

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APLICAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE BATIDA COMO SUBSTITUTA DO
AGREGADO EM ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO E DE CONTRAPISO
AUTONIVELANTE

Rafaela Lima dos Santos

São Cristóvão - SE

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

APLICAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE BATIDA COMO SUBSTITUTA DO
AGREGADO EM ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO E DE CONTRAPISO
AUTONIVELANTE

Rafaela Lima dos Santos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil como requisito à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Linha de concentração: Tecnologia dos materiais

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Angela Teresa Costa Sales

Agência financiadora: FAPITEC/SE

São Cristóvão - SE

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RAFAELA LIMA DOS SANTOS

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 25 DE JANEIRO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Angela Teresa Costa Sales

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Débora de Gois Santos

1º Examinador

Prof.^a Dr.^a Gisela Azevedo Menezes Brasileiro

2º Examinador

Prof.^a Dr.^a Nilma Fontes de Araujo Andrade

3º Examinador

AGRADECIMENTOS

De início, obrigada ao senhor Deus, que pela tua imensa misericórdia concedeu-me saúde e disposição para cumprir essa difícil jornada.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Roberto e Rosa Mary, pelo amor, dedicação, carinho e educação que me foram dados. Às minhas irmãs queridas, Rose e Beta, que me apoiaram e vibraram comigo a cada conquista.

Divido o mérito dessa conquista com Fernando, meu amigo, meu par, meu amor. Sem o seu apoio e incentivo, eu não teria nem começado.

Aos amigos que o mestrado me proporcionou, Luciano e Herbert, pelos momentos de descontração em meio às disciplinas e pela companhia nos momentos decisivos dessa caminhada.

Sou grata às pessoas que, junto comigo, trabalharam para dar forma a esta pesquisa. Em especial à minha orientadora, professora Angela, cuja atenção e carinho estão comigo desde o início da minha vida acadêmica. Aos professores do PROEC, através dos quais tive a honra de adquirir valiosos conhecimentos que levarei para a vida.

Agradeço à FAPITEC/SE pela bolsa de estudos.

Meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram na elaboração deste trabalho.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se
arrepende”

Leonardo da Vinci

RESUMO

A preservação ambiental é tema cada vez mais discutido pela sociedade devido à grande dependência dos recursos naturais para sobrevivência no planeta. A utilização racional das matérias-primas e sua destinação adequada estão na pauta das grandes preocupações dos setores produtivos. O presente trabalho busca avaliar a viabilidade da aplicação do resíduo da produção do cobre, chamado de escória de cobre, após ter sido utilizada como material abrasivo em serviços de jateamento, passando a denominar-se de granalha batida. Buscou-se substituir o agregado miúdo de argamassas de assentamento de alvenaria pela granalha batida, em duas frações, a fina e a grossa. Estudou-se também a aplicação da granalha como adição fina em argamassas para contrapiso autonivelante. Foram produzidas quatro misturas de argamassa de assentamento, para cada tipo de granalha, “fina” e “grossa”, com teores de 25%, 50%, 75% e 100% de substituição, além da argamassa de referência. Para argamassa autonivelante, utilizou-se 30% da adição substituindo o agregado miúdo. No estado fresco, para a medida da consistência pelo ensaio de espalhamento, foi estabelecido o valor de 270 ± 20 mm. No estado endurecido, ensaios de medida de porosidade das argamassas mostraram que as absorções de água se mantiveram próximas às da mistura de referência. A absorção por capilaridade foi mais intensa para as misturas que tinham maiores teores de granalha batida, notadamente para as misturas com granalha batida do tipo “fina”. Sob ensaios mecânicos de compressão axial, as argamassas com substituição do agregado convencional por granalha batida fina tiveram reduções de desempenho significativamente maiores, tanto em relação à argamassa de referência, como em relação às argamassas com mesmos teores de granalha batida grossa. Os ensaios de módulo de elasticidade indicaram que, para as substituições do agregado convencional pela granalha grossa em até 75%, as variações foram pouco expressivas. Para as misturas com granalha fina, os valores de módulo de elasticidade diminuíram, alcançando uma redução de rigidez de 75% em relação à referência. Sob tração por compressão diametral, não houve variação significativa dessa propriedade na série com granalha do tipo grossa. Argamassas com granalha fina tiveram reduções significativas dessa resistência, chegando-se à cerca de 90% da argamassa de referência. A argamassa para contrapiso autonivelante com adição inerte de granalha batida de cobre apresentou espalhamento de 24 cm e tempo de fluxo de oito segundos, satisfazendo aos parâmetros requeridos. Resultados dos ensaios de resistência à flexão mostraram que houve redução de 57% da resistência da argamassa autonivelante, comparada com a referência. Pode-se concluir que, para pequenas substituições do agregado convencional por granalha batida grossa, há viabilidade de aplicação das argamassas em assentamento de alvenarias, considerando que, para este serviço, não são exigidos altos índices de resistência e rigidez. Quanto à argamassa para contrapiso autonivelante com adição inerte de granalha batida, sua aplicação também se mostrou viável, visto que, para esse tipo de serviço, não é exigido um índice de resistência elevado.

Palavras-chave: Argamassa, escória de cobre, granalha de cobre batida.

ABSTRACT

Environmental preservation is a widely discussed topic throughout society, due to heavy reliance on natural resources for survival on the planet. Rational use of raw materials and their proper disposal are on the agenda of the productive sectors' major concerns. The present paper aims to evaluate the feasibility of application of copper production waste, called copper slag, after being used as abrasive material in blasting services, now called blasted copper slag. It was intended to replace conventional aggregate in laying block mortars for blasted slag, into two fractions, fine and thick. It was also studied the application of blasted copper slag as thin addition in mortars for self-leveling floor. Four laying block mortar mixtures were produced, for each type of blasted slag, "fine" and "thick", with levels of 25%, 50%, 75% and 100% of replacement, in addition to the reference mortar. For self-leveling mortar, 30% of the fine aggregate was replaced by the addition. The consistency of unhardened mortars was measured by flow table procedure and the range fixed in 270 ± 20 mm. Porosity tests in hardened mortars showed that water absorption remained close to the reference mixtures. The wicking tests indicated that this phenomenon was more intense for mixtures with higher levels of blasted copper slag, even more intense for mortars with "fine" blasted copper slag. Under mechanical tests by compression strength, the mortars with fine slag replacing the conventional aggregate, had significantly performance reductions both in relation to the reference mortar, as compared to the same mortar levels substitutions with thick blasted slag. Elastic modulus tests indicated that for mortars with thick blasted slag replacing conventional aggregate up to 75%, the variations were not so expressive. In fine blasted copper slag mortars, the modulus values decreased intensively, reaching a 75% reduction in stiffness compared to the reference. Under indirect tensile tension, there was not significant variation of this property in series with thick blasted slag. For mixtures with fine blasted copper slag, such strength reductions were significant, reaching about 90% of the value obtained by the reference mortar. The self-leveling underlayment mortar with inert addition of blasted copper slag showed a 24 cm spreading and a flow time of eight seconds, satisfying the required parameters. Results of the flexural strength tests showed that there was a reduction of 57% of resistance for the self-leveling mortar, compared to the reference. It can be concluded that, for small levels of replacement of conventional aggregate by thick blasted slag, there is feasibility of applying the mortar in laying masonry, whereas that, for this service, there are not required high levels of strength and stiffness. As for self-leveling underlayment mortar with inert addition of blasted copper slag, its application has also proved feasible, since a high resistance index is not required for this type of service.

Keywords: Mortar, copper slag, blasted copper slag.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exigências químicas para cada tipo de cal virgem.....	22
Tabela 2 - Exigências físicas para cada tipo de cal virgem	23
Tabela 3 - Exigências químicas para cada tipo de cal hidratada	23
Tabela 4 - Exigências físicas para cada tipo de cal hidratada	23
Tabela 5 - Recomendação da dimensão máxima característica do agregado de acordo com a camada que compõe o revestimento	24
Tabela 6 - Dureza e massa específica da areia e da escória de cobre.....	54
Tabela 7 - Composição química da gralha de cobre batida utilizadas em dois estudos	58
Tabela 8 - Composição das gralhas em termos de óxidos	74
Tabela 9 - Nomenclatura e composição das argamassas	77
Tabela 10 - Plano de amostragem das argamassas de assentamento produzidas	79
Tabela 12 - Medidas de espalhamento e relação água/aglomerantes das misturas	87
Tabela 13 - Índices físicos relacionados à porosidade	90
Tabela 14 - Evolução da absorção de água por capilaridade.....	92
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial	96
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade	99
Tabela 17 - Resultados dos ensaios de resistência à tração indireta.....	101
Tabela 18 - Resultados dos ensaios de aderência	103
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Iteração entre argamassa de assentamento e os blocos em uma alvenaria	32
Figura 2 - Diferentes alternativas de revestimento de parede	33
Figura 3 - Exemplo genérico de um sistema de pisos e seus elementos	35
Figura 4 - Projetor por <i>spray</i> com recipiente acoplado	38
Figura 5 - Esquema de bomba de projeção do tipo helicoidal.....	38
Figura 6 - Demarcação das juntas de dilatação	42
Figura 7 - Colocação da fita de poliestireno expandido	43
Figura 8 - Evolução do ensaio <i>Slump flow test</i>	43
Figura 9 - Esquema de aplicação da argamassa autonivelante no ambiente	44
Figura 10 - Utilização de sapatilha de pregos na aplicação da argamassa autonivelante.....	44
Figura 11 - Acabamento do contrapiso autonivelante	45
Figura 12 - Fluxograma da produção do cobre	51
Figura 13 - Distribuição mundial da produção de cobre refinado em 2013.....	52
Figura 14 - Esquema básico do processo de jateamento abrasivo.....	56
Figura 15 - Resultados da resistência à compressão das argamassas	59
Figura 16 - Resultados da resistência à compressão dos concretos.....	60
Figura 17 - Tempos de pega das argamassas com granalha de cobre batida.....	62
Figura 18 - Resistência à compressão das argamassas em função dos teores de substituição .	63
Figura 19 - Parâmetros de porosidade dos concretos	66
Figura 20 - Resistência à compressão por compressão axial dos concretos em função do teor de granalha batida.....	66
Figura 21 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos em função do teor de granalha batida.....	67
Figura 22 - Tanque em manutenção	70
Figura 23 - Aspecto da escória original e dos dois tipos de granalha batida.....	71
Figura 24 - Determinação das massas específicas reais dos dois tipos de granalha batida.....	72
Figura 25 - Curvas granulométricas dos agregados convencionais e da granalha batida grossa e fina.....	73
Figura 26 - Determinação da massa específica real da adição inerte	76
Figura 27 - Aspecto das argamassas de referência e da série com granalha batida grossa	77
Figura 28 - Aspecto das argamassas de referência e da série com granalha batida fina	78
Figura 29 - Ensaio de fervura dos corpos de prova	80

Figura 30 - Corpos de prova parcialmente imersos em água no ensaio de absorção por capilaridade.....	82
Figura 31 - Ensaio mecânicos	83
Figura 32 - Realização do ensaio de resistência à tração indireta	83
Figura 33 - Realização do ensaio de resistência potencial de aderência	84
Figura 34 - Ensaio no estado fresco	85
Figura 35 - Realização do ensaio de resistência à tração na flexão.....	86
Figura 36 - Espalhamentos obtidos pelas argamassas com 0% e 100% de substituição do agregado miúdo por granalha grossa e fina	88
Figura 37 - Espalhamento da argamassa autonivelante no ensaio do Mini Slump-test	89
Figura 38 - Realização do ensaio do Mini Funil-V	89
Figura 39 - Absorção e índice de vazios das argamassas de referência e com granalha grossa	91
Figura 40 - Absorção e índice de vazios das argamassas de referência e com granalha fina...91	91
Figura 41 - Evolução da capilaridade na argamassa de referência e com granalha grossa	93
Figura 42 - Evolução da capilaridade na argamassa de referência e com granalha fina	94
Figura 43 - Aspecto da argamassa de referência após ensaio de capilaridade	94
Figura 44 - Aspecto das argamassas com granalha grossa após ensaio de capilaridade	95
Figura 45 - Aspecto das argamassas com granalha fina após ensaio de capilaridade	95
Figura 46 - Valores médios da resistência à compressão para as amostras com granalha batida grossa.....	97
Figura 47 - Valores médios da resistência à compressão para as amostras com granalha batida fina.....	97
Figura 48 - Valores médios de módulo de elasticidade para as amostras com granalha batida grossa.....	99
Figura 49 - Valores médios de módulo de elasticidade para as amostras com granalha batida fina.....	100
Figura 50 - Valores médios de resistência à tração indireta para as amostras com granalha batida grossa.....	102
Figura 51 - Valores médios de resistência à tração indireta para as amostras com granalha batida fina.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais constituintes do cimento Portland	19
Quadro 2 - Classificação das argamassas	28
Quadro 3 - Classificação das argamassas de acordo com a função na construção.....	30
Quadro 4 - Usos e funções das argamassas de assentamento.....	31
Quadro 5 - Usos e funções das camadas de revestimento	33
Quadro 6 - Comparação entre as argamassas autonivelantes industrializada, dosada em central e argamassa comum dosada em obra.....	41
Quadro 7 - Conceitos relacionados à trabalhabilidade das argamassas	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo geral	16
1.2 Objetivos específicos.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Argamassas	17
2.1.1 Histórico das argamassas.....	17
2.1.2 Componentes	18
2.1.2.1 Aglomerantes.....	18
2.1.2.2 Agregados.....	24
2.1.2.3 Aditivos	27
2.1.3 Classificação e tipos	27
2.1.3.1 Classificação quanto à natureza do aglomerante.....	28
2.1.3.2 Classificação quanto ao tipo de aglomerante	29
2.1.3.3 Classificação quanto à utilização	30
2.1.3.4 Classificação quanto ao volume de pasta	36
2.1.3.5 Classificação quanto à forma de produção ou fornecimento	36
2.1.3.6 Argamassa projetada	37
2.1.3.7 Argamassa autonivelante.....	40
2.1.4 Propriedades	45
2.1.4.1 No estado fresco	46
2.1.4.2 No estado endurecido	47
2.2 Granalha de cobre batida	50
2.2.1 A produção do cobre e a geração da escória	50
2.2.2 Granalha como material abrasivo.....	52
2.2.3 Resíduo do processo abrasivo – granalha batida.....	57
2.3 Aplicação da granalha de cobre batida em misturas cimentícias	58
3 METODOLOGIA.....	68
3.1 Descrição e caracterização dos materiais utilizados.....	68
3.1.1 Cimento Portland.....	68
3.1.2 Cal hidratada.....	68
3.1.3 Agregados convencionais.....	68

3.1.3.1	Areia para argamassa de assentamento	68
3.1.3.2	Areia para contrapiso autonivelante	69
3.1.4	Granalha de cobre batida	69
3.1.5	Aditivo plastificante	75
3.1.6	Granalha de cobre batida como adição inerte	75
3.2	Produção das argamassas de assentamento	76
3.3	Ensaaios com argamassas de assentamento	79
3.3.1	Ensaaios físicos relacionados à porosidade.....	79
3.3.2	Ensaaios de absorção de água por capilaridade	80
3.3.3	Ensaaios mecânicos.....	82
3.4	Produção da argamassa para contrapiso autonivelante	84
3.5	Ensaaios com argamassa para contrapiso autonivelante.....	85
3.5.1	Ensaaios no estado fresco.....	85
3.5.2	Ensaaios no estado endurecido.....	86
3.6	Tratamento estatístico dos dados	86
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.1	Ensaaios no estado fresco.....	87
4.1.1	Trabalhabilidade das argamassas de assentamento	87
4.1.2	Consistência e tempo de fluxo das argamassas para contrapiso autonivelante	88
4.2	Ensaaios com argamassas endurecidas	90
4.2.1	Ensaaios físicos das argamassas de assentamento	90
4.2.2	Ensaaios mecânicos.....	96
4.2.2.1	Resistência à compressão axial das argamassas de assentamento	96
4.2.2.2	Módulo de elasticidade das argamassas de assentamento.....	98
4.2.2.3	Ensaaios de tração por compressão diametral das argamassas de assentamento.....	101
4.2.2.4	Ensaaios de aderência das argamassas de assentamento.....	103
4.2.2.5	Ensaio de flexão da argamassa para contrapiso autonivelante.....	104
5	CONCLUSÕES.....	105
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A – Gráficos força versus tempo obtidos a partir dos ensaios de compressão axial realizados em laboratório na máquina universal de ensaios.....	114
	APÊNDICE B – Gráficos tensão versus deformação específica obtidos a partir dos ensaios de compressão axial utilizados para obtenção dos módulos de elasticidade.....	116

APÊNDICE C – Gráficos força <i>versus</i> tempo obtidos a partir dos ensaios de tração por compressão diametral	118
APÊNDICE D – Gráficos força <i>versus</i> deformação obtidos a partir dos ensaios de flexão em três pontos	120

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável são temas amplamente discutidos em toda sociedade devido à grande dependência dos recursos naturais para sobrevivência. O melhor aproveitamento das matérias-primas, o reaproveitamento de resíduos e a disposição adequada dos resíduos impróprios para o uso tornaram-se alternativas aceitáveis dentro do conceito de sustentabilidade.

A indústria da Construção Civil é considerada grande causadora de impactos ambientais, tanto pelo seu elevado consumo de recursos naturais e energia, quanto pelo volume de resíduos gerados. Apesar da redução de emissão de resíduos ser almejada pelas indústrias de forma geral, em vários processos produtivos há impossibilidade de eliminá-los completamente. Dessa forma, torna-se uma prática desejável e sustentável a reciclagem desses rejeitos dentro do setor da Construção Civil, que possui um excelente potencial para incorporá-los.

A escória de cobre é o resíduo gerado durante a atividade de produção do cobre, no processo de transformação das matérias-primas em produtos acabados. Para cada tonelada de cobre produzido, são geradas cerca de 2,2 toneladas de escórias, e por ano, a produção mundial deste metal gera 24,6 milhões de toneladas de resíduo (GORAI et al., 2003).

Dada a sua forma granular e elevada dureza, o resíduo da indústria do cobre tem grande potencial para ser utilizado como abrasivo para jateamento na preparação de superfícies de aço para pintura. Após o jateamento, suas propriedades de abrasão são diminuídas, tornando-se novamente um resíduo, denominado gralha de cobre batida. Este material tem um aspecto físico semelhante ao da areia natural, porém com dureza e massa específica superiores, podendo ser aplicadas na indústria da construção como substituta da areia natural (RESENDE, 2009).

Tanto a extração de agregados como a deposição inadequada de resíduos industriais causam prejuízos ambientais. Ao reutilizar um resíduo de indústria metalúrgica, por exemplo, fazendo uma substituição do agregado, reduz-se a quantidade de matéria-prima que seria extraída e ainda proporciona uma alternativa de destinação.

A presente proposta de pesquisa está estruturada em cinco capítulos. No segundo capítulo, encontra-se parte da fundamentação teórica que embasa esse estudo; o terceiro capítulo traz a descrição dos materiais e métodos usados; o quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e o quinto capítulo contém as conclusões alcançadas.

1.1 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da substituição, total ou parcial, do agregado miúdo por granalha de cobre batida, resíduo de jateamento abrasivo, no desempenho físico e mecânico de argamassas para assentamento de alvenaria e contrapiso autonivelante.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os materiais constituintes das argamassas e fixar suas dosagens;
- Produzir, em laboratório, argamassas com diferentes teores de substituição do agregado miúdo pela granalha de cobre batida;
- Conhecer o comportamento físico e mecânico das argamassas produzidas;
- Avaliar a influência da granalha de cobre batida em diferentes teores de substituição de agregado natural em argamassas de assentamento, determinando teores ótimos para as misturas;
- Avaliar a influência da aplicação da granalha de cobre batida como adição fina na argamassa para contrapiso autonivelante.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Argamassas

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005b) define argamassa como 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 dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

A argamassa é um material que tem uma extensa aplicabilidade como material de construção, sendo os seus principais usos no assentamento de alvenarias e nas etapas de revestimento, como emboço, reboco ou camada única de paredes e tetos. Ainda pode ser empregada em contrapisos e no assentamento e rejuntamento de revestimentos de cerâmica e pedra.

2.1.1 Histórico das argamassas

Registros históricos apontam que o mais antigo emprego de argamassas pela humanidade data de mais de 10.000 anos, no sul da Galileia, próximo a Yiftah'el. Um piso de cimento polido, com 180 m², encontrado em escavações no local, foi feito com pedras e argamassa de cal e areia (CARASEK, 2010).

Entre 8.000 e 7.000 a.C., cal e gesso fizeram-se presentes em cabeças de estátuas e reboco de paredes, em Jericó e na Turquia. A maioria dos povos da antiguidade, como chineses, egípcios, fenícios, gregos, romanos, produziam cal gorda com o intuito de consolidar as alvenarias ou para rebocos pintados (ALVAREZ et al., 2005).

Posteriormente, devido à sua boa impermeabilidade, o betume passou a ser bastante utilizado na produção das argamassas para solidificar os componentes de alvenaria em construções na cidade da Babilônia, em 2.000 a.C. Durante o Império Romano, houve um aprimoramento das argamassas, misturando-se cal com pozolanas de cinzas vulcânicas encontradas no solo para originar o material denominado “concretum” (MARTINELLI; HELENE, 1991).

A alvenaria de pedra é uma técnica construtiva que faz parte da história da arquitetura brasileira do período colonial, sendo a argamassa de barro utilizada com a função de assentar as pedras (FEIBER, 2011). Nessa mesma época, segundo Santiago (2007), o óleo de baleia,

além de utilizado em iluminação pública, pode ter sido empregado na produção de argamassas, misturando-o com cal viva.

