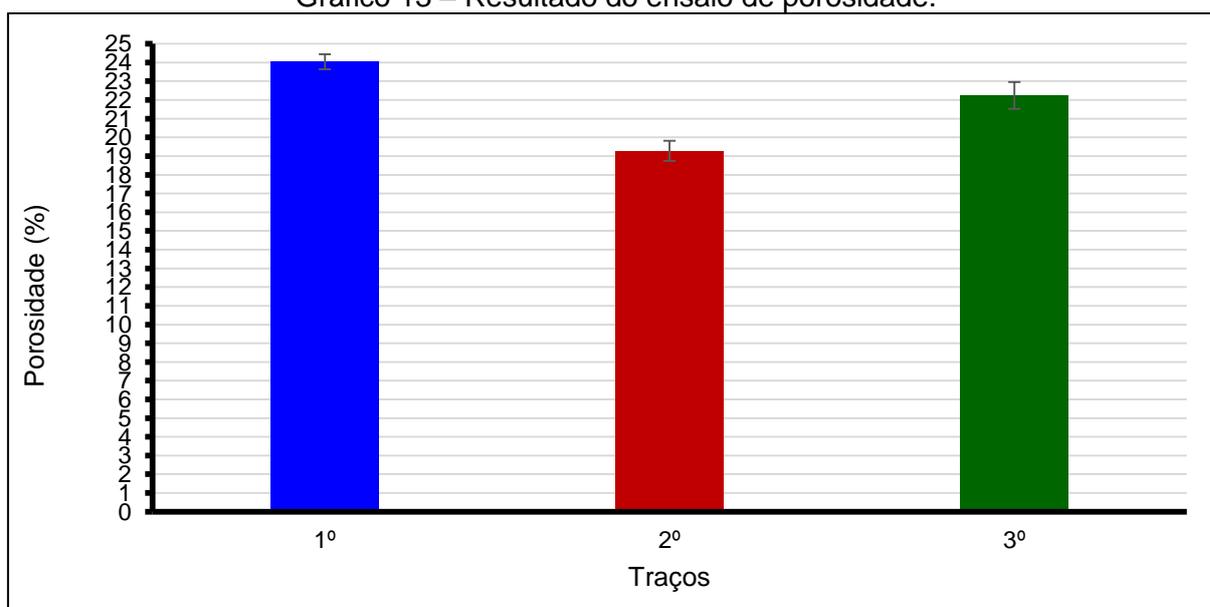
Tabela 26 – Porosidade superficial dos traços de argamassa

Traço	32 dias	
	Ps (%)	Desvio padrão (%)
1 (cal)	24,04	0,42
2 (resíduo)	19,28	0,54
3 (cal+resíduo)	22,24	0,72

Fonte: autor

Os resultados demonstram que os traços 1 (areia e cal) e traço 3 (resíduo areia e cal) apresentam valores de absorção bem próximos, ao passo que o traço 2 (resíduos e areia), que apresenta resíduos em sua composição, apresenta menores valores relativos. A amostra com uso de resíduos apresenta menor porosidade aberta.

Gráfico 13 – Resultado do ensaio de porosidade.



Fonte: autor

#### 4.12 QUADRO RESUMO DE TODAS AS PROPRIEDADES ANALISADAS

Idade dos ensaios	Traço 1 (argamassa convencional)				Traço 2 (adição de resíduo)				Traço 3 (adição de resíduo e cal)			
	7	32	61	110	7	32	61	110	7	32	61	110
Resistência à compressão axial	1,93	3,7	6,4	7,43	1,96	3,78	6,96	7,05	2,79	5,31	7,89	9,17
Resistência à tração por compressão diametral	0,37	0,64	0,71	0,72	0,43	0,67	0,69	0,71	0,43	0,68	0,71	0,75
Resistência à tração na flexão	0,45	0,91	1,12	1,17	0,33	1,18	1,26	1,3	0,69	1,34	1,69	1,67
Módulo de Elasticidade dinâmico pelo ultrassom	5,04	9,08	10,1	12,74	5,08	9,06	10,23	12,74	6,49	9,63	9,69	11,93
Módulo de Elasticidade dinâmico por frequência ressonante forçada	5,93	10,34	10,97	11,39	4,75	8,67	9,45	8,14	1,32	9,65	10,51	10,13
Massa específica no estado endurecido	1,888				1,768				1,768			
Absorção de água por capilaridade	11,86				8,7				9,54			
Absorção de água por imersão	11,16				10,1				10,89			
Porosidade	24,04				19,28				22,24			

## 5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados encontrados pode-se concluir que tanto os agregados naturais como os de RCD apresentam-se adequados ao uso em argamassa, sendo que os proporcionamentos propostos conduzem ao reaproveitamento de resíduos sem depreciação das propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento de paredes e tetos.

De forma geral, pode-se admitir:

- As argamassas com RCD traços 2 (resíduos e areia) e traço 3 (resíduo areia e cal) apresentaram valores de resistência à compressão, tração na flexão e por compressão diametral iguais ou superiores à argamassa de referência traço 1 (areia e cal).
- As avaliações da porosidade e absorção por imersão e capilaridade apresentaram menores valores para as argamassas com RCD traço 2 (resíduos e areia) traço 3 (resíduo areia e cal) em relação à argamassa de referência, indicando um provável desempenho superior;
- Os resultados obtidos nesta pesquisa referentes ao módulo de elasticidade dinâmico por ressonância forçada e ultrassônico apontam para a necessidade da realização de mais ensaios, em consonância com as metodologias, equipamentos e normas, aqui expostas.

Quanto as correlações, percebe-se que as mesmas se apresentaram adequadas ( $R^2$  próximo de 1) permitindo estimar os valores de algumas propriedades em função dos resultados encontrados.