As argamassas industrializadas, misturas prontas, dosadas em indústrias, surgiram com o objetivo de racionalizar e melhorar a qualidade dos serviços a um menor custo. Na Europa Central e nos Estados Unidos, em meados do século XX, essa nova indústria da construção levou à substituição das argamassas produzidas no canteiro de obras pelas secas, prontas para aplicação (ALVAREZ et al., 2005; FIORITO, 2009).

No Brasil, o uso de argamassas espessas e muito ricas em cimento era comum nas construções, o que gerava problemas de descolamento em pisos e paredes. A recorrência dessa patologia impulsionou o surgimento de pesquisas e, como resultado, no início da década de 1970, foi desenvolvida uma nova argamassa colante, utilizada extensamente por consumidores e profissionais no processo de assentamento (FIORITO, 2009).

2.1.2 Componentes

Para Bauer e Souza (2005), o estudo dos materiais constituintes das argamassas é justificado pela deficiência de regras precisas na especificação desses materiais, muitas vezes definidas empiricamente, apenas pelo conhecimento e experiência dos profissionais da construção. Além disso, novos materiais surgem no mercado frequentemente, trazendo novas alternativas para produção de argamassas, sendo necessário, portanto, um estudo mais aprofundado sobre a sua composição.

2.1.2.1 Aglomerantes

O cimento e a cal são os principais aglomerantes utilizados na produção das argamassas de revestimento, influenciando diretamente nas propriedades do material tanto no estado fresco quanto no endurecido (BAUER; SOUZA, 2005).

Cimento

Mehta e Monteiro (2006) definem cimento como um material fino que, por si só, não possui capacidade aglomerante, porém desenvolve essa propriedade quando hidratado. O cimento é chamado hidráulico quando os produtos de sua hidratação são estáveis em meio aquoso. O

cimento Portland, que é constituído basicamente de silicato de cálcio hidratado, é o tipo de aglomerante mais utilizado para produção de concretos e argamassas.

O processo de produção do cimento Portland consiste basicamente numa mistura de material cálcico, como calcário ou giz, sílica e alumina encontradas em argilas. Inicialmente, as matérias-primas são moídas até a sua redução em um pó bastante fino, misturadas em quantidades predeterminadas e queimadas em um grande forno rotativo, em uma temperatura próxima a 1400°C. No forno, ocorrem inúmeras reações complexas à medida que as matérias-primas, que se movimentam no sentido descendente, são submetidas a temperaturas cada vez mais elevadas. Os produtos dessas reações sofrem uma fusão, formando esferas com diâmetros variáveis, sendo esse material conhecido como clínquer. Após seu resfriamento, adiciona-se ao clínquer certa quantidade de gipsita (sulfato de cálcio), sendo então novamente moído. Por fim, o pó fino, produto dessa moagem, é o cimento Portland comercial, utilizado em todo o mundo (NEVILLE; BROOKS, 2013; SIDNEY, 2008).

Como principais componentes do cimento, destacam-se os quatro compostos listados no Quadro 1, que, individualmente, irão determinar as características do material. Enquanto que os silicatos tricálcico e dicálcico são os componentes mais importantes, pois são responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada, o aluminato tricálcico quase não contribui para essa propriedade. No entanto, esse componente é importante na produção do cimento, ao facilitar a combinação de óxido de cálcio com a sílica. Já o ferroaluminato tetracálcico não interfere de forma expressiva no comportamento do cimento, porém pode acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Quadro 1 - Principais constituintes do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO. SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fonte: Neville; Brooks (2013)

O cimento Portland, quando em meio aquoso, sofre o processo de hidratação, tornando-se um material rígido e resistente, relativamente insolúvel em água. Os produtos dessa reação

exotérmica são uma mistura de silicatos e aluminatos hidratados e, ainda, cristais hexagonais de hidróxido de cálcio (HANNANT, 2000).

Para Hannant (2000), a hidratação do cimento Portland acontece em quatro etapas que são caracterizadas pelas diferentes taxas de liberação de calor a uma temperatura ambiente constante. Inicialmente, no momento do contato do cimento com a água, há formação de hidratos por apenas alguns minutos, com liberação de alto calor. Na segunda etapa do processo, a hidratação dos minerais de clínquer progride de forma bastante lenta, com pouca evolução de calor, podendo durar algumas horas.

Posteriormente, a hidratação do silicato tricálcico tem como produto o composto hidratado microcristalino $C_3S_2H_3$, com liberação de calor na forma cristalina de $Ca(OH)_2$. Essa reação é fundamental no quesito resistência mecânica, principalmente nas primeiras idades, cujo período pode durar até 20 horas após a mistura dos materiais. Na última etapa do processo, a taxa de hidratação dos compostos diminui à medida que a quantidade de materiais que ainda não reagiram reduz. Caso exista água disponível, as reações ainda podem continuar por anos (HANNANT, 2000).

As fases descritas por Hannant (2000) são, de certa forma, simplificadas, pois os processos e os compostos são altamente complexos e dependem de muitas variáveis, como a temperatura, a relação água/cimento, a finura, entre outros, que interferem diretamente na taxa de liberação de calor.

A velocidade de hidratação depende da finura do cimento, e, quanto mais fino o cimento, mais rápidas serão as reações. O rápido desenvolvimento de resistência requer uma finura elevada, porém o custo da moagem e o alto calor liberado na hidratação devem ser considerados para a definição de alguns limites de finura (NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Mehta e Monteiro (2006) referem que as partículas de cimento maiores do que $45\mu m$ sofrem um processo de hidratação mais lento e que as de $75\mu m$ podem nunca se hidratar completamente. Contudo, uma estimativa da reatividade dos cimentos só deve ser realizada após se conhecer a completa distribuição de tamanho das partículas.

Carasek (2010) recomenda atenção em relação à finura do cimento utilizado na produção de argamassas para revestimento, uma vez que cimentos muito finos levam à uma

maior retração plástica, com possível formação de fissuras. Tal patologia compromete a durabilidade dos revestimentos, pois permite a entrada de água no sistema.

Cal

A cal é um aglomerante inorgânico, composto basicamente de cálcio e de magnésio, que se apresenta sob forma pulverulenta. Ao entrar em contato com a água, forma uma pasta com propriedade ligante cujo endurecimento ocorre através da sua transformação em carbonato de cálcio resultante da reação com o gás carbônico existente na atmosfera (CINCOTTO et al., 2010).

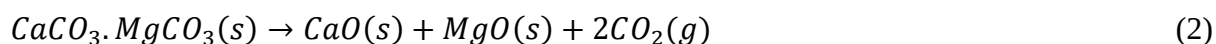
Vestígios arqueológicos e da bibliografia comprovam que a cal, como material de construção, é o ligante mais antigo utilizado pelo homem, bastante habitual entre as antigas civilizações. Ao longo do tempo, o processo de obtenção desse aglomerante teve certas variações com relação à matéria-prima utilizada, aos fornos, aos combustíveis, ao método de calcinação em si, ao manuseio e à extinção (SANTIAGO, 2007).

Segundo Alves Junior et al. (2011), a maior parte da cal produzida no Brasil tem como matérias-primas os calcários e os dolomitos, com idades geológicas diferentes e pureza variável. As cales provenientes de dolomitos e calcários magnesianos estão presentes de forma mais intensa nas regiões Sul e Sudeste do país, enquanto que as originárias de calcários calcíticos são encontradas predominantemente na região Nordeste.

O processo de produção da cal inicia-se com a transformação dos calcários e dolomitos em óxidos e anidrido carbônico. A calcinação, reação química de decomposição térmica, ocorre em fornos aquecidos a pelo menos 800 °C, em que a matéria-prima se dissocia em produtos com fases sólida e gasosa. A reação de calcinação do calcário se dá em uma única etapa, como mostra a Equação 01 (ALVES JUNIOR et al., 2011; CINCOTTO et al., 2010).



No caso do dolomito, a reação ocorre em duas etapas, sendo a segunda análoga à decomposição da calcita. A reação global está representada na Equação 02 (CINCOTTO et al., 2010).



A mistura de óxidos de cálcio e de magnésio, produtos das reações de calcinação, é denominada de cal virgem. Quando se adiciona água, hidróxido de cálcio e de magnésia são formados, originando, assim, a cal hidratada. Essa reação é fortemente exotérmica, cujo calor liberado causa a desintegração completa do material, transformando-o num pó (Equações 03 e 04) (CINCOTTO et al., 2010; BAUER; SOUZA, 2005).



Para ser utilizada como aglomerante, a cal hidratada é suspensa em meio aquoso e, ao longo do tempo, as moléculas de água evaporam. Devido à reação do anidrido carbônico existente no ar com os óxidos, ocorre a solidificação do material, regenerando o carbonato tal qual à pedra original. Identifica-se, então, um ciclo de transformações da matéria-prima e da cal (ALVES JUNIOR et al., 2011).

A norma NBR 6453 (ABNT, 2003c) introduziu três tipos de cal virgem, denominadas CV-E (especial), CV-C (comum) e CV-P (em pedra). As Tabelas 1 e 2 indicam, respectivamente, os requisitos químicos e físicos necessários para que essas cales cumpram a normatização brasileira.

Tabela 1 - Exigências químicas para cada tipo de cal virgem

Compostos			Limites		
			CV-E	CV-C	CV-P
Anidrido carbônico	Fábrica		≤ 6,0%	≤ 12,0%	≤ 12,0%
	Depósito ou obra		≤ 8,0%	≤ 15,0%	≤ 15,0%
Óxidos totais na base de não volátil			≥ 90,0%	≥ 88,0%	≥ 88,0%
Água combinada	Fábrica		≤ 3,0%	≤ 3,5%	≤ 3,0%
	Depósito ou obra		≤ 3,6%	≤ 4,0%	≤ 3,6%

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003d)

Tabela 2 - Exigências físicas para cada tipo de cal virgem

Compostos		Limites		
		CV-E	CV-C	CV-P
Finura	Peneira 1,00 mm	≤ 2,0	≤ 5,0	≥ 85
(% retida acumulada)	Peneira 0,30 mm	≤ 15,0	≤ 30,0	-

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003d)

A cal hidratada pode ser denominada, pela NBR 7175 (ABNT, 2003d), em CH-1, CH-2 e CH-3, de acordo com a sua composição química e ensaios físicos. As Tabelas 3 e 4 demonstram, respectivamente, as existências químicas e físicas propostas pela norma brasileira.

Tabela 3 - Exigências químicas para cada tipo de cal hidratada

Compostos		Limites		
		CH-1	CH-2	CH-3
Anidrido carbônico	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratados		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis		≤ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003d)

Tabela 4 - Exigências físicas para cada tipo de cal hidratada

Compostos		Limites		
		CH-1	CH-2	CH-3
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,750 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≤ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003d)

A principal aplicação da cal hidratada na indústria da construção civil é na confecção de argamassas de assentamento e revestimento. Bauer e Souza (2005) atribuem a conveniência do uso de argamassas de cimento e cal à melhoria de propriedades como trabalhabilidade, retenção de água e aderência com o substrato.

Entretanto, os óxidos não hidratados da cal, quando presentes em altos teores, podem reagir com a umidade após a aplicação e o endurecimento da argamassa. Essa reação de hidratação retardada é expansiva, gerando um acréscimo de volume do material, e, conseqüentemente, pode levar à deterioração dos revestimentos (CARASEK, 2010).

2.1.2.2 Agregados

ASTM Standard C125 (ASTM, 2000) define agregados como materiais granulares empregados junto com cimento para produzir tanto concreto, como argamassa. A norma brasileira NBR 9935 (ABNT, 2011b) especifica agregado como um material normalmente inerte, que possui dimensões adequadas para a preparação de argamassa ou concreto. Areia, cascalho, brita e resíduos de construção e demolição são exemplos de tais materiais.

No que diz respeito ao tamanho, considera-se agregado graúdo aquele com partículas de diâmetro superior a 4,75 mm, enquanto que o agregado miúdo possui partículas menores que 4,75 mm, porém maiores que 75 μ m, sendo o termo areia comumente empregado para se referir a este tipo de agregado (ASTM, 2000).

Os agregados representam cerca de 60% a 80% da composição da argamassa, exercendo, portanto, elevada influência no seu comportamento nos estados fresco e endurecido (CARASEK, 2010). Para a escolha da areia a ser utilizada na produção de argamassas, Bauer e Souza (2005) sugerem uma granulometria contínua e uma dimensão máxima característica adequada aos tipos de revestimento no qual será utilizada. A Tabela 5 apresenta uma indicação dessas dimensões.

Tabela 5 - Recomendação da dimensão máxima característica do agregado de acordo com a camada que compõe o revestimento

Camada do revestimento	Peneiras ABNT (mm)
Chapisco	4,8
Emboço	2,4
Camada única	1,2
Reboco	1,2

Fonte: Bauer; Souza (2005)

Recomenda-se, ainda, que as areias sejam isentas ou devem possuir um teor inexpressivo de torrões de argila, carvão, matéria orgânica, concreções ferruginosas, sais

solúveis, argilominerais, entre outras impurezas. A simples lavagem e peneiramento do agregado é capaz de eliminar grande parte destas impurezas, evitando o surgimento de manifestações patológicas tanto no revestimento quanto na própria argamassa (CARASEK, 2010).

Apesar de ser normalmente inerte, algumas fases mineralógicas da areia podem reagir com os álcalis presentes no cimento. Carasek (2010) afirma que, em presença de umidade, o caráter expansivo da reação álcali-agregado causa a deterioração dos revestimentos argamassados a partir de sua fissuração e desagregação.

Além de favorecer a reação álcali-agregado, a presença de umidade pode causar o inchamento da areia, ou seja, o aumento de volume de uma determinada massa do material causado pelo afastamento das partículas devido ao filme de água em torno dos grãos. Para traços em volume, este fenômeno afeta o proporcionamento dos materiais já que uma menor massa de areia irá ocupar o volume fixo do recipiente de medida (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os tipos de agregados comumente empregado para argamassas são as areias naturais, obtidas de leitos de rios e “cavas”, e as artificiais, provenientes de algum processo industrial como britagem de rochas, sendo estas mais utilizadas na produção de argamassas industrializadas (CARASEK, 2010). Normalmente, a areia natural é comercializada e utilizada na construção civil na forma como é extraída, passando apenas por uma grelha, onde ocorre a separação das frações mais grossas e de eventuais impurezas, tais como matéria orgânica. Posteriormente, passa por uma simples lavagem para retirada da argila e, em seguida, pela secagem (ABDI, 2012).

De acordo com o relatório da ABDI (2012), o processo de produção do agregado miúdo natural consiste basicamente em extração, estocagem, carregamento e transporte do material. A extração pode ser realizada pelos métodos de cava seca, de cava submersa ou extração em leito de rio. Nos locais de estocagem, chamados de paióis, caixotes ou silos, a areia pode passar por processos de beneficiamento como lavagem, drenagem e peneiramento, sendo que este último visa a classificação do material de acordo com a sua granulometria. Findadas essas etapas, o agregado miúdo é carregado em caminhões que o transportarão para os locais de consumo.

Para a norma NBR 9935 (ABNT, 2011b), a areia artificial é aquela proveniente de processos industriais, a areia reciclada tem sua origem a partir de processos de reciclagem e a

areia de britagem é derivada do processo de cominuição mecânica de rocha, conforme normas específicas.

Como a extração de areia causa sérios impactos ambientais, a utilização de agregados artificiais, ou até mesmo reciclados, torna-se uma alternativa viável. Segundo Ferreira e Pereira (2009), o agregado reciclado de resíduo da construção civil tem sido amplamente empregado em sub-bases, concretos magros, solo-cimento, pavimentação e em concretos novos, realizando uma substituição parcial ou até total dos agregados convencionais.

Apesar das diversas possibilidades de aplicação, no Brasil, a norma NBR 15116 (ABNT, 2004) estabelece requisitos para os agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, restringindo seu emprego a obras de pavimentação viária e ao preparo de concreto sem função estrutural. Tal tipo de concreto é destinado a usos como enchimentos, contrapiso, calçadas e fabricação de artefatos não estruturais.

No entanto, diversas pesquisas da literatura mostram que argamassas e até mesmo concretos com função estrutural produzidos com agregados reciclados apresentam desempenho satisfatório. Além disso, o reaproveitamento de entulho na forma de matéria-prima reduz o consumo de recursos naturais, promove a diminuição de custos e minimiza os problemas ambientais urbanos relacionados à geração e disposição de resíduos da construção (SANTANA et al., 2001).

Agregados naturais também podem ser substituídos por resíduos industriais que, segundo a NR 25 (MTE, 2011), são originados dos processos industriais, na forma sólida, líquida ou gasosa ou combinação dessas, e que por suas características físicas, químicas ou microbiológicas não se assemelham aos resíduos domésticos. Cinzas, lodos, óleos, materiais alcalinos ou ácidos, escórias, poeiras, borras, substâncias lixiviadas são alguns exemplos de resíduos industriais. A norma supracitada determina que as empresas geradoras de resíduos líquidos e sólidos são responsáveis pela coleta, acondicionamento, armazenagem, transporte, tratamento e disposição final adequada desses materiais.

A incorporação desses resíduos na indústria da construção civil, como substituição total ou parcial da areia, é uma forma de destinação ecologicamente correta e ainda evita seu lançamento no meio ambiente de modo inadequado. Estudos como o de Moura (2000) e de Nazer et al. (2012) avaliaram o uso de escória de cobre como agregado miúdo em concretos e argamassas, respectivamente. Ambos os autores concluíram que esse resíduo metalúrgico

melhorou o desempenho dos materiais e, dessa forma, pode ser seguramente utilizado na construção civil.

2.1.2.3 Aditivos

A função dos aditivos, de forma geral, é melhorar as propriedades do material ao qual são adicionados. Em pequena quantidade, esses produtos químicos são capazes de modificar algumas características das argamassas como trabalhabilidade, tempo de aplicação, resistência mecânica, impermeabilidade, adequando-as a determinadas situações.

De acordo com Carasek (2010), o aditivo incorporador de ar é um dos mais empregados na produção de argamassas, cuja função é formar microbolhas de ar de forma homogênea. Essas bolhas, uniformemente dispersas, trazem melhorias na trabalhabilidade e possibilitam uma redução do consumo de água de amassamento. Além da trabalhabilidade, algumas outras propriedades são alteradas de forma benéfica através da incorporação de ar nas argamassas, como redução do módulo de deformação e diminuição da retração, da exsudação e da massa específica (ALVES; DO Ó, 2005).

A argamassa também pode ser composta por aditivos retentores de água, cuja função é mantê-la aplicável por um período de tempo apropriado, mesmo quando sujeita a solicitações que provoquem perda de água, seja por evaporação, sucção do substrato ou reações de hidratação. Segundo Alves e do Ó (2005), esse tipo de aditivo tem grande influência na trabalhabilidade da argamassa, uma vez que há mudança de viscosidade do material e incorporação de ar durante a mistura. Dessa forma, ao empregá-lo, faz-se necessária uma reformulação na dosagem dos materiais constituintes das argamassas através de uma orientação técnica especializada.

2.1.3 Classificação e tipos

Pela NBR 13529 (ABNT, 2013b), as argamassas podem ser classificadas de acordo com a natureza, o tipo e o número de aglomerantes; com suas propriedades e com as condições de fornecimento ou preparo.

Recena (2011), baseando-se nas aplicações mais usuais das argamassas nos canteiros de obras, classifica-as quanto à forma de endurecimento e resistência à umidade, quanto à natureza

do aglomerante, quanto à utilização, quanto ao volume de pasta, quanto à granulometria do agregado e quanto à forma de produção. Carasek (2010) apresenta uma classificação semelhante, de acordo com os critérios indicados no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação das argamassas

Critério de classificação	Tipo
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	Argamassa seca Argamassa plástica Argamassa fluida
Quanto à plasticidade	Argamassa pobre ou magra Argamassa média ou cheia Argamassa rica ou gorda
Quanto à densidade de massa	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: adaptada de Carasek (2010)

2.1.3.1 Classificação quanto à natureza do aglomerante

A depender da natureza do aglomerante mineral utilizado na sua produção, as argamassas podem ser hidráulicas ou aéreas. O endurecimento das argamassas hidráulicas ocorre exclusivamente pela ação química da água, convertendo-se em um material resistente à umidade. No caso dos aglomerantes aéreos, seu endurecimento pode se dar por reação com o dióxido de carbono presente no ar, no caso da cal, ou por reidratação, como o gesso, e seus produtos não apresentam estabilidade à água (RECENA, 2011).

2.1.3.2 Classificação quanto ao tipo de aglomerante

O cimento Portland é o aglomerante hidráulico mais utilizado na produção de argamassas, seja como ligante único ou combinado com a cal. Devido à sua resistência à umidade, Recena (2011) recomenda a utilização de argamassas cimentícias em situações em que haja contato direto com a água, como nos serviços de fundações e revestimentos externos. Tal material possui alta resistência mecânica, sendo assim mais suscetível à retração e fissuração devido à sua rigidez.

No caso das argamassas simples de cal, deve-se limitar seu emprego a locais secos e bem arejados, já que a cal é um aglomerante aéreo. Tais argamassas possuem capacidade de absorver maiores deformações que as feitas de cimento, o que implica em menor quantidade de fissuras no revestimento. Na atualidade, são usadas predominantemente em trabalhos de restauração de patrimônios de valor histórico e cultural (RECENA, 2011).

As argamassas mistas, produzidas a partir da mistura de cimento e cal, apresentam propriedades que irão variar com a proporção dos materiais estabelecida na dosagem. A cal influencia a hidratação do cimento, alterando a sequência das reações e também confere aumento da plasticidade e da capacidade de retenção de água da argamassa (CINCOTTO et al., 2010; RECENA, 2011).

A utilização do gesso como aglomerante está se tornando cada vez mais usual nos canteiros de obras, devido à sua qualidade aliada ao seu baixo custo, substituindo a argamassa nas etapas de revestimento interno de paredes. A pasta de gesso, que dispensa o uso de agregados, resulta em um acabamento branco e liso e, segundo John e Cincotto (2010), seu endurecimento rápido reduz o tempo entre aplicação e acabamento final, acarretando em maior produtividade em relação às argamassas cimentícias.

A pega rápida da pasta de gesso traz produtividade na etapa de revestimento, mas, por outro lado, ocasiona uma grande geração de resíduos, que ocorre tanto na operação de aplicação quanto no nivelamento da superfície do revestimento. A partir da Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), o resíduo de gesso passou a ser classificado como reciclável, podendo então ser utilizado novamente de diferentes formas. Para isso, esse resíduo deve ser coletado e armazenado em local específico nos canteiros, separando-o de outros materiais como madeira, metais, papéis, restos de alvenaria e lixo orgânico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO DRYWALL, 2012).

2.1.3.3 Classificação quanto à utilização

As argamassas também podem ser classificadas segundo sua função na construção, como demonstrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Classificação das argamassas de acordo com a função na construção

Função	Tipos
Construção de alvenarias	Argamassa de assentamento Argamassa de fixação
Revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco Argamassa de emboço Argamassa de reboco Argamassa de camada única Argamassa de revestimento decorativo
Revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso Argamassa de alta resistência para piso
Revestimentos cerâmicos (paredes e pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas Argamassa de rejuntamento
Recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: Carasek (2010)

Devido à grande aplicabilidade das argamassas de assentamento de alvenaria e de revestimento de paredes e tetos e à importância da argamassa de contrapiso no âmbito desta pesquisa, dar-se-á destaque, a seguir, a estes três tipos de argamassa.

Argamassa de assentamento

Os principais objetivos de uma argamassa de assentamento, de acordo com Sabbatini (1998), incluem união dos elementos de alvenaria, atribuição de rigidez à parede, distribuição das cargas aos elementos de maneira uniforme, absorção de deformações e selagem das juntas que impede a penetração de água. Martinelli e Helene (1991) apontam as funções específicas da argamassa para cada tipo de assentamento de alvenarias, como indicado no Quadro 4.

Quadro 4 - Usos e funções das argamassas de assentamento

Usos	Funções
Assentamento estrutural	Resistir a esforços mecânicos, unir os elementos da alvenaria, vedar juntas
Assentamento convencional	Unir os elementos da alvenaria, vedar juntas
Assentamento de acabamentos	Unir os elementos de acabamento ao substrato

Fonte: Martinelli; Helene (1991)

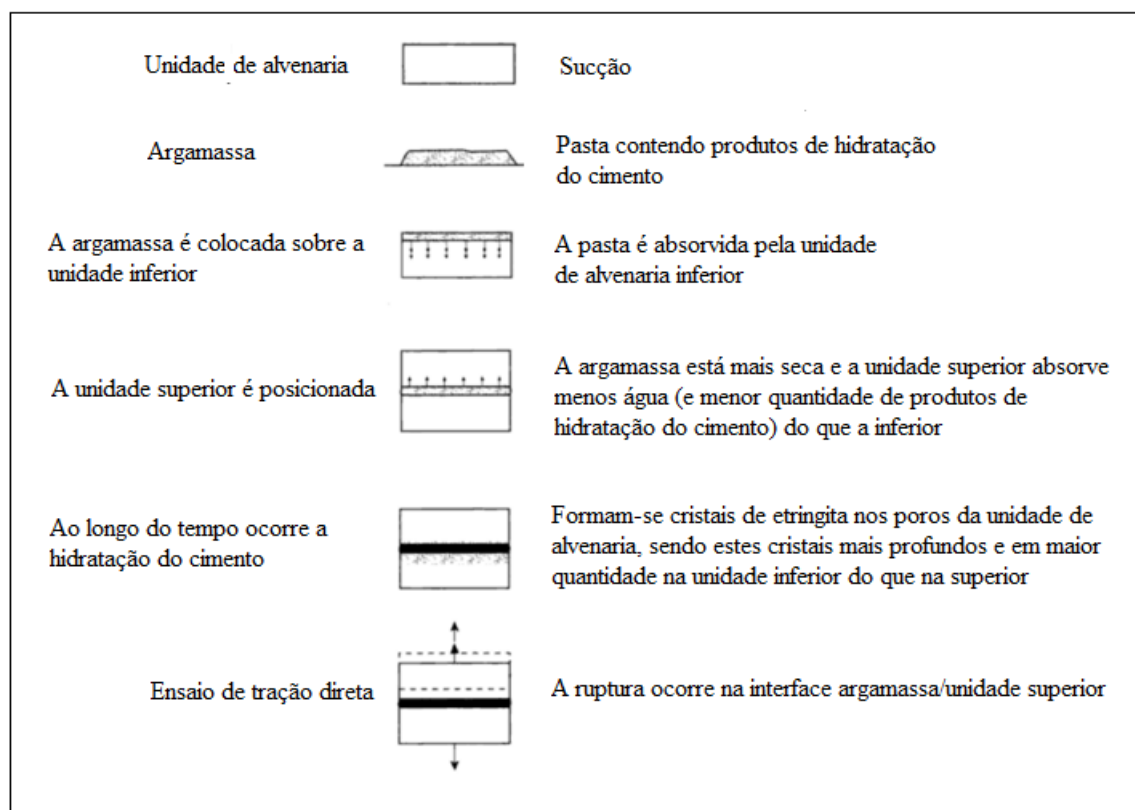
Para Carasek (2010), essas funções só poderão ser satisfeitas caso a argamassa de assentamento apresente adequada trabalhabilidade, aderência, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações. Entretanto, Sabbatini (1998) considera a resistência mecânica como uma propriedade de relevância secundária, diferentemente do que ocorre com a argamassa que constitui o concreto de cimento Portland, sendo, portanto, a trabalhabilidade, a aderência e a deformabilidade no estado endurecido os principais requisitos almejados numa argamassa de assentamento.

Argamassas de assentamento devem apresentar uma trabalhabilidade adequada à execução apropriada do serviço e à sua forma de aplicação. Para exemplificar a importância de tal propriedade, tem-se que, para argamassas muito fluidas, ocorrerá um esmagamento do material pelo elemento de alvenaria colocado logo acima, proporcionando uma altura de junta menor do que a desejada e até desalinhamento e falta de prumo da parede (CARASEK, 2010).

A aderência é uma propriedade fundamental em argamassas de assentamento, pois permite que a parede resista a esforços de cisalhamento e de tração, e ainda garante a estanqueidade das juntas. A quantidade, a penetração e o grau de hidratação do material cimentício da argamassa nos poros da unidade de alvenaria definem a tensão de aderência entre os materiais (CARASEK, 2010; GALLEGOS; CABONNE, 2005).

De acordo com Gallegos e Casabonne (2005), no momento em que a argamassa de assentamento é aplicada à superfície de um elemento de alvenaria com características absorventes, pode ocorrer perda de água de forma rápida, prejudicando a aderência entre a argamassa e os blocos. A Figura 1 ilustra esse processo de aderência durante o assentamento de um bloco.

Figura 1 - Iteração entre argamassa de assentamento e os blocos em uma alvenaria



Fonte: adaptada de Gallegos; Casabonne (2005)

A deformabilidade de um material está associada ao seu módulo de elasticidade, sendo que, quanto menor o valor do módulo, maior será a capacidade de absorver deformações. Nakakura e Cincotto (2004) destacam tal capacidade como uma importante propriedade das argamassas de assentamento, visto que, quando sujeitas a solicitações diversas, precisam deformar-se sem romper, ou sem apresentar fissurações expressivas, contribuindo para a impermeabilidade da edificação.

Argamassa de revestimento

O sistema de revestimentos tem a função de regularização das superfícies, impermeabilização, proteção da alvenaria, melhoria das condições termo-acústicas dos ambientes e, ainda, papel estético. Após a aplicação das multicamadas que compõem esse sistema, o substrato está apto para receber o acabamento final, seja pintura, cerâmica, pastilha, entre outros (BAUER, 2005; NAKAMURA, 2013).

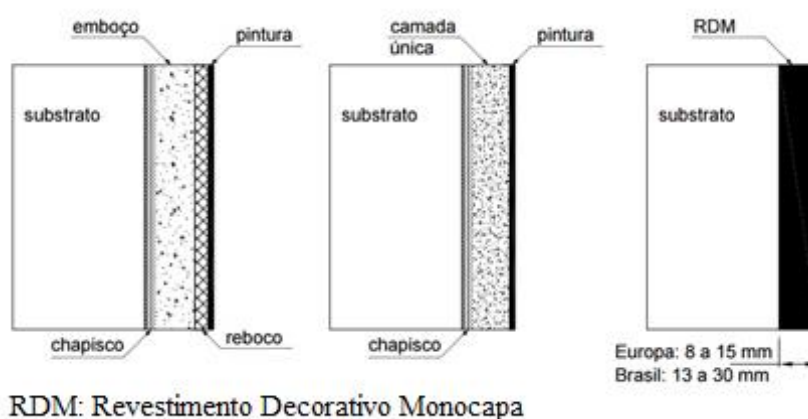
As três camadas superpostas que normalmente compõem os revestimentos em argamassa são chapisco, emboço e reboco, cada uma com características e funções específicas (Quadro 5). No entanto, existem outras alternativas de disposição, como ilustradas na Figura 2.

Quadro 5 - Usos e funções das camadas de revestimento

Usos	Funções
Chapisco	Unir camadas de revestimento ao substrato
Emboço	Vedar a alvenaria, regularizar a superfície, proteger o ambiente interno
Reboco	Vedar o emboço (acabamento estético)

Fonte: Martinelli; Helene (1991)

Figura 2 - Diferentes alternativas de revestimento de parede



Fonte: Carasek (2010)

A base ou substrato que irá receber as camadas do revestimento pode ser uma alvenaria de blocos cerâmicos ou de concreto, ou elementos estruturais em concreto como pilares, vigas e lajes. Independentemente do material, a base deve estar curada, limpa, uniforme e livre de desagregações para garantir o sucesso do sistema de revestimento (BAUER, 2005; NAKAMURA, 2013).

De acordo com Bauer (2005), é importante que haja uma aderência adequada do conjunto argamassa-substrato, relação que depende intensamente da textura da base. Como as rugosidades são pontos de ancoragem da argamassa aplicada, substratos rugosos possuem maior área de contato com o material, fornecendo melhores condições de aderência. Já substratos lisos necessitam de uma preparação para torná-los convenientemente rugosos.

Com o intuito de uniformizar a superfície e melhorar a aderência do revestimento, o chapisco é constituído por uma argamassa rica, com alto consumo de cimento. Bauer (2005) considera o chapisco somente como um procedimento de preparação de base, não constituindo uma camada do revestimento. Os tipos de chapisco mais empregados nos canteiros de obras são o convencional, o industrializado e o rolado. Com um traço em volume de 1:3 (cimento : areia) e agregado de granulometria capaz de conferir a textura adequada ao substrato, a argamassa utilizada no chapisco convencional é bastante fluida, possibilitando seu lançamento, de forma enérgica, com a colher de pedreiro (BAUER, 2005; NAKAMURA, 2013).

Para a execução do chapisco industrializado, o operário aplica argamassa industrializada na base com desempenadeira dentada. A utilização desta ferramenta confere um aspecto rugoso à superfície, no formato de filetes orientados. No caso do chapisco rolado, utiliza-se uma argamassa bastante fluida, podendo conter aditivos, aplicada com rolo para textura. Nesse método de aplicação, alguns cuidados devem ser tomados: o substrato deve estar plano, a argamassa bem homogeneizada para que a areia não decante no recipiente e a aplicação deve ser feita somente em um sentido e sem sobreposição de camadas (BAUER, 2005).

Segundo Carasek (2010), o emboço é a camada de revestimento cuja principal função é cobrir e regularizar a base ou o chapisco, permitindo receber, posteriormente, outras camadas de reboco, de revestimento cerâmico, ou outro procedimento que constitua o acabamento final. As argamassas de emboço, de acordo com Bauer (2005), são constituídas por areias mais grossas que as demais argamassas e recebem um acabamento sarrafeado de textura áspera, a fim de facilitar a aderência na aplicação dos outros materiais.

A camada de revestimento aplicada diretamente sobre o emboço é chamada de reboco ou massa fina, e tem a finalidade de conferir uma textura mais lisa à superfície, possibilitando a aplicação de uma pintura, por exemplo. A argamassa para reboco é produzida com agregado de granulometria mais fina que a do emboço e sua aplicação é feita com desempenadeira em movimentos circulares (CARASEK, 2010; NAKAMURA, 2013).

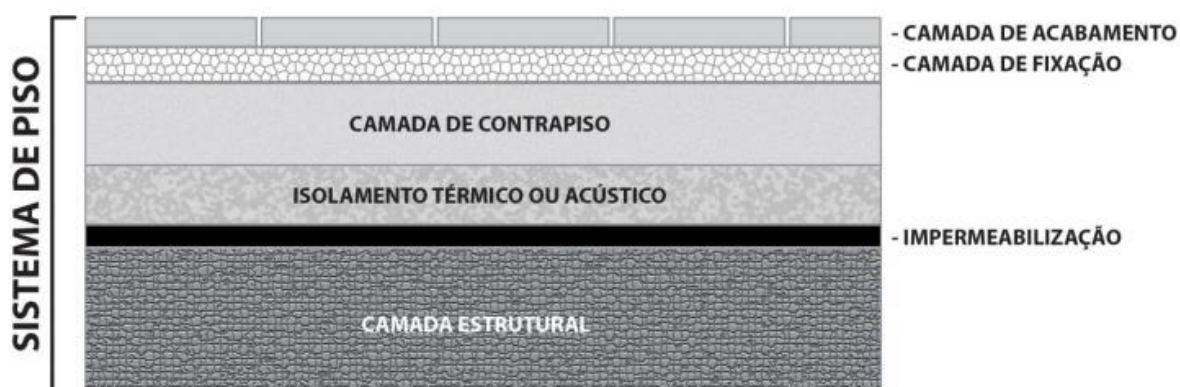
O tipo de revestimento atualmente mais empregado no país, de acordo com Carasek (2010), é a camada única, que consiste em apenas uma camada de argamassa que irá atender, simultaneamente, as funções do emboço e reboco, ou seja, regularizar a base e proporcionar o acabamento final. Popularmente denominada de massa única ou reboco paulista, sua aplicação necessita de operações como corte, sarrafeamento e acabamento, executadas de forma a garantir um revestimento final adequado ao seu uso (BAUER, 2005).

Carasek (2010) ainda traz, como alternativa de revestimento de parede, a monocapa, também chamada de Revestimento Decorativo Monocamada (RDM), que tem papel de regularização e decoração. Esse sistema, aplicado diretamente ao substrato, é bastante difundido nos países europeus, entretanto no Brasil ainda não existe normatização para a argamassa de RDM.

Argamassa de contrapiso

O sistema de piso é um sistema horizontal ou inclinado composto por um conjunto parcial ou total de camadas, como camada estrutural, camada de contrapiso, camada de fixação e camada de acabamento (Figura 3). Sua função é regularizar o substrato, proporcionando uma superfície de apoio uniforme, coesa, aderida ou não, e adequada à camada de acabamento, podendo eventualmente servir como camada de embutimento, caimento ou declividade.

Figura 3 - Exemplo genérico de um sistema de pisos e seus elementos



Fonte: ABNT (2013c)

Souza (2007) complementa, indicando que, além da função de regularizar a base e nivelar a superfície, os contrapisos conferem caimentos necessários para ralos e ainda melhoram o conforto acústico. Para a execução do contrapiso, utiliza-se geralmente argamassa seca (do tipo "farofa"), energicamente apiloada contra a base, cuja espessura varia em função do tipo de contrapiso, dos desníveis finais pretendidos para o piso e dos níveis da laje.

Além das argamassas dosadas em obra utilizadas no método tradicional de contrapiso, existem as argamassas industrializadas. De acordo com Barros e Sabbatini (1991), a escolha da argamassa a ser utilizada na execução do contrapiso envolve conhecimento prévio dos tipos

disponíveis e de suas características, determinando-se em seguida sua composição e dosagem que, por sua vez, dependem da escolha dos materiais e da metodologia de dosagem.

2.1.3.4 Classificação quanto ao volume de pasta

A plasticidade da argamassa será determinada pelo volume de pasta que a compõe, e, nesse quesito, pode-se classificá-la em pobre ou magra, média ou cheia e, ainda, rica ou gorda. A argamassa cheia é aquela em que este volume é suficiente para preencher satisfatoriamente os vazios entre os grãos dos agregados, porém, essa situação ideal é dificilmente verificada na prática. A argamassa gorda contém pasta em excesso e, por analogia, a magra apresenta volume de pasta insuficiente para preencher os espaços vazios da mistura (RECENA, 2011).

2.1.3.5 Classificação quanto à forma de produção ou fornecimento

Quanto à forma de preparo, as argamassas podem ser produzidas em obra, industrializadas, dosadas em central, ou elaboradas a partir de uma mistura semipronta. Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013b), as argamassas preparadas em obra são aquelas tradicionais, em que a medição e a mistura dos materiais ocorrem no próprio canteiro de obras. Composta por aglomerantes, agregados e água, com ou sem aditivos, esse tipo de argamassa deve ser dosada de forma adequada a fim de garantir desempenho satisfatório e adequado ao seu uso.

As argamassas industrializadas são misturas prontas, dosadas em indústrias e fornecidas em sacos, cuja adição da água é realizada na obra. Como são produzidas por processos mecanizados e sob um controle rígido de produção, as argamassas ensacadas apresentam grande uniformidade de dosagem, sendo possível atingir uma repetição de traço com um elevado grau de confiança (ABCP, 2002). Recena (2011) afirma que, para cada tipo de argamassa industrializada, existe uma especificação de uso, como aplicação de revestimentos, assentamento de elementos de alvenaria, contrapisos e regularizações.

De acordo com o Manual de Revestimentos da ABCP (2002), o fornecimento das argamassas dosadas em centrais é realizado por caminhões-betoneira, chegando ao canteiro de obras prontas para a aplicação. No caso das argamassas à base de cimento, é importante um planejamento adequado da quantidade de material a ser solicitada, pois, mesmo com aditivos, apresentam curto período de aplicação, diferentemente das de cal, cuja aplicabilidade se mantém por alguns dias. A aplicação desse tipo de argamassa é recomendada em serviços

rápidos que necessitem de um grande volume de material, como na execução de contrapisos de grandes dimensões.

Assim como a argamassa industrializada, a mistura semipronta é preparada em instalações industriais, fornecida embalada ou a granel, sendo o cimento, a água e, eventualmente, aditivos, adicionados na obra no momento da aplicação (ABNT, 2013b).

2.1.3.6 Argamassa projetada

Tradicionalmente, em canteiros de obras, a aplicação de argamassa é realizada de forma manual, utilizando-se colher de pedreiro, desempenadeira dentada ou rolo para textura acrílica, a depender do tipo de revestimento. Na busca da racionalização e otimização dos processos construtivos, surge a projeção mecanizada de argamassas, técnica aplicada principalmente nos serviços de revestimento interno e externo.

Segundo Santos e Ramos (2005), quando se faz uso de um sistema de aplicação mecanizado, opta-se geralmente pela argamassa industrializada, sendo adicionada água na medida adequada à sua mistura e ao seu bombeamento. Os projetores com recipiente acoplado e as bombas com misturador acoplado são os equipamentos mais usuais para projeção de argamassas.

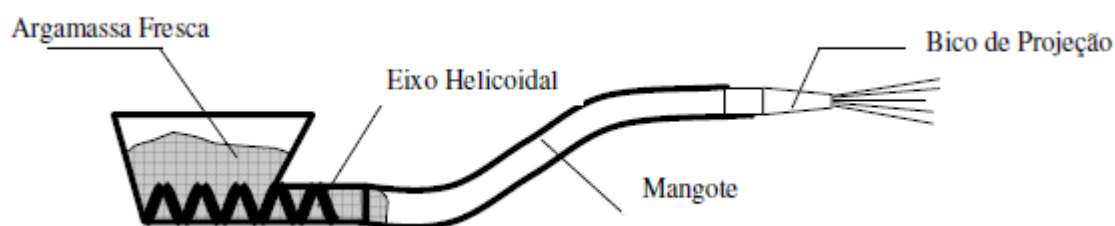
O sistema de projetor com recipiente acoplado consiste basicamente em canecas furadas, onde é inserida a argamassa fresca, conectadas a um compressor (Figura 4). A função do compressor é injetar ar comprimido nas canecas, fazendo com que o material seja projetado pelos furos. No caso das bombas de projeção, comumente de eixo helicoidal (Figura 5) ou do tipo pistão, as câmaras do equipamento são preenchidas com argamassa para ser posteriormente bombeada por meio de um mangote e projetada através da pistola (SANTOS; RAMOS, 2005).