Finalmente, conclui-se que a inserção de resíduo de construção e demolição em substituição parcial à areia natural, no proporcionamento de 50% e com a mesma proporção de água, permite a garantia de obtenção de uma argamassa com bom desempenho em relação aos quesitos avaliados neste trabalho e representa uma boa alternativa para destinação de resíduos e promoção de materiais de construção mais sustentáveis, sem prejuízo da trabalhabilidade e durabilidade do produto final.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

- . Realizar ensaios com outros tipos de resíduos comparando os resultados;
- . Realizar a análise química e mineralógica do resíduo através de microscopia eletrônica de varredura com microanalisador EDS, difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX);
- . Realizar testes de arranchamento para determinação da resistência de aderência da argamassa aplicada como revestimento;
- . Realizar ensaio de absorção de umidade no agregado miúdo e no resíduo;
- . Realizar ensaio de módulo de elasticidade estático nos corpos de prova de argamassa.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, M. T., CORRÊA, E., CARVALHO JUNIOR, A. N., GOMES, A. M., & CETLIN, P. R. (2003). Qualificação de Argamassas de Revestimento Utilizando o Módulo de Elasticidade Dinâmico e a Resistência Mecânica. *59º Congresso Anual da ABM*, (pp. P. 1629-1634).

ANDRADE, W. P. *et al* – Equipe De Furnas Laboratório De Concreto. Concreto massa, estrutural, projetado e compactado com rolo. Ed. São Paulo: Pini, 1997.

Ângulo, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. N. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. [S.l.]: [s.n.]. 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Cal hidratada para argamassas – NBR 7175. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. Agregados para concreto - Especificação - NBR 7211. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis – NBR 7218. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos – NBR7219. Rio de Janeiro, 1987

\_\_\_\_\_. Agregado – Determinação das impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo – NBR 7220. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Determinação da massa unitária da areia natural e do RCD- NBR 7251. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. Agregados – determinação da massa de agregados miúdos por meio do frasco Chapman – NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. NBR 13276. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. NBR 13279. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido – NBR 13281. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – determinação da resistência de aderência à tração - NBR 13528. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica - NBR 15630. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. Agregados – determinação da composição granulométrica – NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - Methodes d'essai pour mortier à maçonner – partie 11: détermination de la résistance à la flexion et em compression du mortier durci -EN-1015. Brussels, 1993.

BASTOS, P. K. X. Módulo de deformação de argamassas de revestimento - conceitos e métodos de determinação. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 5., São Paulo, 2003. Anais. São Paulo, ANTAC, 2003.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Testing concrete - Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete, BS 1881:Part 203:1986. Londres, 1986.

CALLISTER, W. D. Ciências e engenharia de materiais: uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV, 2001, Brasília. Anais... Brasília: PECC / ANTAC, 2001.p43-67.

CARNEIRO, A. M. P. Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas. 1999. 203 p. Tese (Doutorado em Engenharia da Construção Civil e Urbana)– Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARVALHO JR. A. N. Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico. 2005. 331 fl. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

CATAPRETA, A. A. C., PEREIRA, C. J., ALMEIDA, H. A., Avaliação do desempenho das usinas de reciclagem de resíduos de construção civil de Belo horizonte, Brasil. In: XXXI CONGRESSO INTERAMERICANO AIDIS. Santiago – CHILE . Centro de Eventos Casa Piedra . 12 – 15 Octubre de 2008.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB) – Modalités d'essais des enduits extérieurs d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques. Cahier n° 1779, 1982. apud GOMES, A. M., Caracterização de argamassas tradicionais utilizadas nos revestimentos exteriores dos edifícios. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico (IST), 1995. 269p. (Tese, Doutorado em Engenharia Civil).

CENTRIC. Projetos: entulho bom. Disponível em: [http://cetric.com.br/blog/?page\\_id=63](http://cetric.com.br/blog/?page_id=63). Acesso em 26/10/2013.

CETIN, Aykut e CARRASQUILLO, Ramon L. High Performance Concrete: *Influence of Coarse Aggregate on Mechanical Properties*. ACI Materials Journal, p. 252-261, Mai.Jun., 1998.

CINCOTTO, M. A., BOLORINO, H. A influência do tipo de cimento nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II, 1997, Salvador. Anais... Salvador: CETA / ANTAC, 1997 .p15-25.

CINCOTTO, M.A.; SILVA, M.A.C.; CASCUDO, H.C. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995,118p. (Boletim 68 - Publicação IPT 2378).

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 307, de 05 de julho de 2002. Brasília. Diário Oficial da União, de 30 de Agosto de 2002, seção I, p. 17.241.

CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V. M. Cal na Construção Civil. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Materiais de Construção Civil: e princípios de ciência e engenharia de materiais*. 1. Ed. São Paulo: IBRACON, 2007. 2 v. p. 695-725. Cap. 22

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. Revestimento de argamassa. Disponível em: <http://www.comunidadeconstrucao.com.br/sistemas-estrutivos/4/caracteristicas/o-sistema/61/caracteristicas.html>. Acessado em: 08/03/2014.

CONTANZA, R., ALPEROVITZ, G., Daly, H., & FARLEY, J. (2013). Construindo uma Economia na Sociedade na Natureza Sustentável e Desejável . Em E. Athayde, *A Sustentabilidade Ainda é Possível* (pp. p. 78-94). Salvador. UMA.

FREITAS, Cleverson de. Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido. Curitiba, 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná.

FREITAS, V. P.; TORRES, M. I.; GUIMARÃES, A. S.. Humidade Ascensional. Portugal: Feup Edições, 2008. 106p

GALLEGOS, H.; CASABONNE, C. Albañilería Estructural. Peru: Fondo Editorial, 2005. Tercera Edición .427p

GAZOLA, A. P.; Argamassa de assentamento e revestimento fabricada com compósito de cimento: madeira: serragem da madeira de *Pinus Taeda*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, Santa Catarina, 2007.

GUIMARÃES, J. E. P. A cal. Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil 2ª ed. São Paulo: Pini, 2002. 341p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Contas de Valores trimestrais: indicadores de volume e valores corrente, 2013. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/00000014495008132013502830816470.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/00000014495008132013502830816470.pdf)>. Acessado em 07 de Janeiro de 2014.

JOHN, V. M. J. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: Carneiro, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. (Org.).Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção: projeto entulho bom. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, cap. 1, 2001, p. 28-45.