Figura 4 - Projektor por *spray* com recipiente acoplado



Fonte: Cichinelli (2010)

Figura 5 - Esquema de bomba de projeção do tipo helicoidal



Fonte: Santos; Ramos (2005)

Seja por projetor com recipiente acoplado, popularmente conhecido como canequinha, ou por bombas de projeção, Cichinelli (2010) afirma que, quando utilizados de forma correta, esses métodos de aplicação mecanizada de argamassa podem trazer diversas vantagens técnicas e operacionais, como maior produtividade e uniformidade na execução dos revestimentos. Além disso, por garantir uma constância da energia de lançamento do material, o uso desses equipamentos promove uma maior resistência de aderência na argamassa de projeção comparada à aplicada pelo método tradicional.

O emprego de argamassas comuns na mecanização do sistema de revestimentos deve ser evitado, uma vez que as características da argamassa para projeção, especialmente no estado fresco, são diferentes das utilizadas tradicionalmente. Exige-se uma elevada fluidez do material,

de forma que seu deslocamento na tubulação ocorra sem perda de consistência, propriedade influente na adesão inicial ao substrato (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2012).

Santos e Ramos (2005) consideram o teor de água, o tempo de mistura e as características dos agregados fatores relevantes a serem observados quando da utilização de argamassas industrializadas no processo de projeção mecanizada, pois influenciam diretamente, cada um à sua maneira, na consistência do material.

A quantidade de água deve ser adicionada de acordo com as recomendações do fabricante, uma vez que seu excesso eleva a fluidez da mistura, afetando negativamente a adesão inicial ao substrato. O tempo de mistura é diretamente proporcional ao teor de ar incorporado na argamassa, sendo o aumento da plasticidade do material resultado de um maior teor de ar. A granulometria do agregado também interfere na consistência da mistura pois quanto maior a massa unitária e menor o volume de vazios dos agregados utilizados, menor será a quantidade de água requerida (SANTOS; RAMOS, 2005).

Além de influenciar na adesão inicial ao substrato, uma elevada consistência da argamassa pode provocar obstruções no mangote e no rotor, danificando assim o equipamento. A concentração excessiva de agregados e a carência de pasta de cimento que prejudica as camadas de lubrificação conferem pouca fluidez à massa, favorecendo essas obstruções. Por outro lado, quando há pasta em abundância na mistura, ocorre uma separação entre as fases fluida e sólida devido à pressão de bombeamento, ocasionando uma retenção dos agregados na tubulação (SANTOS; RAMOS, 2005).

A fim de reduzir a instabilidade que faz com que a fase mais fluida se dissocie facilmente do agregado, causando entupimento nos equipamentos de projeção de argamassa, Santos e Ramos (2005) recomendam a adição de cal à mistura. Já a utilização de aditivos incorporadores de ar previne obstruções que podem ocorrer no mangote, já que a pressão exercida pela bomba tende a retirar os vazios da argamassa, tornando-a menos fluida.

Quando a argamassa, ao ser projetada, atinge a superfície, mas não consegue uma aderência, ocorre a reflexão de parte do material. De acordo com Austin et al. (2002), as consequências dessa perda vão muito além do aumento do custo da argamassa projetada. O material refletido é, em sua maior parte, composto de agregados, restando assim uma argamassa bastante rica em cimento com tendência a sofrer retração térmica e fissuração.

2.1.3.7 Argamassa autonivelante

Assim como o concreto autoadensável, a argamassa autonivelante tem a capacidade de, quando lançada, se mover por conta própria e preencher, sem necessitar de nenhuma intervenção, os espaços vazios. O equilíbrio entre a grande mobilidade, moderada viscosidade, alta fluidez e coesão entre as partículas que constituem a mistura permite que a argamassa autonivelante tenha grande fluidez, adensando-se sem segregar.

Apesar de ainda não possuir normalização no Brasil e não ter suas características e propriedades especificadas para cada uso, é possível encontrar no mercado indicações de utilização da argamassa autonivelante em ambientes industrial, residencial e comercial (RUBIN, 2015). De acordo com Cichinelli (2013), a utilização de argamassas autonivelantes é indicada na recuperação, regularização e nivelamento de bases de concreto. Suas características permitem a execução de uma superfície lisa e plana, com um desnível de apenas 1 mm a cada 4 m de comprimento (MARTINS, 2009).

Atualmente, as argamassas autonivelantes podem ser fornecidas tanto com seus constituintes secos ensacados, e a mistura com a água é feita no momento do lançamento, quanto produzidas em centrais, sendo transportadas à obra em caminhão betoneira, chegando pronta para sua aplicação. O Quadro 6 apresenta as diferenças entre essas duas formas de fornecimento e a argamassa comum dosada em obra (SOUZA, 2013).

Quadro 6 - Comparação entre as argamassas autonivelantes industrializada, dosada em central e argamassa comum dosada em obra

Tipo Atividade	Argamassa autonivelante industrializada	Argamassa autonivelante dosada em central	Argamassa comum dosada em obra
Entrega e recebimento	Não depende de entrega programada	A entrega precisa ser programada com antecedência	Não depende de entrega programada
Mistura e preparo	Necessita de argamassadeira acoplada à bomba	A argamassa é lançada direto na bomba	A mistura é feita em betoneira convencional
Mão de obra para preparo e aplicação	Necessita de mais mão de obra para transporte e mistura da argamassa	A mão de obra fica responsável apenas pelo bombeamento e espalhamento da argamassa	Necessita de mais mão de obra para transporte dos materiais e mistura da argamassa
Materiais utilizados	Não depende diretamente do mercado das concreteiras	Mais susceptível a variações de demanda da central em outras áreas do mercado	Materiais comuns e encontrados com facilidade em depósitos de construção
Dosagem	Deve-se atentar para a correta dosagem da água de emassamento	Melhor controle da dosagem	Deve-se atentar para a correta dosagem dos materiais e da água de emassamento
Produção	A argamassa vai sendo produzida na medida em que será utilizada	A demora na entrega pode acarretar em perda do material	A argamassa vai sendo produzida na medida em que será utilizada
Infraestrutura auxiliar	O uso não depende de infraestrutura de usina próxima à obra	O uso está condicionado à presença de usina próxima à obra	O uso não depende de infraestrutura de usina próxima à obra

Fonte: adaptada de Souza (2013)

As orientações de aplicação das argamassas autonivelantes variam a depender do fabricante e da central de fornecimento, bem como do processo de preparo escolhido e a espessura desejada. No entanto, certos cuidados devem ser tomados para que essas argamassas apresentem o desempenho mínimo esperado. As etapas para a execução de um contrapiso

autonivelante são preparo da laje, marcação de juntas e barreiras de contenção, lançamento e aplicação, controle do nivelamento, acabamento e cura (RUBIN, 2015).

Inicialmente, as superfícies devem estar estruturalmente íntegras, limpas e livres de sujeira, óleo, graxa, tinta. Se as condições do substrato para aplicação do produto forem impróprias, indica-se o uso da fresadora, equipamento que possibilita a retirada da camada superficial da base atingindo uma camada mais resistente, proporcionando, desse modo, uma melhor ancoragem do contrapiso autonivelante. Após a fresagem, a sujeira grossa deve ser removida com a ajuda de vassoura, sendo o pó restante posteriormente aspirado. Caso não exista esse preparo, a aderência entre a argamassa e a base poderá ser prejudicada, influenciando negativamente no desempenho do sistema de contrapiso (CICHINELLI, 2012).

Com a superfície corretamente preparada, deve-se aplicar duas demãos de selante com o auxílio de uma vassoura de pêlo limpa, respeitando o intervalo de quatro horas entre as camadas. Após, posicionam-se as juntas de dilatação do revestimento, que devem acompanhar as juntas de dilatação do substrato (Figura 6). No caso das argamassas autonivelantes com espessuras elevadas, deve-se colocar uma placa de espuma ou uma fita de polietileno expandido em todo perímetro do ambiente e em peças estruturais existentes no local (Figura 7), cujo intuito é absorver os possíveis movimentos de expansão e contração do material. Além disso, deve-se instalar barreiras para delimitar a área de trabalho e garantir a contenção da argamassa (AFAM, 2005; CICHINELLI, 2012).

Figura 6 - Demarcação das juntas de dilatação



Fonte: Cichinelli (2012)

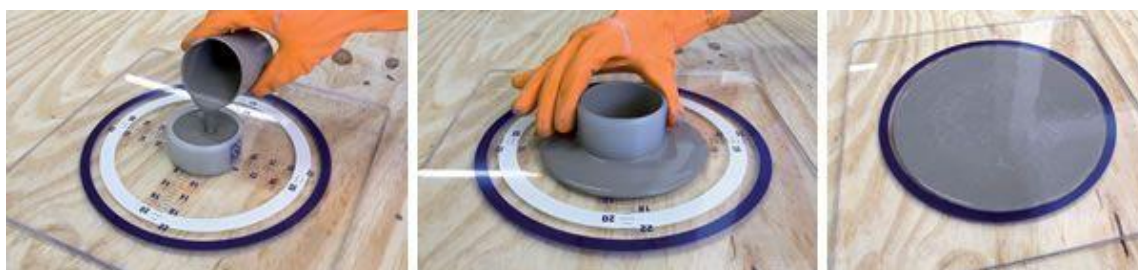
Figura 7 - Colocação da fita de poliestireno expandido



Fonte: Cichinelli (2012)

No caso de argamassas autonivelantes ensacadas, a mistura do produto deve ser realizada conforme as especificações do fabricante, sempre se certificando de adicionar água na proporção correta, pois seu excesso pode reduzir a resistência final da argamassa. A mistura pode ser feita com um misturador mecânico de baixa rotação, até se obter uma massa homogênea, de consistência fluida e sem grumos (AFAM, 2005). Com o objetivo de verificar tal consistência, Cichinelli (2013) recomenda, antes da aplicação da argamassa, a realização do ensaio de espalhamento, denominado *slump flow test*. Neste ensaio, a argamassa deve atingir a marcação em azul, como indicado na Figura 8.

Figura 8 - Evolução do ensaio *Slump flow test*

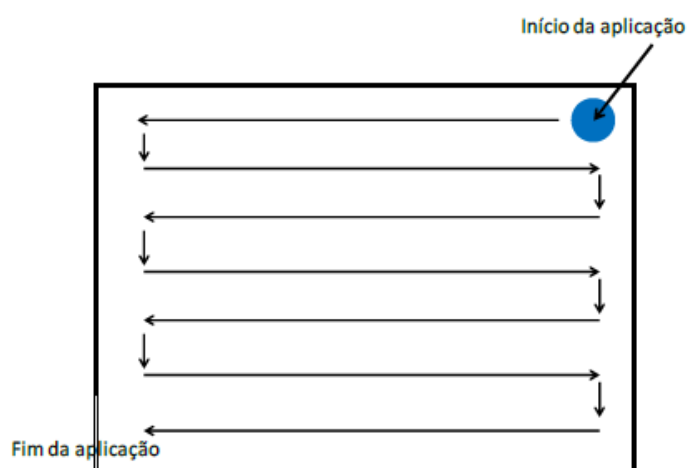


Fonte: Cichinelli (2013)

Em seguida, o lançamento da mistura no ambiente pode ser feito por gravidade ou por bombeamento, de forma a obedecer a espessura requerida, que deve estar entre as margens recomendadas pelo fabricante. Votorantim (2015) recomenda o posicionamento do mangote na

extremidade oposta à saída do ambiente e, para uma melhor distribuição na aplicação da argamassa, sugere seguir um sentido preferencial, conforme indicado na Figura 9. De acordo com Cichinelli (2013), o processo de endurecimento da argamassa autonivelante é rápido, e, por isso, durante o período de lançamento e aplicação, o operário utiliza uma sapatilha de pregos (Figura 10).

Figura 9 - Esquema de aplicação da argamassa autonivelante no ambiente



Fonte: Votorantim (2015)

Figura 10 - Utilização de sapatilha de pregos na aplicação da argamassa autonivelante



Fonte: Cichinelli (2013)

Com o material já lançado e aplicado, Rubin (2015) recomenda uma verificação de nível para o controle da espessura final da camada de argamassa. No caso de contrapisos de baixas espessuras e/ou pavimentos com substratos com boa planicidade, a verificação pode ser feita através do uso de rodo nivelador. Para o acabamento do contrapiso autonivelante, pode-se utilizar rolo quebra-bolhas ou rastelo denteado, cujo objetivo é a remoção do ar aprisionado no material (Figura 11). Caso o ar não seja adequadamente removido, poderá ser liberado durante o processo de cura, resultando em um mau acabamento da superfície (CICHINELLI, 2013).

Figura 11 - Acabamento do contrapiso autonivelante



Fonte: Cichinelli (2013)

Devido à falta de padronização ou normatizações nacionais a respeito de argamassas autonivelantes, o procedimento de cura é realizado de acordo com as recomendações dos fabricantes, podendo haver divergências. Alguns fabricantes indicam cura através do umedecimento superficial e cobrimento do piso, enquanto outros sugerem a cura ao ar (RUBIN, 2015). Para Votorantim (2015), quando a temperatura ambiente for superior a 32°C e umidade relativa do ar inferior a 40%, é necessário executar a cura úmida com manta.

2.1.4 Propriedades

As argamassas possuem uma série de propriedades que apresentam maior ou menor relevância em função de seu tipo ou aplicação, sendo categorizadas, a depender do estado físico em que se apresentem, em estado fresco ou endurecido. A seguir são descritas as propriedades das

argamassas e suas influências nas características do material, tais como: trabalhabilidade, retração, aderência e resistência mecânica.

2.1.4.1 No estado fresco

Trabalhabilidade

Carasek (2010) define trabalhabilidade como a facilidade de manipulação que uma argamassa apresenta durante a sua mistura, transporte, aplicação, consolidação e acabamento. Uma argamassa é dita trabalhável quando permite que o operário a manuseie e a aplique de forma produtiva, garantindo a eficiência do material na função a que se destina. Uma vez que a trabalhabilidade pode ser entendida como um conjunto de fatores inter-relacionados, faz-se necessário o entendimento dessas outras propriedades reológicas básicas que a caracterizam (Quadro 7).

Quadro 7 - Conceitos relacionados à trabalhabilidade das argamassas

Propriedades	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas.
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
Retenção de água e de consistência	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água.
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade. Argamassas de consistência fluida apresentam maior tendência à exsudação.
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume de material.
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato.

Fonte: Carasek (2010)

Souza e Lara (2005) indicam, como as principais propriedades determinantes da trabalhabilidade de uma argamassa, a consistência e a plasticidade que, por estarem interligadas, não podem ser abordadas de forma independente ao se analisar a trabalhabilidade do material. A consistência está relacionada à capacidade da mistura de resistir ao escoamento,

a depender de sua fluidez, enquanto que a plasticidade é caracterizada pela viscosidade da argamassa (CARASEK, 2010).

Sabbatini (1998) lista a relação água/aglomerante, a relação aglomerante/areia, a granulometria da areia e a natureza e qualidade do aglomerante como fatores influenciadores da consistência de uma argamassa. Com relação à plasticidade do material, Carasek (2010) afirma que os tipos e quantidades de aglomerantes e agregados, o tempo e a intensidade da mistura e a presença de aditivos podem alterar esta propriedade.

Em relação aos aspectos práticos da trabalhabilidade, seu ajuste pode ser realizado alterando-se a plasticidade, por meio da variação do teor de cal, ou modificando-se a consistência, através da quantidade de água. Tais alterações são feitas de forma intuitiva pelos próprios operários no canteiro de obras, que desconhecem a importância e influência de cada material na composição das argamassas (SOUZA; LARA, 2005).

A propriedade de retenção de água de uma argamassa no estado fresco é relevante em situações em que o material está sujeito a solicitações que provocam perda de água, como quando aplicada sobre substratos muito porosos ou em condições de alta temperatura, baixa umidade relativa e ventos fortes (CARASEK, 2010). A capacidade de retenção de água da argamassa pode ser incrementada com o emprego de aditivos que adsorvam a água ou aditivos aeradores, ou ainda com o aumento da superfície específica dos constituintes. Devido à sua elevada superfície específica e à alta capacidade absorviva de seus cristais, a cal apresenta boas características de retenção de água (SABBATINI, 1998).

De acordo com Carasek (2010), a adesão inicial entre a argamassa e o substrato possui relação direta com a tensão superficial da pasta aglomerante, que, quando reduzida, resulta em uma “molhagem” mais eficiente do substrato, levando a um aumento da adesão. Para que tal tensão seja diminuída, pode-se adicionar cal ou aditivos incorporadores de ar e retentores de água na argamassa de cimento.

2.1.4.2 No estado endurecido

Retração

Entende-se por retração a redução do volume de determinado material, devido à perda de água. Recena (2011) associa a retração da argamassa ao movimento da água no interior da pasta ou

desta para o meio externo, cuja consequência é a fissuração. O processo de retração da pasta da argamassa inicia-se ainda em seu estado plástico, período em que há saída de água da mistura. Há uma diminuição do seu volume, correspondente ao volume de água perdido, processo este que continua até seu endurecimento.

Os mais intensos estados de fissuração são causados pelos processos de retração de grande intensidade, provenientes da movimentação da água do interior da pasta para a superfície, chamada de retração hidráulica. A circulação da água internamente e o processo de carbonatação também podem gerar variação de volume interno de menor magnitude, mas que, de forma geral, também contribui com a fissuração (RECENA, 2011).

Como a retração apresenta papel fundamental no desempenho das argamassas, principalmente no que concerne à estanqueidade e durabilidade, deve-se atentar às quantidades e características dos materiais utilizados na sua fabricação. Segundo Carasek (2010), o agregado utilizado na produção da argamassa exerce influência na retração do material, uma vez que sua distribuição granulométrica está associada ao volume de vazios que necessita ser preenchido por pasta. Dessa forma, a retração será menor em argamassas com areia de granulometria contínua.

Aderência

Sabbatini (1998) define capacidade de aderência como a resistência de aderência na interface entre a argamassa e a base de aplicação, o que torna tal propriedade intensamente dependente da interação entre esses dois materiais. Essa resistência permite que o conjunto componente-argamassa absorva tensões de cisalhamento e de tração sem que se rompa. Tais tensões podem ser provocadas por esforços ortogonais à parede, por deformações volumétricas, como retração hidráulica e dilatação térmica, entre outros.

O processo de aderência da argamassa ao substrato ocorre devido à penetração da pasta ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base. Inicialmente, ainda no estado plástico, a argamassa perde parte de sua água de amassamento ao entrar em contato com a superfície absorvente do substrato. Fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal se desenvolvem dentro dos poros, e, posteriormente, esses precipitados exercem uma ação de ancoragem entre a argamassa e a base (CARASEK, 2010).

Algumas características dos substratos, como absorção de água e rugosidade superficial, são importantes para a avaliação, principalmente, da adesão inicial e da resistência de aderência do conjunto componente-argamassa. Tais aspectos influenciam diretamente no desempenho do revestimento, pois uma boa capacidade de aderência está, em geral, atrelada à uma eficiente penetração da pasta aglomerante no substrato. Entretanto, a resistência de aderência não depende somente das características da base, mas também de outros fatores como características dos materiais constituintes da argamassa, mão de obra, processo de execução e fatores externos (PAES; GONÇALVES, 2005).

De acordo com Sabbatini (1998), deve-se quantificar a resistência de aderência do conjunto argamassa-substrato e, não, a aderência de uma argamassa isoladamente. Dessa forma, principalmente no caso de revestimentos argamassados em que a aderência é uma propriedade de grande relevância, podem ser realizadas medidas de resistência através de diversos tipos de aparelhos, sempre baseados na tensão máxima que o revestimento suporta quando submetido a um esforço normal de tração (PAES; GONÇALVES, 2005; CARASEK, 2010).

Resistência mecânica

Nakakura e Cincotto (2004) relacionam a resistência mecânica de uma argamassa à sua capacidade de resistir a esforços de tração, compressão ou cisalhamento, que podem ser provenientes de cargas estáticas ou dinâmicas atuantes nas edificações, ou ainda oriundos de efeitos das condições ambientais. No caso de argamassas produzidas somente à base de cal e areia, o desenvolvimento da resistência é lento e seu valor depende da umidade e da absorção do dióxido de carbono do ar. Já o ganho de resistência das argamassas de cimento Portland não está tão atrelado às condições do ambiente (SABBATINI, 1998).

Espera-se que as argamassas apresentem características mecânicas compatíveis com a aplicação a qual se destinam e pela forma à qual o material será solicitado. Argamassas de assentamento exigem uma maior resistência à compressão que as utilizadas em um sistema de revestimento, cuja maior solicitação é de resistência à tração ou ao cisalhamento (NAKAKURA; CINCOTTO, 2004). Em ambos os casos, a resistência não deve apresentar valores maiores que os dos blocos a serem assentados ou revestidos, objetivando evitar ou reduzir a possibilidade de surgimento de fissuras e trincas no material.

2.2 Granalha de cobre batida

2.2.1 A produção do cobre e a geração da escória

Considerado como um elemento metálico dúctil e maleável, o cobre é excelente condutor de calor e eletricidade, sendo capaz de resistir à corrosão, possuindo também propriedades antimicrobianas. Devido às suas características químicas, físicas e estéticas, o cobre é o material preferível em aplicações domésticas, industriais e de alta tecnologia. Quando combinado com outros metais, como zinco e estanho, forma ligas de latão e bronze, respectivamente (ICSG, 2015).