MARTINS, A. et al. Apostila de treinamento de mão de obra para construção civil: Cimento. Cia. de Cimento Itambé. Curitiba, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: PINI, 2008.

MIRANDA, L.F.R. Estudos de Fatores que influem na fissuração de revestimento de argamassa com entulho reciclado. São Paulo, 2000. 190p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MIRANDA, L.F.R.; SELMO, S.M.S. Argamassas com entulho reciclado. *Téchne*, Pini. 74, p.68-71. Maio/Junho. 2003.

MIRANDA, L.F.R. Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos classe A da construção civil. São Paulo, 2005. 474p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, de São Paulo.

MIRANDA, L. F. R. Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil. 2005. 439p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

MUNOZ, J. F.; TEJEDOR, M. I.; ANDERSON, MARC A.; CRAMER, S. M. Detection of Aggregate Clay Coating and Impacts on Concrete. *ACI Materials Journal*, p. 387-395, Jul.-Ago., 2010.

NEVILLE, ADAM M.: Propriedades do concreto – Elasticidade, retração e fluência (capítulo 9). Editora Pini, São Paulo, 1997.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil. Como implantar um Sistema de Manejo e Gestão dos Resíduos da Construção Civil nos Municípios. Brasília: Caixa Econômica Federal; Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente, 2005. v. 1, 198p.

RESENDE, D.S. Caracterização de resíduos sólidos de estação de tratamento de esgoto da indústria de batatas e avaliação como adição para a produção de compósitos cimentícios. Ouro Preto, 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto.

SABBATINI, F. H. Agregados miúdos para argamassas de assentamento. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., São Paulo, 1986. Anais. São Paulo, EPUSP, 1986. p. 17-25.

SANTOS, M. L. L. de O. Aproveitamento de Resíduos Minerais na Formulação de Argamassas para a Construção Civil. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande no Norte. Natal, Agosto de 2008.

SANTOS, W. J. Argamassas de alto desempenho. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora. Natal, Agosto de 2011.

SELMO, S.M.S. Agregados miúdos para argamassas de revestimento. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO: AGREGADOS, 1., São Paulo, 1986. Anais. São Paulo, EPUSP, 1986. p.27-43.

SELMO, S.M.S. Prevenção de patologia em revestimentos externos de argamassa dos edifícios: a importância dos serviços de manutenção. IN: SIMPÓSIO SOBRE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES: PREVENÇÃO E RECUPERAÇÃO, Porto Alegre, 1989. Anais. Porto Alegre, UFRGS, 1989. p.195-212.

SENGUL, O.; TASDEMIR, C.; TASDEMIR, M. A.; Influence of aggregate type on mechanical behaviour of normal – and high-strength concrete. ACI Materials Journal, Nov.-Dez., p. 528-533, 2002.

SINDUSCON. Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil. Ed. Sinduscon-SP, São Paulo, 2005.

SILVA, N.G.; CAMPITELI, V.C. Módulo de elasticidade dinâmico de argamassa de revestimento. IN: 2º ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOL

OGIA DOS CAMPOS GERAIS, 2006. Anais. Ponta Grossa, UTFPR, 2006.

SILVA, P. F. Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana. Ed. PINI, São Paulo, 1995.

SLU – Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte. Estações de Reciclagem de Entulho. Disponível em: [http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pIdPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=slu&tax=34906&lang=pt\\_BR&pg=5600&taxp=0&\\_Acessado em: 15/09/2013](http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pIdPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=slu&tax=34906&lang=pt_BR&pg=5600&taxp=0&_Acessado em: 15/09/2013).

SOUSA, José Getúlio Gomes de; LARA, Patrícia Lopes de Oliveira. Reologia e trabalhabilidade das argamassas. In: BAUER, Elton (Coord.). Revestimentos de argamassa: Características e peculiaridades. Brasília, [2007]. p. 23-29.

VEIGA, M. R. Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5, São Paulo, 2001. Anais. São Paulo, ANTAC, 2001, p.43-48.

ZORDAN, S. E. A Utilização do Entulho como Agregado, na Confecção do Concreto. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997.

## APÊNDICE - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS PORMENORIZADOS

### Tração na Flexão

TRAÇOS		<b>Traço 1 ( 1 ; 0,5 ; 9,6 ; 0 ; 2,258 )</b>						
ENSAIOS		<b>Resistência à Tração na Flexão</b>						
DATA MOLDAGEM		<b>17/10/2013</b>						
CP's	IDADE (dias)	DATA	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	ft médio (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Erro (MPa)
1	7	24/10/2013	17	0,40	0,445	0,124	27,85	0,051
2	7	24/10/2013	25	0,59				
3	7	24/10/2013	15	0,35				
4	32	18/11/2013	36	0,84	0,906	0,059	6,51	0,024
5	32	18/11/2013	41	0,96				
6	32	18/11/2013	39	0,91				
7	61	17/12/2013	46	1,08	1,109	0,0	2,44	0,011
8	61	17/12/2013	48	1,13				
9	61	17/12/2013	48	1,13				
10	110	04/02/2014	50	1,17	1,172	0,02	2,00	0,01
11	110	04/02/2014	51	1,20				
12	110	04/02/2014	49	1,15				
TRAÇOS		<b>Traço 2 ( 1 ; 0 ; 5,050 ; 5,050 ; 2,258 )</b>						
ENSAIOS		<b>Resistência à Tração na Flexão</b>						
DATA MOLDAGEM		<b>17/10/2013</b>						
CP's	IDADE (dias)	DATA	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	ft médio (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Erro (MPa)
1	7	24/10/2013	17	0,40	0,328	0,12	37,12	0,050
2	7	24/10/2013	8	0,19				
3	7	24/10/2013	17	0,40				
4	32	18/11/2013	50	1,17	1,289	0,12	9,09	0,048
5	32	18/11/2013	60	1,41				
6	32	18/11/2013	55	1,29				
7	61	17/12/2013	56	1,31	1,297	0,1	9,10	0,048
8	61	17/12/2013	50	1,17				
9	61	17/12/2013	60	1,41				
10	110	04/02/2014	48	1,13	1,094	0,2	21,57	0,1
11	110	04/02/2014	56	1,31				
12	110	04/02/2014	36	0,84				
TRAÇOS		<b>Traço 3 ( 1 ; 0,5 ; 4,8 ; 4,8 ; 2,258 )</b>						
ENSAIOS		<b>Resistência à Tração na Flexão</b>						
DATA MOLDAGEM		<b>17/10/2013</b>						
CP's	IDADE (dias)	DATA	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	ft médio (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Erro (MPa)
1	7	24/10/2013	26	0,61	0,688	0,156	22,70	0,064
2	7	24/10/2013	37	0,87				
3	7	24/10/2013	25	0,59				
4	32	18/11/2013	59	1,38	1,336	0,062	4,64	0,025
5	32	18/11/2013	54	1,27				
6	32	18/11/2013	58	1,36				
7	61	17/12/2013	73	1,71	1,703	0,0	2,10	0,015
8	61	17/12/2013	74	1,73				
9	61	17/12/2013	71	1,66				
10	110	04/02/2014	75	1,76	1,633	0,1	7,22	0,048
11	110	04/02/2014	69	1,62				
12	110	04/02/2014	65	1,52				