Evidências arqueológicas apontam que o cobre foi um dos primeiros metais utilizado pela humanidade, havendo relato de seu uso há pelo menos 10000 anos, na Ásia Ocidental. Durante o Período Calcolítico, o homem descobriu como extrair e manusear o cobre para produzir ornamentos e ferramentas. Com a descoberta de que o cobre, quando ligado ao estanho, produz bronze, deu-se início à Idade do Bronze, em 2500 a.C. Posteriormente, durante a Idade Média, obras de cobre e bronze começaram a surgir em países asiáticos, enquanto que, na América do Sul, as civilizações maia, asteca e inca exploravam cobre na região. Mesmo já sendo utilizado há milhares de anos, atualmente ainda surgem inovações relacionadas ao cobre, a exemplo de chips desenvolvidos por indústrias fabricantes de semi-condutores (ICSG, 2015).

O cobre pode ser encontrado naturalmente na crosta terrestre sob variadas formas, como em depósitos sulfurosos, depósitos de carbonato, depósitos de silicatos e, ainda, enquanto cobre puro "nativo". A produção de cobre primário é iniciada com a extração dos minérios, que pode ser feita através de mineração de superfície, subterrânea e lixiviação, sendo a mineração a céu aberto o método predominante no mundo (ICSG, 2015).

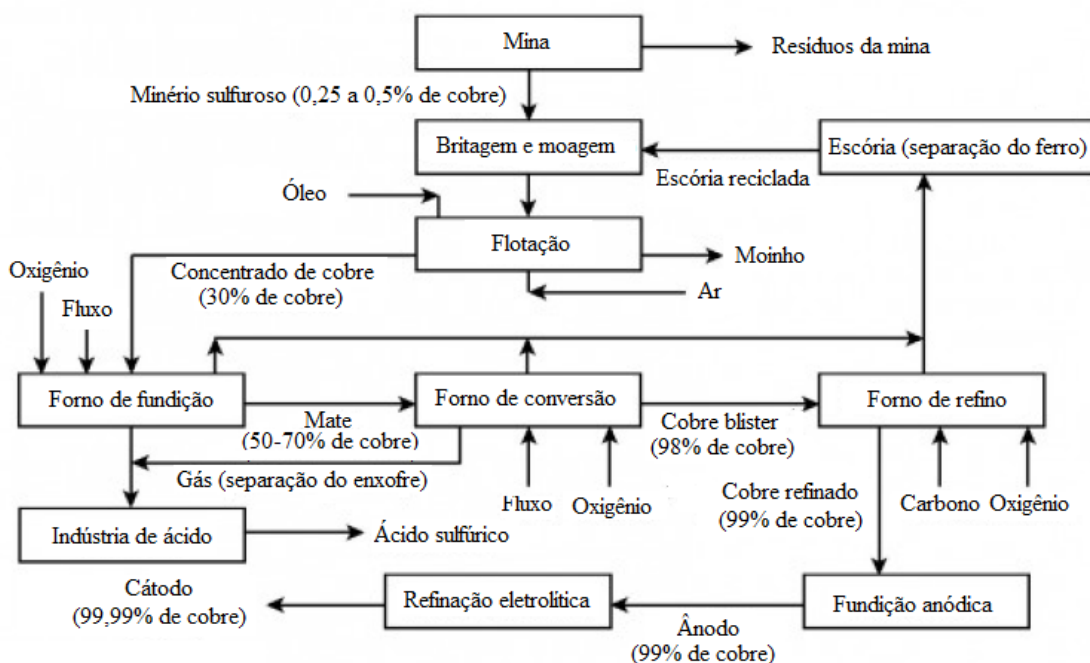
Após ser triturado e moído, o minério em pó é submetido à flotação, processo que dá origem ao minério enriquecido, contendo cerca de 25% de cobre em massa, também chamado de concentrado de cobre. A próxima etapa é a calcinação, momento em que se iniciam as reações químicas, com a conversão de minerais de cobre em cobre metálico. O produto, denominado calcina, é uma mistura de sólidos, óxidos, sulfetos e sulfatos. No calcinador, há geração de dióxido de enxofre, que, por ser perigoso, não deve ser liberado na atmosfera junto com os outros gases, sendo então transformado em ácido sulfúrico que pode ser vendido para outras indústrias ou usado no próprio processo de produção do cobre durante a extração do minério por lixiviação (COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, 2016).

A próxima etapa é a de fundição, na qual o calcinado é aquecido a uma temperatura de aproximadamente 1200°C e misturado com fundentes, tais como sílica e calcário. A reação do óxido de ferro com a sílica forma a escória, impureza que se mantém na superfície do líquido e pode ser facilmente removida (Equação 05). O líquido restante é uma mistura de sulfetos de cobre e sulfetos de ferro denominada mate (COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, 2016).



O mate é oxidado em conversores, resultando na eliminação de sulfeto de ferro com geração de escória e na formação de “cobre blister”, que possui uma pureza de 99%. Na etapa final do processo de produção do cobre, realiza-se uma refinação eletrolítica para melhorar a qualidade e elevar ainda mais a pureza do material, sendo possível produzir um cobre 99,99% puro. O diagrama de fluxo representado na Figura 12 resume as etapas do processamento do minério de cobre, desde sua extração até o produto final quase totalmente puro (COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION, 2016).

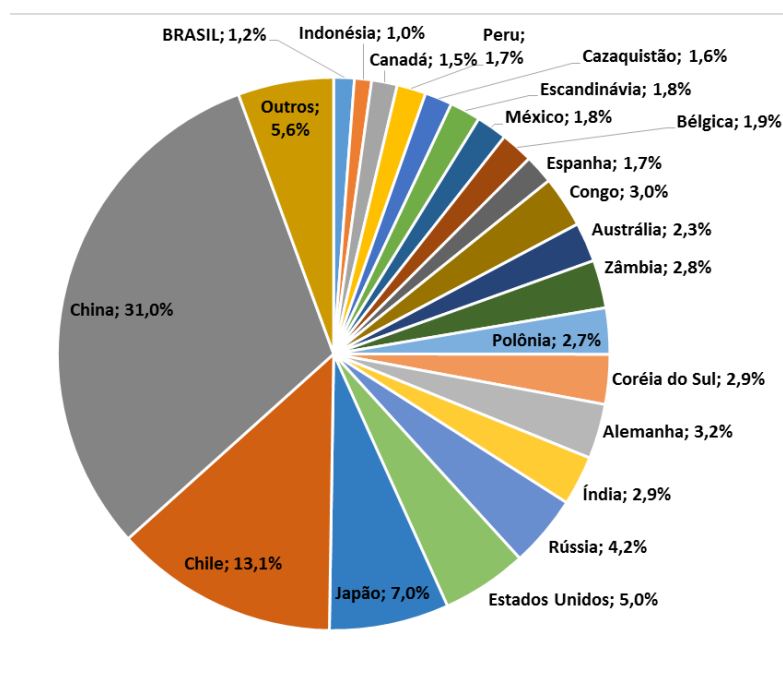
Figura 12 - Fluxograma da produção do cobre



Fonte: adaptada de Cooper Development Association (2016)

Em escala mundial, no ano de 2013, a produção de cobre refinado foi de aproximadamente 21 milhões de toneladas, com a China e o Chile concentrando juntos quase a metade desse valor. Como indicado na Figura 13, a produção de cobre refinado brasileira representa apenas 1,2% do montante total (SINDICEL; ABCobre, 2014).

Figura 13 - Distribuição mundial da produção de cobre refinado em 2013



Fonte: adaptada de SINDICEL; ABCobre (2014)

Segundo Gorai et al. (2003), a atividade de produção do cobre gera volumes significativos de resíduo, uma vez que, para cada tonelada de cobre produzido, são geradas cerca de 2,2 toneladas de escória. Assim, tendo como base os dados do anuário estatístico do SINDICEL e da ABCobre (2014), a indústria brasileira de cobre refinado, somente no ano de 2013, rendeu cerca de 574.200 toneladas de resíduo.

2.2.2 Granalha como material abrasivo

O gerenciamento do resíduo da indústria metalúrgica de cobre pode ser realizado através da reciclagem, da recuperação do metal, da transformação em produtos de valor agregado ou ainda da sua disposição em aterros específicos para este tipo de material. A simples eliminação da escória de cobre, além de causar problemas ambientais, é um desperdício, pois, devido às suas propriedades físicas e mecânicas, tal material pode ser reutilizado de variadas formas, como na

fabricação de ferramentas abrasivas e de corte, na constituição de pavimentos e concretos, na produção de vidro e telhas, e como material abrasivo no processo de jateamento (GORAI et al., 2003).

A escória de cobre, também denominada granalha de cobre, juntamente com outros tipos de escória, vem sendo largamente utilizada como material abrasivo para a preparação de superfícies metálicas em substituição à areia. Apesar de constituir um ótimo material abrasivo, as partículas da areia se quebram com o impacto do jateamento, formando um pó de sílica que, quando inalado, causam a silicose, uma doença pulmonar crônica com possibilidade de evolução para câncer de pulmão (KAMBHAM et al., 2006; PADDISON, 2000). No Brasil, conforme a NR 15 (MTE, 2015), trabalhos que utilizem areia seca ou úmida como abrasivo estão proibidos em todo o território nacional.

De cor negra e aparência vítrea, os grãos da escória de cobre têm formato angular, multifacetado, com módulo de finura de 3,5 e tamanho das partículas entre 0,075 mm e 4,75 mm (MURARI et al., 2015). A composição química típica da escória de cobre é de 30 a 40% de ferro, 35 a 40% de dióxido de silício, 0 a 10% de óxido de alumínio, 0 a 10% de óxido de cálcio e 0,5 a 2,1% de cobre, variando de acordo com o tipo de forno ou tipo de processo de tratamento utilizados na produção do cobre (GORAI et al., 2003). A presença de quantidades vestigiais de metais pesados requer ciência dos regulamentos locais que regem os limites de exposição permissíveis (HANSINK, 2000).

A dureza é uma medida relativa da resistência do material à abrasão e pode ser quantificada pela escala de Mohs, classificando os minerais com base nesse aspecto (HANSINK, 2000). A massa específica do abrasivo influencia na eficiência do processo de jateamento, uma vez que a energia transmitida pelo abrasivo à superfície depende da massa da partícula, a qual é proporcional à sua massa específica. Portanto, um tratamento superficial mais eficiente pode ser alcançado com abrasivos de alta massa específica (PADDISON, 2000). A Tabela 6 apresenta uma comparação entre a areia e a escória de cobre com relação à dureza e à massa específica destes materiais.

Tabela 6 - Dureza e massa específica da areia e da escória de cobre

Material abrasivo	Dureza Escala de Mohs	Massa específica
Areia natural	5-7	2,6 kg/dm ³
Escória de cobre	7-8	3,7 kg/dm

Fonte: adaptada de Paddison (2000)

Dentre os métodos de limpeza de superfície por ação mecânica, Gentil (2011) considera o jateamento abrasivo um dos mais eficientes, sendo capaz de remover os contaminantes e formar um perfil de ancoragem adequado para a aderência entre pintura e substrato. Para que se alcance a limpeza e a rugosidade da superfície desejadas, utiliza-se algum tipo de abrasivo impulsionado por ar, pressão, força centrífuga ou pela pressão da água (SSPC, 2011).

No processo utilizando ar comprimido, o abrasivo pode ser injetado na corrente de ar a partir de um recipiente pressurizado ou pode ser arrastado para o fluxo de ar por sucção a partir de um recipiente não pressurizado, e, através de um bico, atinge a superfície a ser limpa a altas velocidades. A limpeza por força centrífuga utiliza instalações fixas ou móveis em que o abrasivo é impulsionado por uma ou mais turbinas centrífugas que o lançam de maneira uniforme e em grande velocidade sobre o substrato. Em ambos os procedimentos, os produtos químicos contaminantes na superfície de aço geralmente não conseguem ser totalmente removidos, assim, faz-se necessário algum tratamento adicional para a completa limpeza (INTERNATIONAL STANDARD, 2001).

As normas brasileiras, N 9 (PETROBRAS, 2011) e NBR 7348 (ABNT, 2007), baseiam-se na ISO 8501-1 (INTERNARIONAL STANDARD, 2007) para classificar os seguintes graus de limpeza de superfícies de aço por meio de jateamento abrasivo a seco:

- Grau Sa 1 – jateamento abrasivo ligeiro: a carepa de laminação solta, a ferrugem e o material estranho não aderente devem ser removidos. A superfície deve ser limpa imediatamente com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa. Esse tipo de limpeza não se aplica às superfícies de aço completamente cobertas de carepa de laminação intacta e aderente;
- Grau Sa 2 – jateamento abrasivo comercial: quase toda a carepa de laminação, a ferrugem e o material estranho devem ser removidos. A superfície deve ser limpa, de imediato, com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa. A superfície deve, ao final,

apresentar coloração acinzentada. Esse tipo de limpeza também não se aplica às superfícies de aço completamente cobertas de carepa de laminação intacta e aderente;

- Grau Sa 2 ½ – jateamento abrasivo ao metal quase branco: a carepa de laminação, a ferrugem e o material estranho devem ser removidos de forma que seus vestígios apareçam somente como manchas tênues ou estrias. Após o serviço, a superfície deve ser limpa, imediatamente, com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa;
- Grau Sa 3 – jateamento abrasivo ao metal branco: a carepa de laminação, a ferrugem e o material estranho devem ser completamente removidos. A superfície deve ser limpa, imediatamente, com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa. A superfície deve apresentar, então, coloração metálica uniforme.

De acordo com a NBR 7348 (ABNT, 2007), a preparação de superfícies de aço para pintura por meio de jateamento abrasivo pode ser realizada empregando-se granalha de aço, escória de cobre, óxido de alumínio sinterizado ou outros abrasivos.

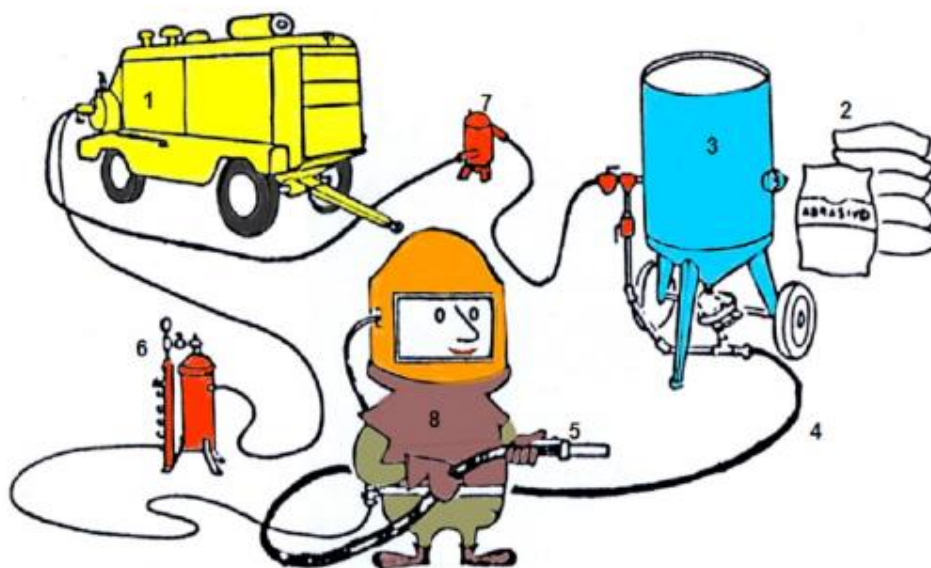
Apesar da variedade de abrasivos utilizados para jateamento, é necessário que possuam determinadas características como elevado grau de dureza, granulometria uniforme e isenção de materiais estranhos que possam contaminar a região a ser jateada (GENTIL, 2011). Além disso, como a eficiência da limpeza é resultado da transferência de energia entre abrasivo e substrato, sendo a energia cinética proporcional à massa do grão e ao quadrado de sua velocidade, é preferível a utilização de pequenos grãos movendo-se em alta velocidade, pois causam mais efeito sobre o substrato que grãos maiores e mais leves (MURARI et al., 2015).

Especificamente sobre a escória de cobre, a N 9 (PETROBRAS, 2011) define que tal abrasivo está apto para o jato quando possuir granulometria que apresente um percentual retido acumulado mínimo de 80% na peneira de malha de 0,42 mm e nenhum sinal visível de contaminação.

No entanto, a qualidade final do serviço de jateamento não depende somente do tipo e das características do abrasivo utilizado. Sob o ponto de vista operacional, distância, ângulo de ataque e tempo de permanência são as três variáveis mais importantes sob o controle do jatista que podem afetar a eficácia da limpeza por jateamento (SSPC, 2011).

De forma geral, os serviços de jateamento abrasivo a seco utilizam os equipamentos indicados na Figura 14.

Figura 14 - Esquema básico do processo de jateamento abrasivo



Fonte: Mejia Junior (2014)

- 1) Compressor de ar: elétrico ou a diesel, é o coração do sistema de jateamento;
- 2) Abrasivo: material que incidirá sobre o substrato, é o combustível do sistema de jateamento;
- 3) Máquina de jateamento: tanque onde é colocado o abrasivo sob pressão;
- 4) Mangueira de jateamento: mangueira de parede grossa, própria para a atividade de jateamento;
- 5) Bico de jateamento: fabricado de material especial para resistir à abrasão mecânica;
- 6) Filtro respirador: filtra o ar que alimenta o jatista;
- 7) Purgador: retira ou purga a água do sistema de ar;
- 8) Proteção do jatista: luvas, roupão de raspa, sapato de proteção e capacete vedado com entrada de ar.

Os equipamentos usados para o jateamento abrasivo úmido são os mesmos do tipo seco, diferenciando-se apenas na adição de água antes ou após o bico de jato ou ainda na própria máquina de jato. O jateamento com abrasivo úmido é utilizado em situações mais específicas, como em ambientes confinados, quando se faz necessário reduzir ao máximo a produção de

poeira. Nesse processo, a superfície jateada pode formar rapidamente uma película de óxidos de ferro, prejudicando a aderência da película de tinta. Assim, deve-se efetuar a pintura o mais rápido possível, ou adicionar inibidor de corrosão na água do jateamento (GENTIL, 2011).

2.2.3 Resíduo do processo abrasivo – granalha batida

A escória de cobre, resíduo resultante da produção do cobre, é utilizada como material abrasivo, passando a ser denominada granalha batida. Após ser empregada em serviços de jateamento e perder seu potencial abrasivo, a granalha torna-se novamente um rejeito, podendo ser armazenada em depósitos ou direcionada para aterros controlados (ANJOS, 2015; RESENDE, 2009).

Em alguns casos, como o descrito na pesquisa de Madany et al. (1991), o resíduo gerado no processo de limpeza de navios por jateamento causava problemas ambientais significativos, pois não havia instalações adequadas para o descarte do resíduo, nem área para sua armazenagem. Dessa forma, os autores buscaram estudar a reutilização da granalha e, ao mesmo tempo, buscar alternativas para solução do problema da escassez de agregados.

A partir da análise visual da granalha batida de cobre utilizada em sua pesquisa, Resende (2009) descreveu o resíduo como um material granular fino, de cor escura e com certo brilho. Poeiras, resíduos metálicos grossos oxidados, grumos de partículas de pó fino endurecidas e, ainda, pequenos resíduos de tinta foram detectados. A autora verificou que sua granulometria se assemelhava à da areia natural, porém com maior quantidade de partículas finas. A partir da composição granulométrica, obteve-se uma dimensão máxima característica de 1,0 mm, módulo de finura de 2,1 e percentagem de finos de 4,6%, passantes na peneira de malha de 0,063 mm.

Madany et al. (1991) e Zain et al. (2004) caracterizaram quimicamente as granalhas batidas de cobre utilizadas em suas respectivas pesquisas, conforme mostra a Tabela 7. Com relação à densidade, os primeiros autores encontraram um valor de 3,3 e, no resíduo estudado por Zain et al. (2004), a densidade variou de 3,4 a 3,6.

Tabela 7 - Composição química da granalha de cobre batida utilizadas em dois estudos

Composição química	Teor (%)	Teor (%)
	Madany et al, (1991)	Zain et al, (2004)
<i>SiO₂</i>	27,5	31,0
<i>CaO</i>	9,7	4,0
<i>Al₂O₃</i>	12,6	6,0
<i>Fe₂O₃</i>	34,5	36,0
<i>MgO</i>	8,3	-

Fonte: adaptada de Madany et al. (1991); Zain et al. (2004)

2.3 Aplicação da granalha de cobre batida em misturas cimentícias

O emprego da granalha de cobre batida em misturas cimentícias é ainda pouco abordado na literatura técnica, onde se pode encontrar somente os estudos de Madany et al. (1991), Zain et al. (2004), de Resende (2009) e de Anjos (2015).

Madany et al. (1991) estudaram a reciclagem do resíduo do jateamento com escória de cobre gerado em uma grande indústria no Bahrein. Inicialmente, os autores determinaram as características físicas e químicas da amostra de granalha batida e, objetivando analisar o efeito do resíduo na resistência à compressão, foram produzidas misturas de argamassa e de concreto, assim como blocos de concreto pré-moldado.