## Compressão

TRAÇOS		<b>Traço 1 ( 1 ; 0,5 ; 9,6 ; 0 ; 2,258 )</b>						
ENSAIOS		<b>Resistência à Compressão (cp prismático)</b>						
DATA MOLDAGEM		<b>17/10/2013</b>						
CP's	IDADE (dias)	DATA	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	fc médio (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Erro (MPa)
1	7	24/10/2013	349	2,2	1,933	0,21	10,67	0,084
1	7	24/10/2013	350	2,2				
2	7	24/10/2013	306	1,9				
2	7	24/10/2013	296	1,9				
3	7	24/10/2013	276	1,7				
3	7	24/10/2013	279	1,7	3,704	0,09	2,52	0,038
4	32	18/11/2013	579	3,6				
4	32	18/11/2013	572	3,6				
5	32	18/11/2013	604	3,8				
5	32	18/11/2013	601	3,8				
6	32	18/11/2013	610	3,8	6,404	0,3	4,61	0,120
6	32	18/11/2013	590	3,7				
7	60	16/12/2013	1035	6,5				
7	60	16/12/2013	974	6,1				
8	60	16/12/2013	998	6,2				
8	60	16/12/2013	1108	6,9	7,431	0,2	2,41	0,073
9	60	16/12/2013	998	6,2				
9	60	16/12/2013	1035	6,5				
10	110	04/02/2014	1205	7,5				
11	110	04/02/2014	1144	7,2				
12	110	04/02/2014	1230	7,7	7,050	0,4	6,19	0,178
13	110	04/02/2014	1181	7,4				
14	110	04/02/2014	1181	7,4				
15	110	04/02/2014	1193	7,5				
TRAÇOS		<b>Traço 2 ( 1 ; 0 ; 5,050 ; 5,050 ; 2,258 )</b>						
ENSAIOS		<b>Resistência à Compressão (cp prismático)</b>						
DATA MOLDAGEM		<b>17/10/2013</b>						
CP's	IDADE (dias)	DATA	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	fc médio (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Erro (MPa)
1	7	24/10/2013	296	1,9	1,957	0,1	4,58	0,037
1	7	24/10/2013	301	1,9				
2	7	24/10/2013	313	2,0				
2	7	24/10/2013	309	1,9				
3	7	24/10/2013	330	2,1				
3	7	24/10/2013	330	2,1	3,783	0,2	4,55	0,070
4	32	18/11/2013	573	3,6				
4	32	18/11/2013	596	3,7				
5	32	18/11/2013	594	3,7				
5	32	18/11/2013	627	3,9				
6	32	18/11/2013	593	3,7	6,963	0,4	5,64	0,160
6	32	18/11/2013	649	4,1				
7	60	16/12/2013	1169	7,3				
7	60	16/12/2013	1181	7,4				
8	60	16/12/2013	1023	6,4				
8	60	16/12/2013	1144	7,2	7,050	0,4	6,19	0,178
9	60	16/12/2013	1108	6,9				
9	60	16/12/2013	1059	6,6				
10	110	04/02/2014	1205	7,5				
11	110	04/02/2014	1108	6,9				
12	110	04/02/2014	1144	7,2				
13	110	04/02/2014	1205	7,5				
14	110	04/02/2014	1071	6,7				
15	110	04/02/2014	1035	6,5				

## Compressão

TRAÇOS		Traço 3 ( 1 ; 0,5 ; 4,8 ; 4,8 ; 2,258 )						
ENSAIOS		Resistência à Compressão (cp prismático)						
DATA MOLDAGEM		17/10/2013						
CP's	IDADE (dias)	DATA	Carga (kgf)	Tensão (MPa)	fc médio (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Erro (MPa)
1	7	24/10/2013	439	2,7	2,785	0,1	3,39	0,039
1	7	24/10/2013	467	2,9				
2	7	24/10/2013	424	2,7				
2	7	24/10/2013	441	2,8				
3	7	24/10/2013	445	2,8				
3	7	24/10/2013	458	2,9	5,308	0,3	4,75	0,103
4	32	18/11/2013	786	4,9				
4	32	18/11/2013	849	5,3				
5	32	18/11/2013	864	5,4				
5	32	18/11/2013	906	5,7				
6	32	18/11/2013	827	5,2	7,888	0,3	4,20	0,135
6	32	18/11/2013	864	5,4				
7	60	16/12/2013	1351	8,4				
7	60	16/12/2013	1266	7,9				
8	60	16/12/2013	1230	7,7				
8	60	16/12/2013	1205	7,5	9,170	1,0	10,98	0,411
9	60	16/12/2013	1230	7,7				
9	60	16/12/2013	1290	8,1				
10	110	04/02/2014	1461	9,1				
11	110	04/02/2014	1376	8,6				
12	110	04/02/2014	1230	7,7	1607	10,0	10,5	9,1
13	110	04/02/2014	1607	10,0				
14	110	04/02/2014	1680	10,5				
15	110	04/02/2014	1449	9,1				

## Tração por Compressão Diametral

	CP	IDADE	ALTURA (mm)	DIAMETRO (mm)	CARGA DE RUPT (kgf)	TENSÃO DE RUPTURA (Mpa)	Média TSR	erro
TRAÇÃO 1	1	7	199,95	100	1327	0,42	0,373	0,024
	2	7	199,98	100	1040	0,33		
	3	7	199,8	100	1047	0,33		
	4	7	199,95	100	1266	0,40		
	5	32	192	99,7	1990	0,66	0,645	0,022
	6	32	194	100	2070	0,68		
	7	32	197	99,7	2033	0,66		
	8	32	193	99,8	1753	0,58	0,706	0,046
	9	61	195	100	2398	0,78		
	10	61	197	100	1904	0,62		
	11	61	195	100,5	2424	0,79		
	12	61	196	100	1960	0,64	0,725	0,036
	13	110	198	100	1948	0,63		
	14	110	197	99,8	2471	0,80		
	15	110	198	100,2	2277	0,73		
	16	110	199	99,8	2313	0,74		
TRAÇÃO 2	CP	IDADE	ALTURA (mm)	DIAMETRO (mm)	CARGA DE RUPT (kgf)	TENSÃO DE RUPTURA (Mpa)	Média TSR	erro
	1	7	198,85	100	1339	0,43	0,430	0,004
	2	7	199,5	100	1327	0,42		
	3	7	199,95	100	1388	0,44		
	4	7	199,8	100	1339	0,43		
	5	32	197	99,8	2045	0,66	0,675	0,037
	6	32	200	99,9	2374	0,76		
	7	32	197	99,7	2155	0,70		
	8	32	196,5	99,8	1790	0,58	0,691	0,028
	9	61	198	99	1997	0,65		
	10	61	197	99,6	2252	0,73		
	11	61	198	100,5	1997	0,64		
	12	61	198	99,6	2313	0,75	0,711	0,030
	13	110	197	99,8	2474	0,80		
	14	110	199	100	2172	0,69		
	15	110	198	99,9	2106	0,68		
16	110	199	100,2	2099	0,67			
TRAÇÃO 3	CP	IDADE	ALTURA (mm)	DIAMETRO (mm)	CARGA DE RUPT (kgf)	TENSÃO DE RUPTURA (Mpa)	Média TSR	erro
	1	7	199,8	100	1558	0,50	0,427	0,026
	2	7	199,8	100	1254	0,40		
	3	7	199,95	100	1364	0,43		
	4	7	199,6	100	1181	0,38		
	5	32	195	99,8	2045	0,67	0,677	0,036
	6	32	199	99,9	2374	0,76		
	7	32	199	99,7	2155	0,69		
	8	32	195	99,8	1790	0,59	0,761	0,049
	9	61	200	99,9	2398	0,76		
	10	61	199,9	101	2704	0,85		
	11	61	199,9	100,2	2524	0,80		
	12	61	199,7	99,9	1960	0,63	0,750	0,037
	13	110	199,5	99,8	2532	0,81		
	14	110	198	99,6	2325	0,75		
	15	110	200	100	2496	0,79		
16	110	199,7	99,9	2021	0,64			