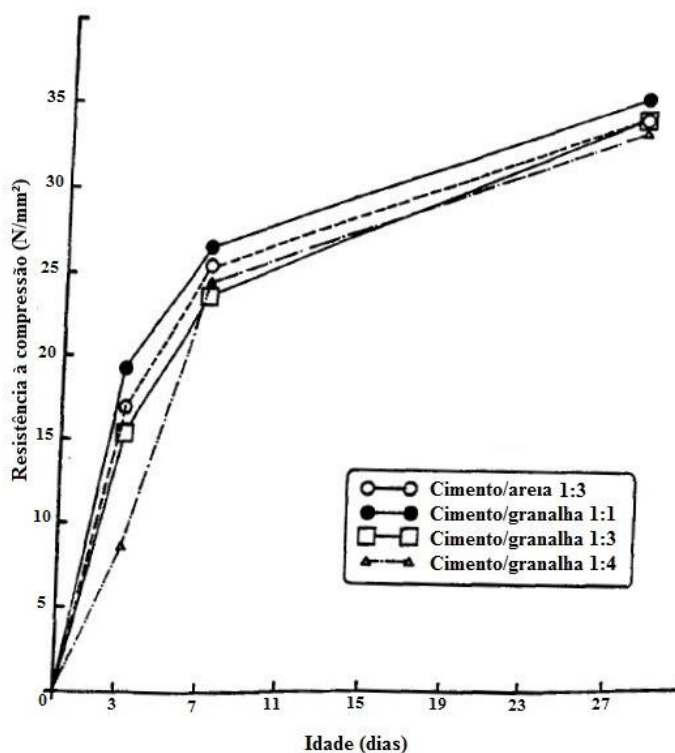
A partir da análise granulométrica, percebeu-se que a areia natural é mais fina que a granalha batida, embora o resíduo tenha mais material passante na peneira de 0,075 mm. Como esperado, a granalha apresentou massa específica superior à do agregado convencional, uma vez que se constatou a presença de metais pesados no resíduo, tais como chumbo, zinco, ferro e óxido de alumínio (MADANY et al., 1991).

Ao realizar a caracterização química da granalha de cobre batida utilizada no estudo, Madany et al. (1991) perceberam que o óxido de ferro e os óxidos de silício e de alumínio são os compostos com concentração mais elevada, com 345, 274, e 126 g/kg, respectivamente. O nível de sulfato encontrado foi inferior a 1 g/kg, não atingindo o limite determinado pela legislação do Bahrein, mas, por outro lado, a concentração de cloretos mostrou-se superior à máxima permitida. Como os íons cloretos são responsáveis pela corrosão das armaduras no concreto, sugere-se uma lavagem prévia da granalha batida com água doce, sendo esta prática aplicada a todas as areias usadas na produção de concreto no país.

Foram produzidos corpos de prova de argamassa com três traços usuais da região: 1:1, 1:3 e 1:4 (cimento : agregado) e relação água/cimento constante em 0,5 para todas as misturas. Após a desmoldagem, as amostras foram imersas em água para a cura por três, sete e 28 dias, sendo posteriormente ensaiadas quanto à compressão nessas idades (MADANY et al., 1991).

Os resultados dos ensaios mostraram que a resistência à compressão das argamassas aumentava proporcionalmente ao tempo de cura, o que ocorre em todos os tipos de mistura (Figura 15). Além disso, Madany et al. (1991) notaram que a resistência à compressão diminuía à medida que a proporção em peso de granalha de cobre aumentava, de 1:1 para a 1:4. Esta diferença é mais pronunciada nos três primeiros dias, e em menor amplitude num tempo de cura mais longo, aos 28 dias. Ao comparar o desempenho mecânico das argamassas produzidas com areia natural e granalha batida, de traço 1:3, notou-se que, aos 28 dias, ambas atingiram uma resistência de 34 N/mm².

Figura 15 - Resultados da resistência à compressão das argamassas



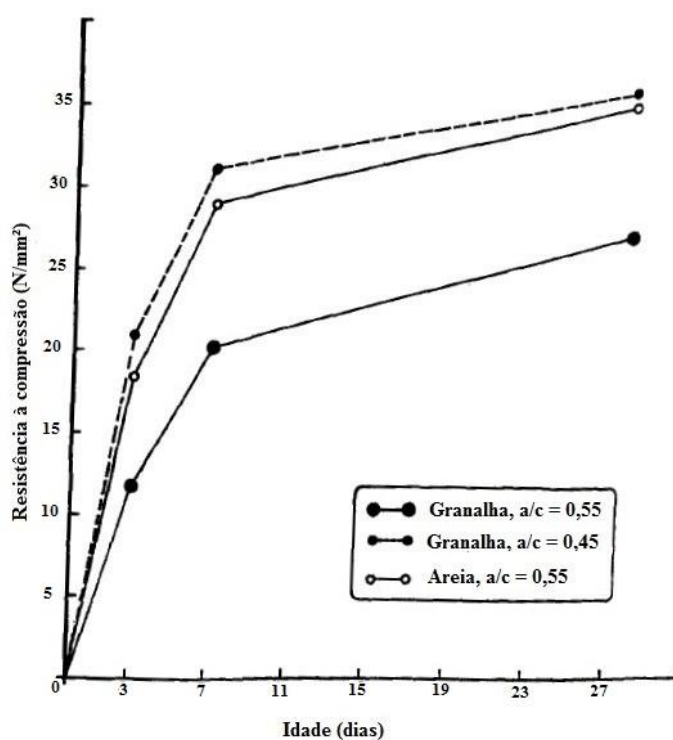
Fonte: adaptada de Madany et al. (1991)

A fim de investigar os efeitos da granalha de cobre batida na resistência à compressão de misturas de concreto, Madany et al. (1991) produziram corpos de prova na proporção em

massa de 1:1,7:3,3 (cimento : agregado miúdo : agregado graúdo) e relação água/cimento variando em 0,55 e 0,45, para as misturas com gralha batida. A cura e o procedimento de ensaio foram semelhantes aos utilizados previamente com as argamassas.

Como indicado na Figura 16, o desenvolvimento da resistência à compressão dos corpos de prova de concreto foi análogo ao das argamassas. Nas amostras produzidas com relação água/cimento de 0,55, percebeu-se que, em todas as idades, as que possuíam areia natural em sua composição apresentaram melhor desempenho mecânico que as com gralha de cobre (MADANY et al., 1991).

Figura 16 - Resultados da resistência à compressão dos concretos



Fonte: adaptada de Madany et al. (1991)

Para os blocos de concreto pré-fabricados, Madany et al. (1991) definiram a proporção de 1:3,75:3,75 (cimento : agregado graúdo : gralha batida) em peso e relação água/cimento de 0,55, valores normalmente utilizados por uma fábrica de blocos da região.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos blocos de concreto produzidos indicaram um valor médio de 12,3 N/mm², com menor e maior valores individuais

de 8,7 e 16,8 N/mm², respectivamente. Estes resultados estão em conformidade com os requisitos do Bahrain para resistência de blocos de concreto (MADANY et al., 1991).

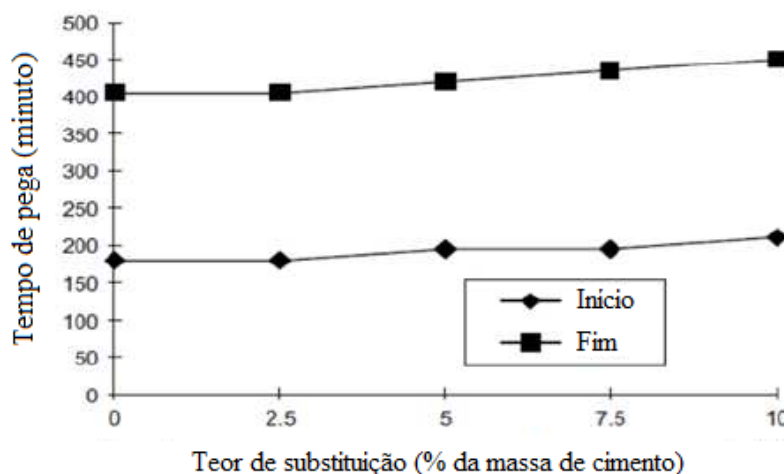
Madany et al. (1991) concluíram, a partir de seus estudos, que a granalha de cobre batida pode ser utilizada como substituta da areia natural em argamassas de assentamento de alvenaria de bloco de concreto, para o traço de 1:3. Em relação às estruturas de concreto armado, verificou-se a impossibilidade do emprego do resíduo, porém pode ser usado numa variedade de aplicações não estruturais. Para a proporção de materiais apresentada no referido estudo, o uso do resíduo de jateamento em blocos pré-fabricado de concreto foi considerado vantajoso.

Zain et al. (2004), por sua vez, investigaram o processo de solidificação/estabilização de argamassas com granalha de cobre batida em sua composição, checando a segurança dessa forma de disposição do resíduo. Corpos de prova de argamassa foram moldados realizando uma substituição do cimento pelo referido resíduo, em teores variando de 0% a 10%. A granalha batida utilizada na pesquisa foi peneirada em peneira de abertura de 2,36 mm e o material passante foi moído até que 20% da massa fosse retida na malha de 45 µm, enquadrando-se, assim, nas especificações das normas americanas ASTM C618-92a e ASTM C989-89.

Ensaio de consistência da mistura fresca foram realizados com o intuito de avaliar a diferença na quantidade de água necessária para a granalha de cobre batida incorporar a pasta, atingindo a mesma consistência da pasta de referência. A água requerida pela pasta com substituição de 10 %, em volume foi de cerca de 97 % do que é exigido pela pasta de controle, resultado atribuído possivelmente ao fato de que a pasta com resíduo de cobre não absorver água (ZAIN et al., 2004).

Com o objetivo de mensurar possíveis retardos na hidratação do aglomerante, verificou-se os tempos de pega conforme o teor de resíduo. A Figura 17 indica que houve um aumento diretamente proporcional entre os tempos de pega e o incremento do teor da granalha de cobre batida, que Zain et al. (2004) acreditam ser causado pela presença de cobre, chumbo e zinco na composição do resíduo.

Figura 17 - Tempos de pega das argamassas com gralha de cobre batida

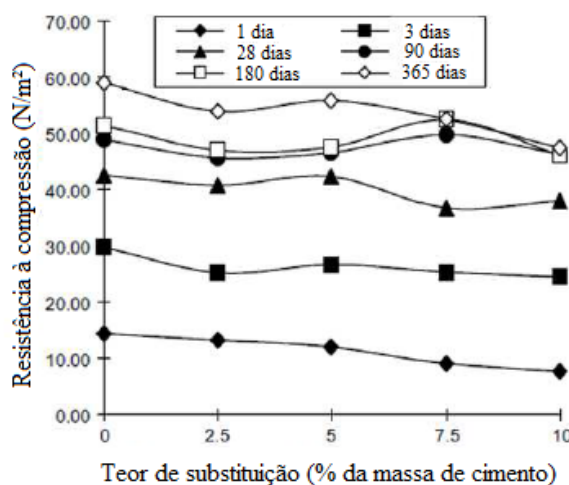


Fonte: adaptada de Zain et al. (2004)

Além da consistência e dos tempos de pega, Zain et al. (2004) também verificaram as argamassas quanto à lixiviação de metais pesados, sob a forma de blocos inteiros e fraturados. Os pesquisadores utilizaram ácido acético para simular a severidade do ambiente de um aterro regular durante muitos anos, prevendo o total de metal lixiviado nesse período de tempo. Os resultados dos ensaios indicaram que, tanto nos blocos inteiros, quanto nos fraturados, a lixiviação dos elementos químicos cobre, níquel e chumbo não foi detectada em nenhuma amostra. No caso do zinco, houve um aumento de sua concentração com a idade e com o teor de substituição, porém, mesmo com 10% de substituição, não se atingiu o limite de concentração determinado pela legislação malaia, que é de 1,0 mg/l, apresentando como maior concentração 0,803 mg/l (ZAIN et al., 2004).

Como mais uma forma de testar a viabilidade da solidificação/estabilização de argamassas com gralha de cobre batida como material de construção, as amostras foram submetidas a ensaios de resistência à compressão. Os resultados mostraram que, à medida que se aumentava o teor de substituição do cimento pelo resíduo, havia uma redução do valor da resistência à compressão, sempre inferiores ao da argamassa de referência, fabricada somente com cimento (Figura 18). Tal comportamento deve-se não só à presença de metais pesados no resíduo, mas também pela sua alta finura, uma vez que materiais mais finos possuem alta superfície específica, sendo necessária uma maior quantidade de aglomerante para envolvê-los (ZAIN et al., 2004).

Figura 18 - Resistência à compressão das argamassas em função dos teores de substituição



Fonte: adaptada de Zain et al. (2004)

De forma geral, Zain et al. (2004) concluíram que a substituição do cimento pela granalha de cobre batida acarretou em um aumento nos tempos de início e final de pega, que a resistência da argamassa de escória foi geralmente inferior que a argamassa de referência e que o teor ótimo de substituição de cimento pela granalha de cobre batida foi considerado entre 5% e 7,5%.

A pesquisa desenvolvida por Resende (2009) teve como objetivo estudar a viabilidade de incorporação de granalha de cobre como agregado miúdo em produtos de construção de matriz cimentícia, a partir de um programa experimental com argamassas produzidas com o referido resíduo substituindo parcialmente a areia natural. Para tal, as propriedades físicas do resíduo, da areia natural normalizada e da areia natural comum foram avaliadas, bem como a composição química da granalha.

Foram produzidas nove séries de argamassas, com variação das características da granalha de cobre, do tipo de areia natural ou do tipo de cimento usado. Para cada uma das séries, foram moldados corpos de prova com percentagens de substituição da areia natural pelo resíduo em 25%, 50% e 75%, além das argamassas de referência, com 100% de areia natural. Em relação ao material de estudo, a empresa fornecedora disponibilizou duas cargas de granalha de cobre em momentos temporais distintos e uma carga de granalha de cobre antes de ser usada

nos processos de jateamento, a qual se denominou de escória de cobre original (RESENDE, 2009).

Com base na composição granulométrica, na massa específica e na capacidade de absorção de água, Resende (2009) notou que, limitando-se o percentual de material fino em 3%, como prescreve a norma portuguesa, o resíduo estudado possuía características físicas adequadas ao emprego como agregado miúdo. Comparando a granalha batida com a areia natural, suas granulometrias e sua capacidade de absorção de água são similares, enquanto que a massa específica real do resíduo é de 3850 kg/m^3 , bastante superior à da areia natural, que é de 2600 kg/m^3 (RESENDE, 2009).

Resende (2009) realizou ensaios para avaliar a resistência à compressão e à flexão de argamassas produzidas com diferentes percentagens de substituição da areia natural por granalha batida, comparando os resultados com aqueles obtidos nas argamassas de referência. O efeito do resíduo na densidade do produto cimentício, bem como sua influência nos tempos de início e final de pega da mistura também foram quantificados.

Os resultados dos ensaios demonstravam um decréscimo da resistência à compressão e à flexão à medida que se aumenta a percentagem de substituição da areia pelo resíduo, mesmo com indícios de que as características físicas da granalha batida trariam ganhos nos parâmetros mecânicos das misturas. Tal comportamento é atribuído à composição química da granalha, que, após ser utilizada como abrasivo, incorpora resíduos de tinta e óxidos de ferro em quantidade indeterminada e bastante variável (RESENDE, 2009).

Em seu estudo, Resende (2009) constatou que a massa específica das argamassas teve seu valor aumentado à medida que se elevou os teores de substituição parcial da areia pela granalha de cobre, chegando a um máximo de 400 kg/m^3 , para o teor de 75%. Percebeu-se uma relação entre a densidade das argamassas e seu comportamento mecânico, pois, à medida que se aumentava o teor de substituição, maior era a massa específica e menor era o decréscimo da resistência comparadas às argamassas de referência.

Ensaio de laboratório indicaram que os tempos de início e final de pega são influenciados pela substituição da areia natural pelo resíduo, em todas as séries produzidas. Verificou-se que o início da pega pode ser retardado em até cinco horas, enquanto que o tempo para o fim da pega pode ultrapassar em até oito horas o tempo da argamassa de referência. A

presença de óxido de zinco em até 8% explica os retardos nos tempos de pega das argamassas, bem como os decréscimos de resistência mecânica (RESENDE, 2009).

Resende (2009) concluiu que, apesar de causar redução da resistência e aumento dos tempos de pega, a granalha batida utilizada possui características adequadas ao seu emprego como agregado miúdo, substituindo a areia natural. A taxa de substituição de 25% foi considerada ótima, na qual as argamassas apresentaram comportamento mecânico satisfatório, viabilizando a incorporação do resíduo.

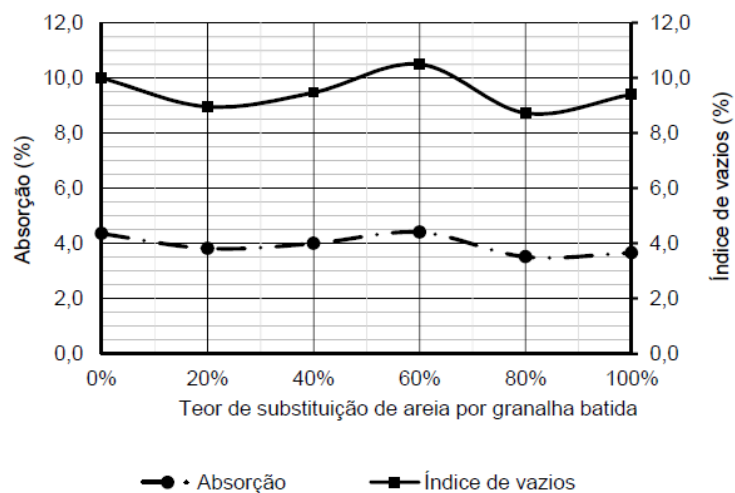
Anjos (2015) verificou, em sua pesquisa, a viabilidade de reaproveitamento da granalha de cobre batida como material constituinte do concreto de cimento Portland, seja como agregado miúdo ou como adição ativa. Inicialmente, o resíduo foi testado quanto à sua toxicidade, submetendo-o a um processo de lixiviação, além da caracterização da atividade pozolânica com o cimento Portland.

Após constatar que a granalha de cobre batida não era um material tóxico e que não poderia ser utilizada na forma de adição ativa em substituição parcial ao aglomerante, foram feitas as caracterizações física, química e micro estrutural.

Em seguida, foram produzidas misturas de concreto com teores de substituição do agregado miúdo de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. O autor pôde analisar o efeito do resíduo sobre o concreto nos estados fresco e endurecido, através de medidas da trabalhabilidade; de ensaios de resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral e de módulo de elasticidade; de medida de índices físicos e da avaliação da durabilidade (ANJOS, 2015).

A partir dos resultados dos ensaios de medida de trabalhabilidade, Anjos (2015) inferiu que, à medida que se aumentou o teor de substituição do agregado miúdo por granalha de cobre batida, houve uma melhoria significativa desta propriedade. Com relação aos parâmetros de porosidade dos concretos produzidos, os ensaios físicos indicaram, conforme a Figura 19, que houve decréscimos da absorção e do índice de vazios em relação à mistura de referência na maioria dos casos, sendo o teor de 80% o que apresentou os menores valores.

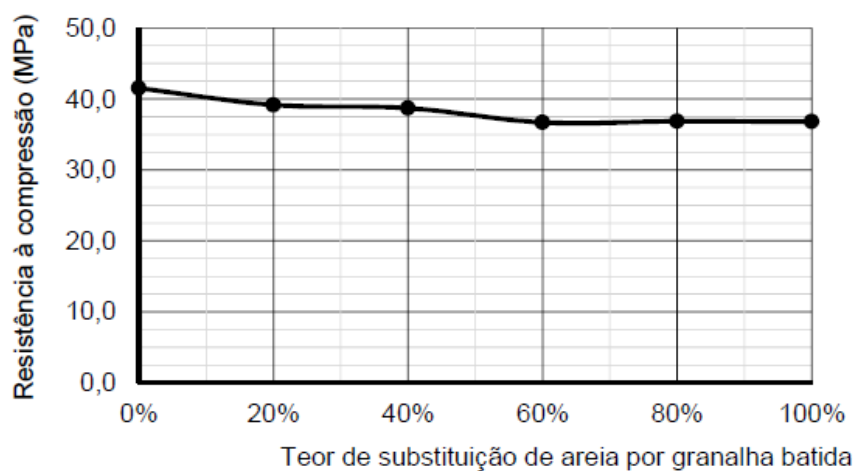
Figura 19 - Parâmetros de porosidade dos concretos



Fonte: Anjos (2015)

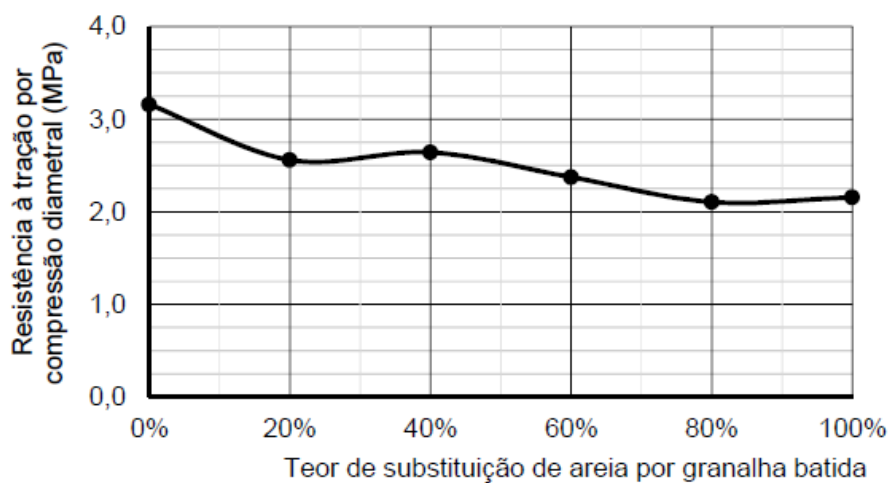
Os parâmetros de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral apresentaram uma redução com o acréscimo do teor de resíduo. A partir de 40% de substituição, houve maiores reduções da resistência à compressão (Figura 20), enquanto que sob tração por compressão diametral, o concreto com 80% de substituição apresentou a maior diminuição (Figura 21) (ANJOS, 2015).