## Absorção por capilaridade, por imersão e Porosidade

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE														VALORES DE ABSORÇÃO													
CP	Diâmetro (cm)	Massa (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Massa 3 h (g)	Massa 6 h (g)	Massa 12 h (g)	Massa 24 h (g)	Massa 72 h (g)	Absorção To (g)	Absorção 10 min (g)	Absorção 90 min (g)	Absorção h h (g)	Absorção 3 h h (g)	Absorção 6 h h (g)	Absorção 12 h (g)	Absorção 24 h (g)	Absorção 72 h (g)	Coeficiente de Capilaridade								
																				TRAÇO 1	TRAÇO 2	TRAÇO 3					
1	10	2.649,90	2.669,4	2.695,2	2.712,3	2.724,8	2.752,8	2.772,4	2.797,5	0,00	0,248282	0,576778	0,794501	0,953656	1,310163	1,559718	1,879302	25,80									
2	10	2.675,20	2.692,4	2.716,8	2.730,6	2.740,5	2.758,2	2.774,4	2.793,2	0,00	0,244462	0,555132	0,730839	0,856890	1,082254	1,285718	1,527887	24,40									
3	9,9	2.657,70	2.675,5	2.695	2.706,2	2.714,1	2.732,7	2.744,2	2.760,4	0,00	0,231238	0,484561	0,630059	0,732688	0,974319	1,123714	1,334167	19,50									
4	9,8	2.677,80	2.697,3	2.722,5	2.738,1	2.749	2.768,8	2.788,9	2.806	0,00	0,238519	0,592605	0,799420	0,943926	1,206422	1,472896	1,699597	25,20									
5																											
MÉDIA	9,9250	2.664,6500	2.683,6500	2.707,3750	2.721,8000	2.732,1000	2.753,1250	2.769,9750	2.789,2750	0,0000	0,2456	0,5523	0,7387	0,8718	1,1433	1,3612	1,6102	23,7250									
DP	0,0957	13,0625	13,3213	14,3639	15,0193	15,6361	15,1520	18,6902	19,9712	0,0000	0,0113	0,0477	0,0789	0,1024	0,1462	0,1946	0,2334	2,8745									
CV	0,0096	0,0049	0,0050	0,0053	0,0055	0,0057	0,0055	0,0067	0,0072	#DIV/0!	0,0459	0,0863	0,1068	0,1175	0,1279	0,1429	0,1449	0,1212									
CV	0,0428	5,8417	5,9575	6,4237	6,7168	6,9927	6,7762	8,3585	8,9314	0,0000	0,0050	0,0213	0,0353	0,0458	0,0654	0,0870	0,1044	1,2855									
ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE														VALORES DE ABSORÇÃO													
CP	Diâmetro (cm)	Massa (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Massa 3 h (g)	Massa 6 h (g)	Massa 12 h (g)	Massa 24 h (g)	Massa 72 h (g)	Absorção To (g)	Absorção 10 min (g)	Absorção 90 min (g)	Absorção h h (g)	Absorção 3 h h (g)	Absorção 6 h h (g)	Absorção 12 h (g)	Absorção 24 h (g)	Absorção 72 h (g)	Coeficiente de Capilaridade								
																				TRAÇO 1	TRAÇO 2	TRAÇO 3					
1	9,8	2.409,80	2.428,8	2.446,2	2.458,6	2.466,6	2.482,5	2.501,1	2.520,4	0,00	0,251890	0,482569	0,646961	0,753020	0,963812	1,210400	1,466267	17,40									
2	9,9	2.462,90	2.480,6	2.495,2	2.505,5	2.512,5	2.520,8	2.535,4	2.546,8	0,00	0,229939	0,419607	0,553413	0,644349	0,752174	0,941841	1,089938	14,60									
3	10	2.476,30	2.496,5	2.512,9	2.523,4	2.530,1	2.541,4	2.554	2.568,5	0,00	0,257194	0,466006	0,599696	0,685003	0,828879	0,989307	1,173927	16,40									
4	9,9	2.415,40	2.437,4	2.452,9	2.464,6	2.473,1	2.489,6	2.505,6	2.520,9	0,00	0,285800	0,487159	0,639153	0,749576	0,963926	1,171781	1,370541	15,50									
5																											
MÉDIA	9,9000	2.441,1000	2.460,8250	2.476,8000	2.488,0250	2.495,5750	2.508,5750	2.524,0250	2.539,1500	0,0000	0,2562	0,4638	0,6098	0,7080	0,8772	1,0783	1,2752	15,9750									
DP	0,0816	33,4388	32,8537	32,4003	31,4713	30,6763	27,4887	25,1192	23,1270	0,0000	0,0230	0,0309	0,0429	0,0527	0,1049	0,1326	0,1734	1,2010									
CV	0,0082	0,0137	0,0134	0,0131	0,0126	0,0123	0,0110	0,0100	0,0091	#DIV/0!	0,0897	0,0665	0,0704	0,0745	0,1195	0,1229	0,1360	0,0752									
CV	0,0365	14,9543	14,6926	14,4899	14,0744	13,7189	12,2933	11,2337	10,3427	0,0000	0,0103	0,0138	0,0192	0,0236	0,0469	0,0593	0,0775	0,5371									
ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE														VALORES DE ABSORÇÃO													
CP	Diâmetro (cm)	Massa (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Massa 3 h (g)	Massa 6 h (g)	Massa 12 h (g)	Massa 24 h (g)	Massa 72 h (g)	Absorção To (g)	Absorção 10 min (g)	Absorção 90 min (g)	Absorção h h (g)	Absorção 3 h h (g)	Absorção 6 h h (g)	Absorção 12 h (g)	Absorção 24 h (g)	Absorção 72 h (g)	Coeficiente de Capilaridade								
																				TRAÇO 1	TRAÇO 2	TRAÇO 3					
1	9,9	2.606,40	2.616,7	2.631,5	2.642	2.648,2	2.656,7	2.669,1	2.677,7	0,00	0,133806	0,326072	0,462477	0,543020	0,653443	0,814530	0,926252	14,80									
2	10	2.575,90	2.597,5	2.622,5	2.638,7	2.649,1	2.670,2	2.687,4	2.700,8	0,00	0,175020	0,593330	0,799594	0,932011	1,200665	1,419662	1,590276	25,00									
3	10,1	2.585,00	2.600,7	2.618,7	2.634,4	2.644,6	2.661,9	2.676	2.686,1	0,00	0,195960	0,420627	0,616587	0,743898	0,959829	1,135818	1,261881	18,00									
4	10	2.597,90	2.615,9	2.634,4	2.645,5	2.653,8	2.662,3	2.678,6	2.688,6	0,00	0,229183	0,464732	0,606062	0,711741	0,819966	1,027504	1,154828	18,50									
5																											
MÉDIA	10,0000	2.591,3000	2.607,7000	2.626,7750	2.640,1500	2.648,9250	2.662,7750	2.677,7750	2.688,3000	0,0000	0,2085	0,4512	0,6212	0,7327	0,9085	1,0994	1,2333	19,0750									
DP	0,0816	13,5206	10,0213	7,3925	4,7332	3,7871	5,5686	7,5659	9,5488	0,0000	0,0594	0,1110	0,1382	0,1594	0,2316	0,2518	0,2761	4,2766									
CV	0,0082	0,0052	0,0038	0,0028	0,0018	0,0014	0,0021	0,0028	0,0036	#DIV/0!	0,2850	0,2461	0,2224	0,2176	0,2549	0,2290	0,2239	0,2242									
CV	0,0365	6,0466	4,4817	3,3060	2,1168	1,6937	2,4903	3,3836	4,2704	0,0000	0,0266	0,0496	0,0618	0,0713	0,1036	0,1126	0,1235	1,9125									