Figura 20 - Resistência à compressão por compressão axial dos concretos em função do teor de granalha batida



Fonte: Anjos (2015)

Figura 21 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos em função do teor de gralha batida



Fonte: Anjos, 2015

A partir de sua pesquisa, Anjos (2015) concluiu que a gralha de cobre batida estudada é um material atóxico, não possui atividade pozolânica e, quando substituta do agregado miúdo, traz perdas no comportamento mecânico do concreto, porém esse fato não inviabiliza tecnicamente sua utilização em misturas cimentícias.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição e caracterização dos materiais utilizados

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado para a produção das argamassas foi do tipo CPV ARI, da marca MIZU. Com o objetivo de caracterizar tal cimento, Anjos (2015) determinou seu módulo de finura por peneiramento de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2013a), obtendo-se um valor de 0,62%. Também foi realizada, pelo referido autor, a medição do tempo de início de pega, segundo a NBR NM 65 (ABNT, 2003a), resultando em uma hora e 50 minutos.

No âmbito deste trabalho, a massa específica real do cimento foi determinada em 3,03 g/cm³, por meio do ensaio preconizado pela NBR NM 23 (ABNT, 2001). Para a transformação do traço em volume para traço em massa a ser usado para quantificar os materiais no laboratório, adotou-se o procedimento de encher com cimento, sem adensar, um recipiente com volume conhecido e determinar a massa do material ali contido. A relação entre a massa e o volume resultou na massa unitária de 0,95 g/cm³.

3.1.2 Cal hidratada

A cal hidratada utilizada na produção das argamassas foi do tipo CH-I, da marca TREVO. A massa específica real deste aglomerante aéreo foi determinada através do ensaio segundo a norma NBR NM 23 (ABNT, 2001), resultando no valor de 2,25 g/cm³. Para a determinação da massa unitária da cal hidratada, com vistas à transformação do traço em volume para traço em massa, adotou-se o mesmo procedimento utilizado com o cimento, resultando em uma massa unitária de 0,53 g/cm³.

3.1.3 Agregados convencionais

3.1.3.1 Areia para argamassa de assentamento

O agregado convencional utilizado para a produção das argamassas de assentamento foi areia de cava de granulometria compatível com a denominação de areia fina, segundo à antiga norma NBR 7211 (ABNT, 1983), que é a denominação usada tradicionalmente no mercado local. Foram realizados ensaios de caracterização do agregado, obtendo, assim, a massa específica

real, correspondente a $2,65 \text{ g/cm}^3$, de acordo com a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009a); a massa unitária de $1,73 \text{ g/cm}^3$, segundo a norma NM 45 (ABNT, 2006) e a composição granulométrica do material, segundo a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003b), que resultou em um diâmetro máximo de 4,8 mm e um módulo de finura de 2,24.

3.1.3.2 Areia para contrapiso autonivelante

O agregado convencional utilizado para a produção das argamassas para contrapiso autonivelante foi uma areia que seria classificada como média pela antiga norma NBR 7211 (ABNT, 1983). Para a caracterização física do agregado, a massa específica real foi obtida de acordo com a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009a), resultando em $2,65 \text{ g/cm}^3$, a massa unitária determinada segundo a norma NM 45 (ABNT, 2006), foi de $1,48 \text{ g/cm}^3$. A composição granulométrica do material, segundo a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003b), resultou em um diâmetro máximo de 2,4 mm e um módulo de finura de 2,61.

3.1.4 Granalha de cobre batida

O resíduo gerado no processo de fabricação do cobre tem sido utilizado como abrasivo em serviços de jateamento na preparação de superfícies de aço para aplicação de nova pintura, e, após o jateamento, torna-se novamente um resíduo, denominado granalha de cobre batida. Para o presente estudo, utilizou-se este rejeito, que foi o mesmo material empregado por Anjos (2015).

A granalha batida foi coletada em um canteiro de obras em que se realizavam processos de manutenção geral de um tanque de armazenamento de petróleo (Figura 22(a-b)), consistindo em serviços de caldeiraria (corte, solda e esmerilhamento), tratamento e pintura de chapas de aço, bem como a intervenção em equipamentos periféricos. Durante o jateamento, a escória foi lançada contra os substratos metálicos, a fim de remover a velha camada de tinta, além de conferir uma rugosidade adequada para aplicação da nova pintura (ANJOS, 2015).

Figura 22 - Tanque em manutenção

(a) Face externa

(b) Face interna

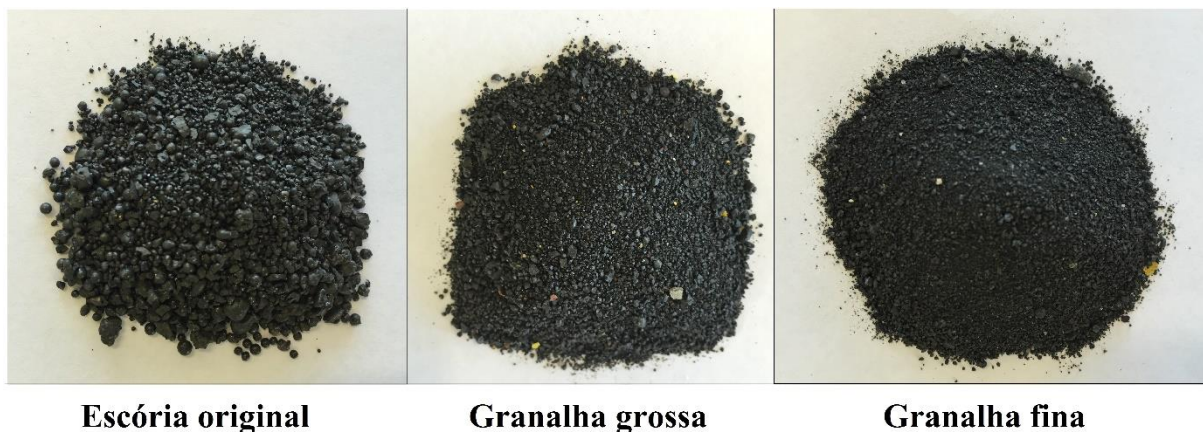


Fonte: Anjos (2015)

Após perder sua capacidade abrasiva, a granalha foi coletada. A granalha utilizada para a limpeza do interior do tanque certamente estaria contaminada com hidrocarbonetos, podendo trazer alterações nas propriedades das misturas cimentícias. Essa escória, utilizada como granalha, após certo número de aplicações, é descartada. Essa sucessão de jateamentos faz com que haja redução da granulometria desse material, levando a uma menor capacidade abrasiva. Nesse momento, o material passa a ser denominado de “granalha batida”. Foi estimado que, durante o serviço de manutenção, foram produzidas cerca de 31,6 t de granalha de cobre batida (ANJOS, 2015).

A Figura 23 apresenta a escória original, anterior ao processo de jateamento, a granalha batida que foi jateada em menor número de vezes (granalha grossa) e a granalha batida jateada em maior número de vezes (granalha fina).

Figura 23 - Aspecto da escória original e dos dois tipos de granalha batida



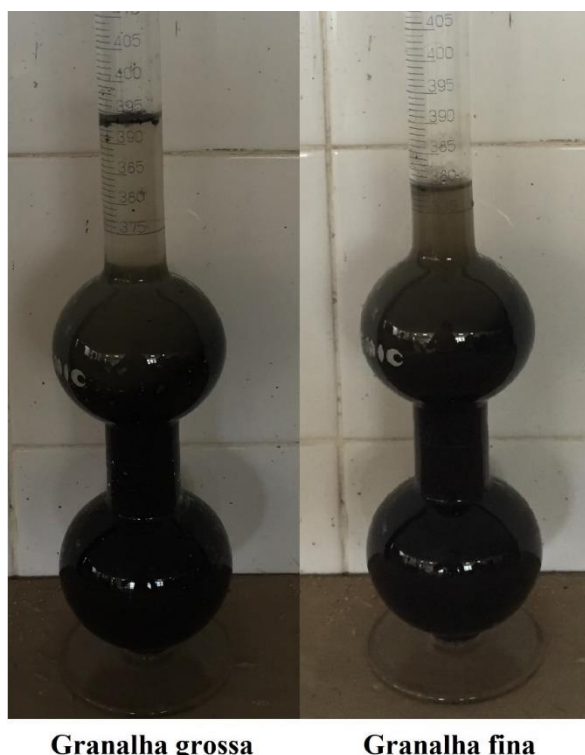
Fonte: imagem registrada pela autora

No âmbito deste trabalho, foram realizadas as caracterizações físicas dos materiais usados como agregado miúdo, obtendo-se as massas específicas reais dos dois tipos de granalha batida, bem como seus índices granulométricos, ou seja, os valores dos diâmetros máximos e dos módulos de finura.

Caracterização física das granalhas batidas (grossa e fina)

Para os dois tipos de granalha batida, determinaram-se as massas específicas reais (Figura 24), resultando em $3,60 \text{ g/cm}^3$ para a granalha grossa e $3,81 \text{ g/cm}^3$ para a fina.

Figura 24 - Determinação das massas específicas reais dos dois tipos de granalha batida



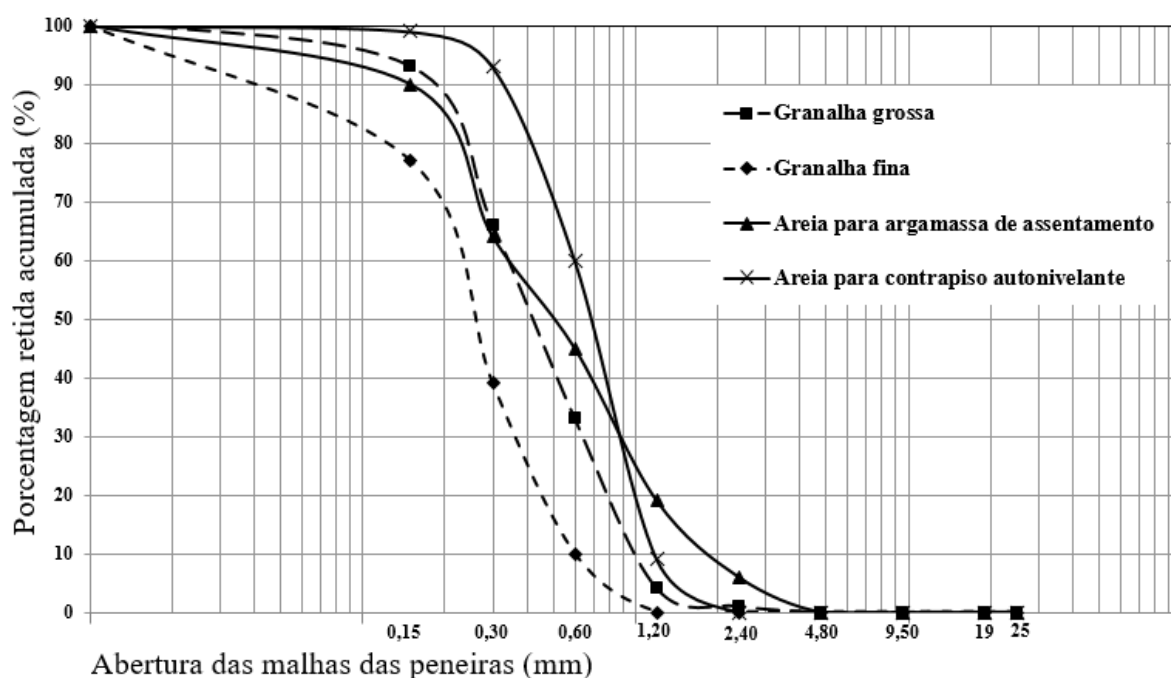
Granalha grossa

Granalha fina

Fonte: imagem registrada pela autora

As composições granulométricas dos dois tipos de granalha de cobre batida foram determinadas segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003b), com a grossa apresentando um diâmetro máximo de 1,2 mm e módulo de finura de 1,97, enquanto a fina obteve um diâmetro máximo também de 1,2 mm e módulo de finura de 1,26. As curvas granulométricas dos tipos de granalha batida e da areia convencional estão mostradas na Figura 25.

Figura 25 - Curvas granulométricas dos agregados convencionais e da granalha batida grossa e fina



Fonte: elaborada pela autora

Caracterização química das granalhas batidas (grossa e fina)

A fim de caracterizar quimicamente a granalha de cobre original e os dois tipos de granalha de cobre batida, tais materiais foram submetidos à uma análise através da fluorescência de raios X (FRX), resultando na composição em óxidos mostrada na Tabela 8. A caracterização química foi realizada no Laboratório de Fluorescência de Raios X – Condomínio de Laboratórios Multiusuários das Geociências (CLGeo) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Sergipe.

Tabela 8 - Composição das granalhas em termos de óxidos

Óxidos	Teor (%)		
	Granalha de cobre	Granalha batida de cobre grossa	Granalha batida de cobre fina
Fe_2O_3	20,84	58,61	62,58
SiO_2	60,32	26,07	23,30
Al_2O_3	5,78	4,56	3,26
MgO	2,07	2,27	1,45
CaO	4,83	2,21	1,06
CuO	4,65	1,29	3,52
SO_3	-	1,22	1,05
ZnO	1,51	1,20	1,80
K_2O	-	0,83	0,61
MoO_3	-	0,57	0,22
TiO_2	-	0,47	0,36
PbO	-	0,10	0,09
Cr_2O_3	-	0,07	0,08

Fonte: elaborada pela autora

De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2015), para a classe E de material pozolânico, na qual seria enquadrado o resíduo estudado, o somatório de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deveria alcançar um percentual mínimo de 50%. A amostra de granalha batida grossa analisada apresentou um índice de 89,24% e a fina um índice de 89,14%, satisfazendo então essa condição.

A granalha de cobre original, assim como ambos os tipos de granalha batida, atendeu ao índice mínimo de 50% previsto pela norma NBR 12653 (ABNT, 2015) para o somatório de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , no entanto, ao confrontar as duas composições, percebe-se que o processo de jateamento imprimiu no abrasivo um incremento de 181% no teor de óxidos de ferro para a granalha grossa e de 200% para a granalha fina, e grandes reduções no teor de sílica tanto na granalha batida grossa quanto na fina.

Tal mudança de composição indica que houve interação da granalha com as superfícies submetidas às intempéries e com os produtos de corrosão, contaminando o material. Assim, como a atividade pozolânica está relacionada principalmente com o teor da sílica amorfa e da alumina e percebendo-se o acentuado aumento do composto Fe_2O_3 em detrimento dos demais, acredita-se que a pozolanicidade do material pode ter sido prejudicada.

Caracterização da atividade pozolânica com cimento Portland

Anjos (2015) determinou a atividade pozolânica da fração fina da granalha batida, seguindo a norma NBR 5752 (ABNT, 2014). O índice de atividade pozolânica com cimento Portland encontrado foi de 57,5%. Para esse tipo de escória, a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) determina que tal índice deve ser no mínimo de 75%. Conclui-se que esse material não pode ser utilizado como adição ativa em substituição parcial ao aglomerante.

3.1.5 Aditivo plastificante

O aditivo utilizado na produção da argamassa autonivelante foi o MIRA CR 74 do tipo redutor de água da marca *Grace Construction*.

3.1.6 Granalha de cobre batida como adição inerte

Para a produção da argamassa autonivelante, a granalha batida fina foi submetida ao processo de peneiramento para a obtenção da sua fração fina, ou seja, o material passante na peneira com abertura de 75 μm , que foi utilizado como adição inerte na composição da argamassa de contrapiso.

A massa específica real da adição inerte foi determinada em 3,79 g/cm³, por meio do ensaio preconizado pela NBR NM 23 (ABNT, 2001) (Figura 26).

Figura 26 - Determinação da massa específica real da adição inerte



Fonte: imagem registrada pela autora

3.2 Produção das argamassas de assentamento

Foram produzidas duas séries de corpos de prova de argamassas, variando os tipos de granalha de cobre batida e as percentagens de substituição do agregado convencional pelo resíduo, bem como uma argamassa de referência, com 100% de agregado convencional. As nomenclaturas dessas argamassas são dadas na Tabela 9. O traço em volume foi de 1:1:6 (cimento : cal : agregado miúdo), de forma a manter o traço genérico de 1:3 (aglomerante : agregado), proporção tradicionalmente utilizada nas obras para assentamento de alvenaria. As Figuras 27 e 28 mostram corpos de prova de cada mistura.

Tabela 9 - Nomenclatura e composição das argamassas

Nomenclatura	Tipo de escória	Teor de granalha de cobre batida (%)
Referência	-	0
AGG025	Grossa	25
AGG050	Grossa	50
AGG075	Grossa	75
AGG100	Grossa	100
AGF025	Fina	25
AGF050	Fina	50
AGF075	Fina	75
AGF100	Fina	100

Fonte: elaborada pela autora

Figura 27 - Aspecto das argamassas de referência e da série com granalha batida grossa

Referência AGG025 AGG050 AGG075 AGG100

Fonte: imagem registrada pela autora

Figura 28 - Aspecto das argamassas de referência e da série com granalha batida fina



Referência AGF025 AGF050 AGF075 AGF100

Fonte: imagem registrada pela autora

Foram produzidos 19 corpos de prova cilíndricos, com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, utilizados nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por fervura e por capilaridade. Foram também produzidos corpos de prova para medida da aderência das argamassas a blocos cerâmicos, com as argamassas dos tipos AGG050 e AGF050, sendo feitos dois ou três ensaios de arrancamento para cada bloco revestido. O plano de amostragem para os ensaios está mostrado na Tabela 10.

Todas as séries de argamassas foram preparadas com o mesmo procedimento, utilizando-se um misturador mecânico, sendo, inicialmente, a água misturada com o cimento e a cal, durante um minuto, depois, com o misturador em funcionamento, a areia e a granalha foram adicionadas e misturadas ao longo de dois minutos.

A relação água/aglomerantes foi determinada a partir da medida de consistência de cada mistura, obtida através do ensaio de espalhamento em mesa cadente, de acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Para este trabalho, foi fixado, para todas as argamassas, um valor de espalhamento de 270 ± 20 mm.

Tabela 10 - Plano de amostragem das argamassas de assentamento produzidas

Ensaio	Quantidade de corpos de prova	Norma
Compressão axial	6	13279 (ABNT, 2005a)
Módulo de elasticidade	2	8522 (ABNT, 2008a)
Tração por compressão diametral	6	7222 (ABNT, 2011a)
Absorção de água, índice de vazios e massa específica	2	9778 (ABNT, 2009b)
Capilaridade	3	9779 (ABNT, 2012)
Aderência por arrancamento	6	15258 (ABNT, 2005c)

Fonte: elaborada pela autora

3.3 Ensaios com argamassas de assentamento

3.3.1 Ensaios físicos relacionados à porosidade

Foram realizados ensaios de determinação das propriedades físicas relacionadas à porosidade, como absorção de água, massas específicas e índice de vazios, utilizando-se dois corpos de prova para cada amostra com diferentes teores de substituição, de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2009b). Os corpos de prova foram secos em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$, por três dias, e tiveram suas massas determinadas. Em seguida, foram imersos em água, também por três dias, e, após esse prazo, foram submetidos a processo de fervura (Figura 29) por cinco horas, sendo ao final, determinadas as massas imersas em água, em balança hidrostática. Foram também determinadas as massas saturadas, após secagem superficial dos corpos de prova, com pano seco. As seguintes propriedades tiveram seus resultados obtidos a partir das Equações 06, 07, 08, 09 e 10.

Absorção de água, dada pela Equação 06:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (6)$$

Índice de vazios, dado pela Equação 07:

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (7)$$

Massa específica da amostra seca, dada pela Equação 08:

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (8)$$

Massa específica da amostra saturada, dada pela Equação 09:

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (9)$$

Massa específica real, dada pela Equação 10:

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (10)$$

Onde:

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s é a massa da amostra seca em estufa;

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

Figura 29 - Ensaio de fervura dos corpos de prova



Fonte: imagem registrada pela autora

3.3.2 Ensaio de absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por ascensão capilar das argamassas produzidas foi realizada seguindo a norma NBR 9779 (ABNT, 2012). Os corpos de prova foram secos em

estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até constância de massa, sendo posteriormente resfriados em dessecador, para determinação das suas massas secas. Em seguida, foram imersos parcialmente em água, de modo que o nível do líquido permanecesse constante a 5 ± 1 mm acima da face inferior dos corpos de prova (Figura 30). Foram determinadas as massas saturadas após três horas, seis horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas, contadas a partir da imersão parcial. A absorção de água por capilaridade foi calculada de acordo com a Equação 11.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (11)$$

Onde:

C é a absorção de água por capilaridade, expressa em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2);

m_{sat} é a massa saturada do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, expressa em gramas (g);

m_s é a massa saturada do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, expressa em gramas (g);

S é a área da seção transversal, expressa em centímetros quadrados (cm^2).

Figura 30 - Corpos de prova parcialmente imersos em água no ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: imagem registrada pela autora

Após as medições das massas nos tempos determinados pela norma, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, a fim de possibilitar a anotação da distribuição da água em seu interior.