## Massa Específica

TRAÇOS		<b>1</b>									
ENSAIOS		<b>Massa Específica no Estado Endurecido (CILÍNDRICO)</b>									
DATA MOLDAGEM		17/10/2013									
CP's	IDADE (dias)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	$\gamma_{seca}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{seca}$ (g/cm <sup>3</sup> )	DP (g/cm <sup>3</sup> )	CV (%)	Erro (g/cm <sup>3</sup> )	
1	7	10	19,8	1555,09	2919,6	1,88	2,032	0,325	15,985	0,133	
2	7	10	19,9	1562,94	3934,6	2,52					
3	7	10	19,5	1531,53	2904,8	1,90					
4	7	10	19,9	1562,94	2868,8	1,84					
5	32	9,97	19,9	1553,58	2799	1,80	1,804	0,015	0,816	0,006	
6	32	10	19,8	1555,09	2777,3	1,79					
7	32	9,97	19,8	1545,77	2815,7	1,82					
8	32	9,98	19,6	1533,23	2771,1	1,81					
9	61	10	19,5	1531,53	2892,1	1,89	1,828	0,043	2,377	0,018	
10	61	10	19,7	1547,23	2809,3	1,82					
11	61	10,05	19,5	1546,88	2822,2	1,82					
12	61	10,11	19,6	1573,43	2808,4	1,78					
13	110	9,98	19,8	1548,87	2757	1,78	1,778	0,006	0,364	0,003	
14	110	9,98	19,6	1533,23	2712,5	1,77					
15	110	10,02	19,5	1537,66	2744	1,78					
16	110	10	19,8	1555,09	2765,8	1,78					
TRAÇOS		<b>2</b>									
ENSAIOS		<b>Massa Específica no Estado Endurecido (CILÍNDRICO)</b>									
DATA MOLDAGEM		17/10/2013									
CP's	IDADE (dias)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	$\gamma_{seca}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{seca}$ (g/cm <sup>3</sup> )	DP (g/cm <sup>3</sup> )	CV (%)	Erro (g/cm <sup>3</sup> )	
1	7	10	19,8	1555,09	2660,5	1,71	1,882	0,317	16,815	0,129	
2	7	10	19,9	1562,94	2706,4	1,73					
3	7	10	20,0	1570,80	3702	2,36					
4	7	10	19,9	1562,94	2703,4	1,73					
5	32	9,92	19,8	1530,31	2635,3	1,72	1,709	0,052	3,033	0,021	
6	32	9,91	19,7	1519,51	2698,6	1,78					
7	32	9,96	19,9	1550,46	2597	1,67					
8	32	9,95	20,0	1555,13	2584	1,66					
9	61	9,9	19,8	1524,14	2627,4	1,72	1,713	0,026	1,547	0,011	
10	61	9,96	19,7	1534,88	2656,5	1,73					
11	61	10,05	19,8	1570,68	2628,5	1,67					
12	61	9,96	19,8	1542,67	2658,9	1,72					
13	110	10	19,8	1555,09	2478	1,59	1,599	0,019	1,205	0,008	
14	110	9,98	19,8	1548,87	2442,8	1,58					
15	110	9,96	20,0	1558,26	2499,1	1,60					
16	110	10	19,9	1562,94	2536,9	1,62					
TRAÇOS		<b>3</b>									
ENSAIOS		<b>Massa Específica no Estado Endurecido (CILÍNDRICO)</b>									
DATA MOLDAGEM		17/10/2013									
CP's	IDADE (dias)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	$\gamma_{seca}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{seca}$ (g/cm <sup>3</sup> )	DP (g/cm <sup>3</sup> )	CV (%)	Erro (g/cm <sup>3</sup> )	
1	7	10	19,9	1562,94	2820,8	1,80	1,952	0,317	16,216	0,129	
2	7	10	20	1570,80	2798	1,78					
3	7	10	19,8	1555,09	3773,2	2,43					
4	7	10	19,9	1562,94	2805,3	1,79					
5	32	9,98	19,9	1556,70	2699,9	1,73	1,745	0,012	0,669	0,005	
6	32	9,99	20	1567,66	2727,1	1,74					
7	32	9,97	19,8	1545,77	2722,6	1,76					
8	32	9,98	19,8	1548,87	2702,3	1,74					
9	61	9,99	20	1567,66	2745	1,75	1,747	0,041	2,375	0,017	
10	61	10,1	19,9	1594,36	2696,9	1,69					
11	61	10,02	19,9	1569,20	2749,5	1,75					
12	61	9,99	19,7	1544,14	2767,4	1,79					
13	110	9,97	19,8	1545,77	2660	1,72	1,713	0,022	1,293	0,009	
14	110	10	19,7	1547,23	2659,3	1,72					
15	110	9,98	19,7	1541,05	2668,2	1,73					
16	110	9,99	20	1567,66	2634,9	1,68					

## Ultrassom e Módulo de Elasticidade

TRAÇOS		1												
ENSAIOS		Ultrassom - Velocidade - Módulo de Elasticidade Dinâmico - CP Cilíndrico												
DATA MOLDAGEM		17/10/2013												
CP's	IDADE (dias)	Comprimento (cm)	Tempo (µs)	V (m/s)	V (m/s)	DP (m/s)	CV (%)	Erro (m/s)	M.E.D. (GPa)	M.E.D. (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	Erro (GPa)	
1	7	19,8	110,6	1.790	1772,8	12,7	0,72	5,2	5,14	5,0	0,1	1,44	0,03	
2	7	19,9	113	1.761										
3	7	19,5	110,4	1.766										
4	7	19,9	112,2	1.774										
5	32	19,90	82,2	2.421	2379,0	47,9	2,01	19,6	9,40	9,1	0,4	4,01	0,15	
6	32	19,80	83,8	2.363										
7	32	19,80	85,4	2.319										
8	32	19,60	81,2	2.414										
9	61	19,50	73,4	2.657	2508,0	103,5	4,13	42,3	11,32	10,1	0,8	8,38	0,35	
10	61	19,70	78,8	2.500										
11	61	19,50	80,2	2.431										
12	61	19,60	80,2	2.444										
13	110	19,80	70,7	2.801	2818,3	39,7	1,41	16,2	12,58	12,7	0,4	2,82	0,15	
14	110	19,60	68,3	2.870										
15	110	19,50	69	2.826										
16	110	19,80	71,3	2.777										
TRAÇOS		2												
ENSAIOS		Ultrassom - Velocidade - Módulo de Elasticidade Dinâmico												
DATA MOLDAGEM		14/11/2013												
CP's	IDADE (dias)	Comprimento (cm)	Tempo (µs)	V (m/s)	V (m/s)	DP (m/s)	CV (%)	Erro (m/s)	M.E.D. (GPa)	M.E.D. (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	Erro (GPa)	
1	7	19,8	111,2	1.781	1812,1	34,8	1,92	14,2	4,91	5,1	0,2	3,85	0,08	
2	7	19,9	107,4	1.853										
3	7	20	112	1.786										
4	7	19,9	108,8	1.829										
5	32	19,80	82,2	2.409	2419,5	25,8	1,07	10,5	5,18	9,1	0,2	2,14	0,08	
6	32	19,70	81,6	2.414										
7	32	19,90	81	2.457										
8	32	20,00	83,4	2.398										
9	61	19,80	74	2.676	2570,1	81,2	3,16	33,1	11,08	10,2	0,6	6,35	0,27	
10	61	19,70	76	2.592										
11	61	19,80	79	2.506										
12	61	19,80	79	2.506										
13	110	19,80	74,9	2.644	2624,9	57,3	2,18	23,4	10,81	10,7	0,5	4,38	0,19	
14	110	19,80	73,4	2.698										
15	110	20,00	77,4	2.584										
16	110	19,90	77,3	2.574										
TRAÇOS		3												
ENSAIOS		Ultrassom - Velocidade - Módulo de Elasticidade Dinâmico												
DATA MOLDAGEM		14/11/2013												
CP's	IDADE (dias)	Comprimento (cm)	Tempo (µs)	V (m/s)	V (m/s)	DP (m/s)	CV (%)	Erro (m/s)	M.E.D. (GPa)	M.E.D. (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	Erro (GPa)	
1	7	19,9	99,2	2.006	1986,3	28,4	1,43	11,6	6,62	6,5	0,2	2,84	0,08	
2	7	20	99,8	2.004										
3	7	19,8	101,8	1.945										
4	7	19,9	100	1.990										
5	32	19,90	78,4	2.538	2412,6	213,8	8,86	87,3	10,59	9,6	1,6	16,86	0,66	
6	32	20,00	79,2	2.525										
7	32	19,80	94,6	2.093										
8	32	19,80	79,4	2.494										
9	61	20,00	82,4	2.427	2427,1	39,1	1,61	15,9	9,69	9,7	0,3	3,23	0,13	
10	61	19,90	80,2	2.481										
11	61	19,90	82,6	2.409										
12	61	19,70	82,4	2.391										
13	110	19,80	73,1	2.709	2693,2	33,2	1,23	13,5	12,06	11,9	0,3	2,45	0,12	
14	110	19,70	74,5	2.644										
15	110	19,70	72,9	2.702										
16	110	20,00	73,6	2.717										

### Módulo de elasticidade por Ressonância Forçada

	cps	idade	frequencia (Hz)	l (mm)	densidade (kg/m³)	Ed (Mpa)	Peso (g)	diametro (mm)	média densidade	DP densidade	média Ed	DP Ed	Erro Ed
traco 1	1	7	4260	198	1878,402	5345,620	2919,6	100	2032,796	324,9471275	5934	1104,03	637
	2	7	4360	199	2518,708	7584,326	3934,6	100					
	3	7	4285	195	1897,632	5299,597	2904,8	100					
	4	7	4350	199	1836,443	5504,555	2868,8	100					
	5	32	6230	199	1802,560	11082,356	2799	99,7	1805,041	14,73614998	10339	521,21	301
	6	32	5990	198	1786,849	10053,840	2777,3	100					
	7	32	5890	198	1822,473	9914,759	2815,7	99,7					
	8	32	6090	196	1808,279	10305,572	2771,1	99,8					
	9	61	6400	195	1889,335	11770,589	2892,1	100	1829,278	43,48781428	10970	713,89	412
	10	61	6070	197	1816,612	10390,395	2809,3	100					
	11	61	6400	195	1825,372	11372,097	2822,2	100,5					
	12	61	6140	196	1785,792	10345,222	2808,4	101,1					
	13	110	6360	198	1780,905	11296,540	2757	99,8	1778,958	6,469061191	11389	210,53	122
	14	110	6400	196	1770,039	11140,765	2712,5	99,8					
	15	110	6510	195	1785,436	11508,947	2744	100,2					
	16	110	6450	198	1779,451	11609,024	2765,8	100					
traco 2	1	7	3990	198	1711,703	4273,312	2660,5	100	1883,178	316,661286	4753	759	438
	2	7	4020	199	1732,484	4434,937	2706,4	100					
	3	7	3950	200	2357,962	5886,416	3702	100					
	4	7	4015	199	1730,564	4419,008	2703,4	100					
	5	32	5670	198	1689,407	8517,082	2635,3	99,2	1709,199	34,53375471	8667	200	116
	6	32	5650	197	1735,189	8598,768	2698,6	99,1					
	7	32	5580	199	1741,394	8588,783	2597	99,6					
	8	32	5790	200	1670,806	8961,965	2584	99,5					
	9	61	6020	198	1724,729	9801,766	2627,4	99	1713,783	26,51112826	9453	325	187
	10	61	5990	197	1731,631	9644,980	2656,5	99,6					
	11	61	5890	198	1674,330	9108,817	2628,5	100,5					
	12	61	5850	198	1724,442	9254,449	2658,9	99,6					
	13	110	5630	198	1594,287	7924,532	2478	100	1600,202	19,27883703	8144	507	293
	14	110	5520	198	1577,945	7539,812	2442,8	99,8					
	15	110	5740	200	1604,595	8458,806	2499,1	99,6					
	16	110	5800	199	1623,980	8653,718	2536,9	100					
traco 3	1	7	2410	199	1805,716	1661,307	2820,8	100	1952,816	316,6618007	1324	487	281
	2	7	1600	200	1782,166	729,975	2798	100					
	3	7	1720	198	2427,588	1126,217	3773,2	100					
	4	7	2500	199	1795,794	1777,881	2805,3	100					
	5	32	5910	199,00	1735,257	9600,746	2699,9	99,8	1745,882	11,67392212	9652	227	131
	6	32	5890	200,00	1740,486	9660,976	2727,1	99,9					
	7	32	6000	198,00	1762,214	9948,361	2722,6	99,7					
	8	32	5860	198,00	1745,571	9399,900	2702,3	99,8					
	9	61	6290	200,00	1751,910	11090,037	2745	99,9	1747,613	41,50263194	10513	656	379
	10	61	6000	199,00	1692,386	9650,904	2696,9	101					
	11	61	6280	199,00	1753,055	10951,686	2749,5	100,2					
	12	61	6100	197,00	1793,102	10357,554	2767,4	99,9					
	13	110	6100	198,00	1721,696	10046,309	2660	99,7	1713,812	22,15338722	10131	144	83
	14	110	6210	197,00	1719,616	10294,544	2659,3	100					
	15	110	6160	197,00	1732,293	10204,114	2668,2	99,8					
	16	110	6090	200,00	1681,642	9979,024	2634,9	99,9					