3.3.3 Ensaio mecânicos

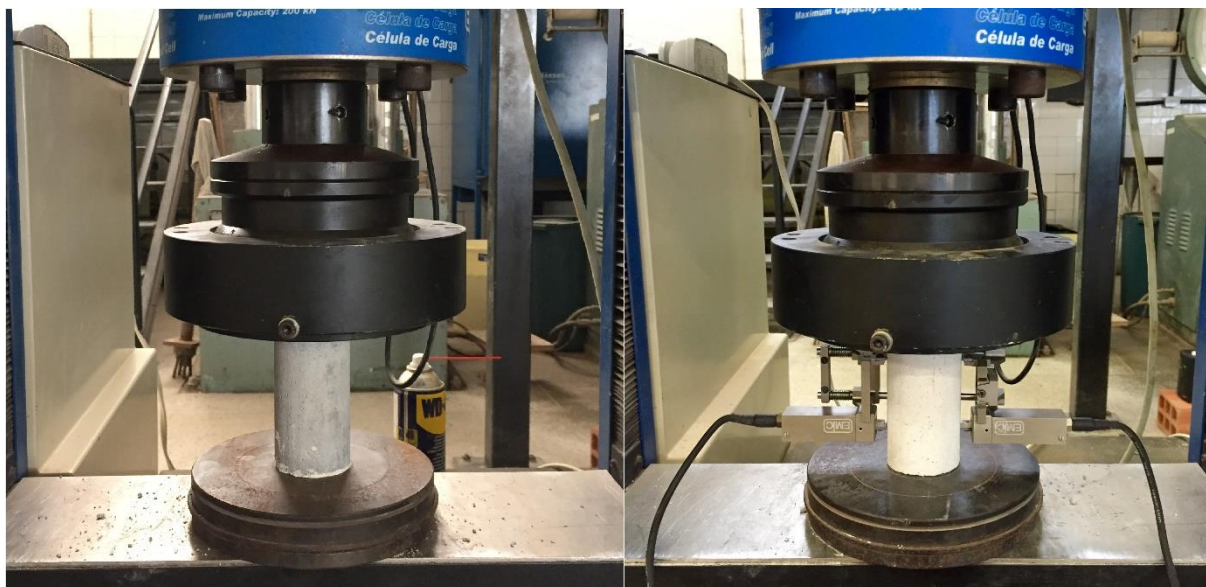
Os ensaios mecânicos foram realizados na máquina universal de ensaios, modelo DL 20000, marca EMIC, do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas (LAMCE) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, exceto pelos ensaios de aderência, que foram realizados no Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Sergipe (IFS).

Tendo como base a norma NBR 13279 (ABNT, 2005a), foi determinada a resistência à compressão das argamassas (Figura 31a). Para a determinação do módulo de elasticidade das argamassas (Figura 31b), seguiu-se a norma NBR 8522 (ABNT, 2008a).

Figura 31 - Ensaios mecânicos

(a) Resistência à compressão

(b) Módulo de elasticidade



Fonte: imagem registrada pela autora

Foram determinados os valores de resistência à tração por compressão diametral (tração indireta) das argamassas, conforme a norma NBR 7222 (ABNT, 2011a) (Figura 32).

Figura 32 - Realização do ensaio de resistência à tração indireta

Fonte: imagem registrada pela autora

Foram realizados ensaios de determinação da resistência potencial de aderência à tração das argamassas de referência, da AGG050 e da AEG050 (Figura 33), seguindo as diretrizes da norma NBR 15258 (ABNT, 2005c).

Figura 33 - Realização do ensaio de resistência potencial de aderência



Fonte: imagem registrada pela autora

3.4 Produção da argamassa para contrapiso autonivelante

O traço usado para a produção da argamassa para contrapiso autonivelante foi baseado no trabalho de Branco e Brito (2014), que utilizou argamassa autonivelante fornecida por uma empresa de pré-misturados.

No âmbito do presente trabalho, utilizou-se o traço em massa de 1:4,67 (cimento : agregado), indicado por Branco e Brito (2014). O teor de substituição de 30% da areia pela adição foi mantido, porém utilizaram-se areia média no lugar da areia grossa e a adição inerte de granalha ao invés do pó de pedra. A relação água/cimento foi de 1,00 e a quantidade de aditivo adicionada foi de 1,2% da massa de cimento, que foi do tipo CP V ARI.

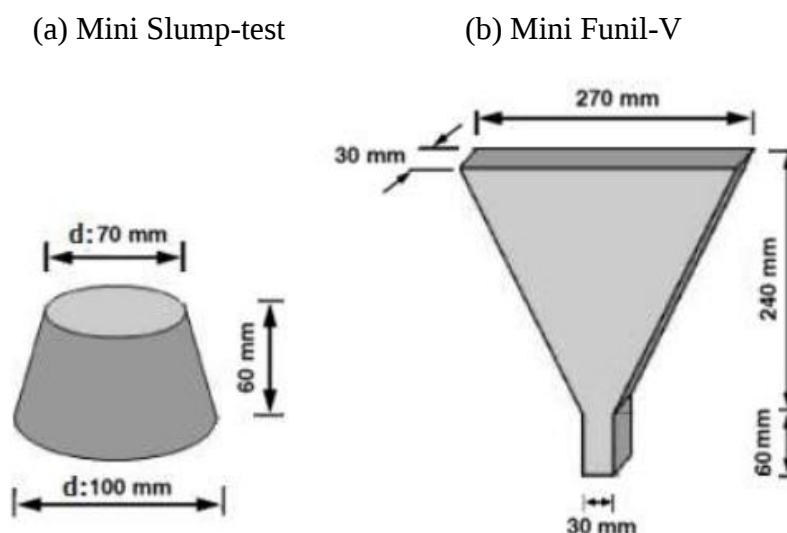
3.5 Ensaios com argamassa para contrapiso autonivelante

3.5.1 Ensaios no estado fresco

Pela inexistência de normas brasileiras para a avaliação da consistência e do tempo de fluxo de argamassas autonivelantes, utilizaram-se as prescrições recomendadas pela norma europeia EFNARC (2002), que descreve os métodos de ensaio do mini Slump-test e do mini Funil-V.

Os equipamentos para a realização destes ensaios são semelhantes aos usados para a avaliação de concretos autoadensáveis no estado fresco, porém em uma versão reduzida e dimensionada para argamassas, conforme a Figura 34 (a-b).

Figura 34 - Ensaios no estado fresco



Fonte: EFNARC (2002)

Segundo as especificações da EFNARC (2002), a consistência ideal para pastas autonivelantes é definida por uma tensão de escoamento, determinada por um diâmetro de espalhamento do material compreendido entre 24 e 26 cm, no teste do mini Slump-test, enquanto que a viscosidade plástica é determinada pelo tempo de escoamento compreendido entre 7 e 11 segundos, no teste do mini Funil-V.

Casos esses parâmetros não sejam atendidos, a norma recomenda realizar nova dosagem ou ainda acrescentar aditivos químicos para regular sua viscosidade.

3.5.2 Ensaios no estado endurecido

A determinação da resistência à tração na flexão da argamassa para contrapiso autonivelante foi realizada pelo método de ensaio prescrito na NBR 13279 (ABNT, 2005a), como apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Realização do ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: imagem registrada pela autora

3.6 Tratamento estatístico dos dados

Aplicou-se, especificamente para os resultados dos ensaios mecânicos das argamassas, o teste estatístico para análise de variância (ANOVA) para evidenciar a influência das substituições do agregado natural por granalha batida grossa e fina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio no estado fresco

4.1.1 Trabalhabilidade das argamassas de assentamento

Os valores obtidos para os espalhamentos das argamassas de assentamento estudadas estão mostrados na Tabela 12. As medidas de espalhamento variaram de 260 mm a 280 mm, estando dentro do intervalo estabelecido no procedimento desse estudo.

Tabela 11 - Medidas de espalhamento e relação água/aglomerantes das misturas

Nomenclatura	Espalhamento (mm)	Relação água/aglomerantes
Referência	260	1,09
AGG025	280	1,03
AGG050	280	0,96
AGG075	280	0,55
AGG100	270	0,83
AGF025	270	1,06
AGF050	270	1,06
AGF075	280	1,03
AGF100	280	0,99

Fonte: elaborada pela autora

Para o mesmo intervalo de espalhamento, observou-se que todas as misturas com gralha batida, tanto fina quanto grossa, requereram menores teores de água, em relação à massa de aglomerantes, que a mistura de referência, com destaque para a AGG075, com uma relação água/aglomerantes 71% menor que a de referência.

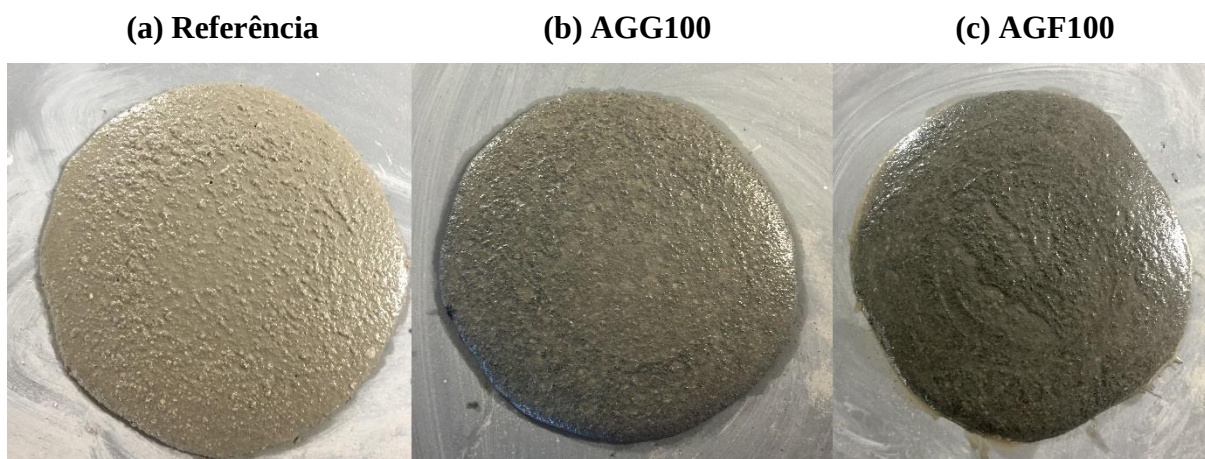
Anjos (2015) já havia percebido, em misturas de concreto, que a substituição do agregado miúdo natural pela gralha batida resultou em melhoria da consistência da mistura fresca. Atribuiu-se essa melhor trabalhabilidade às características das partículas da gralha batida que apresentavam “forma preferencialmente esféricas, exceto pelas impurezas introduzidas no processo de jateamento abrasivo, textura vítrea e baixa capacidade de absorção de água”.

Comparando-se as exigências de teores de água, em relação à massa de aglomerantes, para atingir o espalhamento determinado, nota-se que as misturas com gralha batida fina

apresentaram maiores valores desse índice, quando comparadas com as misturas com gralha batida grossa. Isso pode ser justificado pela maior superfície específica da gralha fina.

A Figura 36 (a-c) mostra os espalhamentos obtidos pelas argamassas de referência e com 100% de substituição da areia convencional pela gralha batida grossa e fina.

Figura 36 - Espalhamentos obtidos pelas argamassas com 0% e 100% de substituição do agregado miúdo por gralha grossa e fina



Fonte: imagem registrada pela autora

4.1.2 Consistência e tempo de fluxo das argamassas para contrapiso autonivelante

No ensaio de consistência, realizado segundo a norma EFNARC (2002), a argamassa para contrapiso autonivelante produzida com adição inerte de gralha batida de cobre apresentou um espalhamento de 24 cm (Figura 37), satisfazendo, assim, ao intervalo de 24 a 26 cm estabelecido pela referida norma.

A medida do tempo de fluxo da argamassa autonivelante em questão foi feita pelo ensaio do Mini Funil-V (Figura 38), também preconizado pela EFNARC (2002), resultando em um tempo de fluxo de oito segundos, valor que atende ao intervalo entre sete e onze segundos requeridos pela norma.

Figura 37 - Espalhamento da argamassa autonivelante no ensaio do Mini Slump-test



Fonte: imagem registrada pela autora

Figura 38 - Realização do ensaio do Mini Funil-V



Fonte: imagem registrada pela autora

4.2 Ensaios com argamassas endurecidas

4.2.1 Ensaios físicos das argamassas de assentamento

Na Tabela 12, a seguir, estão apresentados os valores obtidos nos ensaios físicos relacionados à porosidade das misturas, sendo determinados a absorção de água, o índice de vazios e as massas específicas seca, saturada e real.

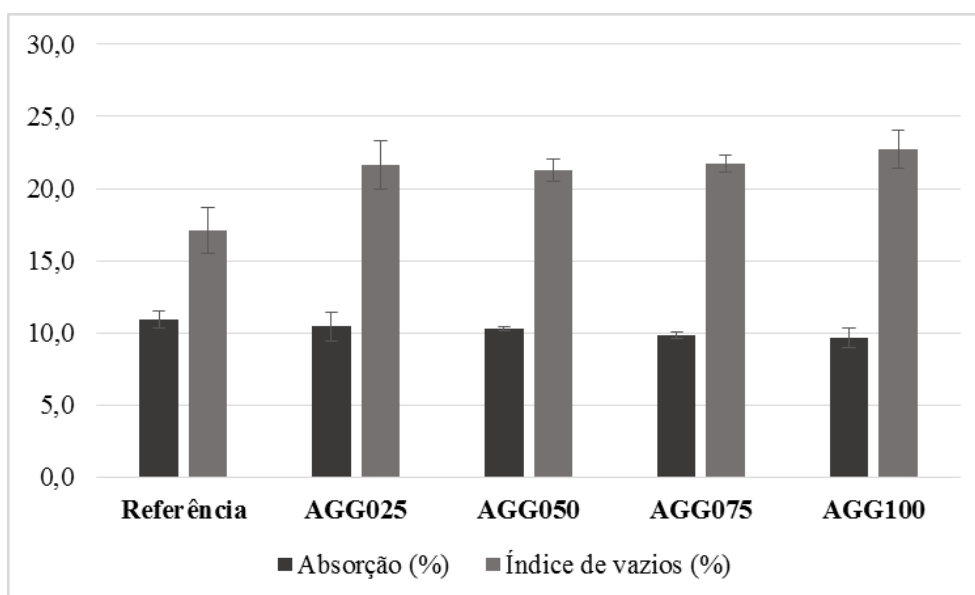
Tabela 12 - Índices físicos relacionados à porosidade

Argamassas	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa esp. seca (g/cm³)	Massa esp. saturada (g/cm³)	Massa esp. real (g/cm³)
Referência	11,0	17,1	1,6	1,7	1,9
AGG025	10,4	21,6	2,1	2,3	2,7
AGG050	10,3	21,3	2,1	2,3	2,6
AGG075	9,8	21,7	2,2	2,4	2,8
AGG100	9,6	22,7	2,4	2,6	3,1
AGF025	10,7	22,5	2,1	2,3	2,7
AGF050	9,8	22,3	2,3	2,5	2,9
AGF075	11,0	26,2	2,4	2,6	3,2
AGF100	10,4	26,6	2,6	2,8	3,5

Fonte: elaborada pela autora

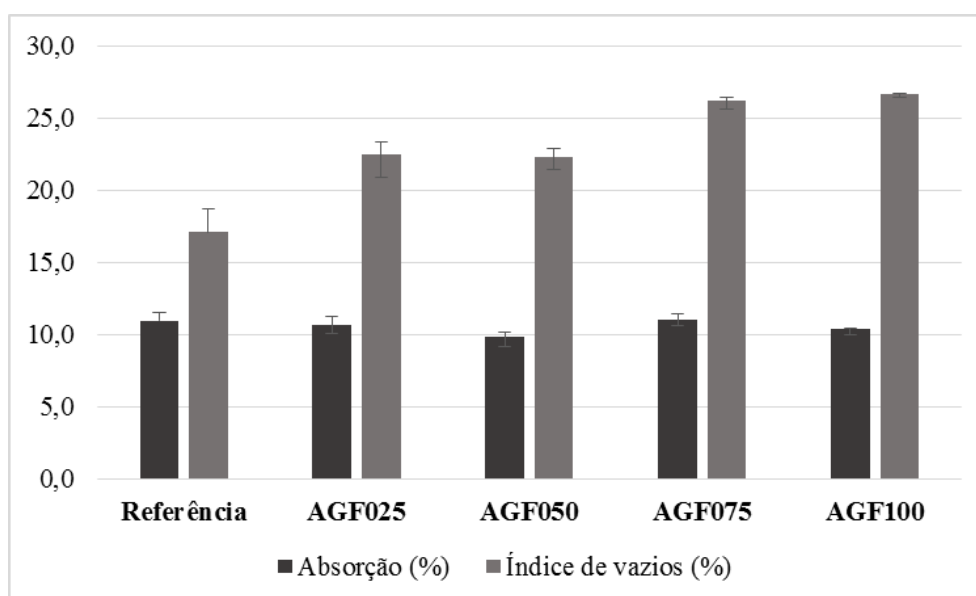
As Figuras 39 e 40 mostram os valores de absorção de água e índice de vazios das argamassas das séries com granelha batida grossa e fina, respectivamente, com seus desvios padrão.

Figura 39 - Absorção e índice de vazios das argamassas de referência e com granalha grossa



Fonte: elaborada pela autora

Figura 40 - Absorção e índice de vazios das argamassas de referência e com granalha fina



Fonte: elaborada pela autora

Os resultados dos ensaios de medida de porosidade das argamassas, tanto com granalha batida grossa quanto com granalha batida fina, mostraram que a absorção de água, pelo método

da norma NBR 9778 (ABNT, 2009b), não tiveram diferenças expressivas de valores, comparando-as entre si e com a mistura de referência.

Ao contrário dos resultados de absorção de água, os índices de vazios das argamassas com granalha batida apresentaram valores superiores ao índice de vazios da argamassa de referência. Para as argamassas com granalha batida grossa, houve um aumento desta propriedade num intervalo de cerca de 25% a 33%, havendo a tendência de aumento deste índice com o aumento do teor de substituição do agregado convencional. Para as argamassas com granalha batida fina, o aumento do índice de vazios foi até maior que os medidos para as argamassas com granalha batida grossa. Os incrementos desta propriedade estiveram num intervalo de 31% a 56% em relação à mistura de referência.

As massas específicas secas das argamassas com granalha batida grossa tiveram incrementos crescentes à medida que se aumentaram os teores de substituição do agregado convencional. Esses incrementos variaram de 33% (AGG025) a 51% (AGG100). Para as argamassas com granalha batida fina, os incrementos foram bem superiores aos das argamassas de referência e com granalha batida grossa. Esses incrementos variaram de 35% (AGF025) a 64% (AGF100).

Os valores obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade estão apresentados na Tabela 13 e nas Figuras 41 e 42.

Tabela 13 - Evolução da absorção de água por capilaridade

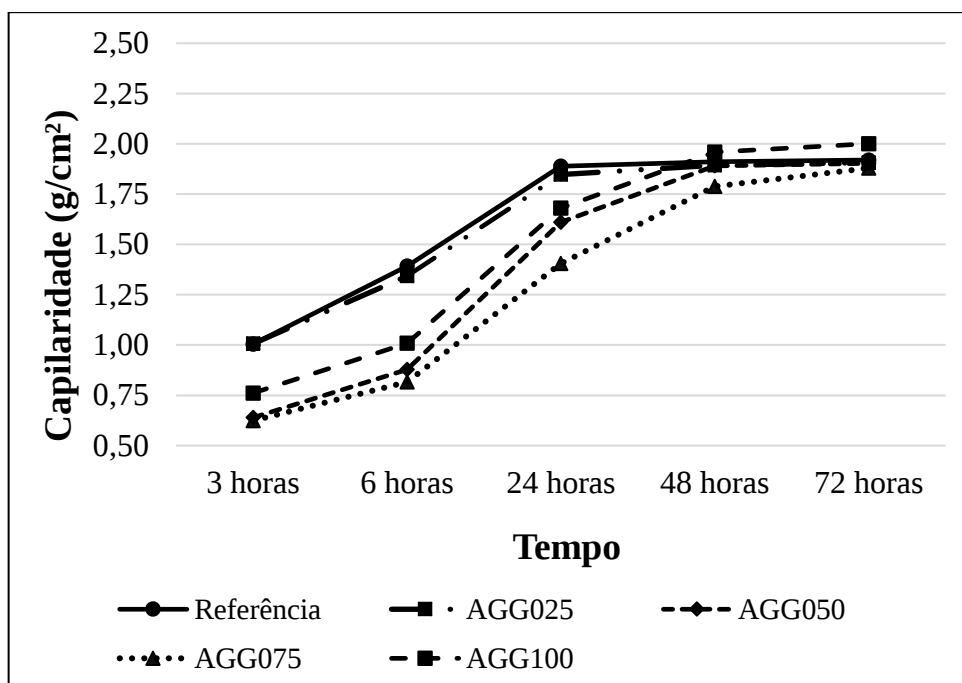
Argamassas	Capilaridade (g/cm ²)				
	3 horas	6 horas	24 horas	48 horas	72 horas
Referência	1,00	1,39	1,89	1,91	1,92
AGG025	1,01	1,34	1,85	1,89	1,91
AGG050	0,64	0,88	1,61	1,89	1,90
AGG075	0,62	0,82	1,40	1,79	1,88
AGG100	0,76	1,01	1,68	1,96	2,00
AGF025	1,13	1,57	2,01	2,04	2,06
AGF050	1,60	1,90	1,97	2,02	2,04
AGF075	2,03	2,06	2,12	2,16	2,18
AGF100	2,00	2,13	2,20	2,24	2,27

Fonte: elaborada pela autora

Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade das argamassas com granalha batida grossa mostraram que, nas primeiras 24 horas, a absorção foi maior para as misturas de referência e para a AGG025. Ao cabo de 72 horas, as absorções de todas as argamassas com granalha batida grossa apresentaram valores bem próximos, em torno de 2 g/cm².

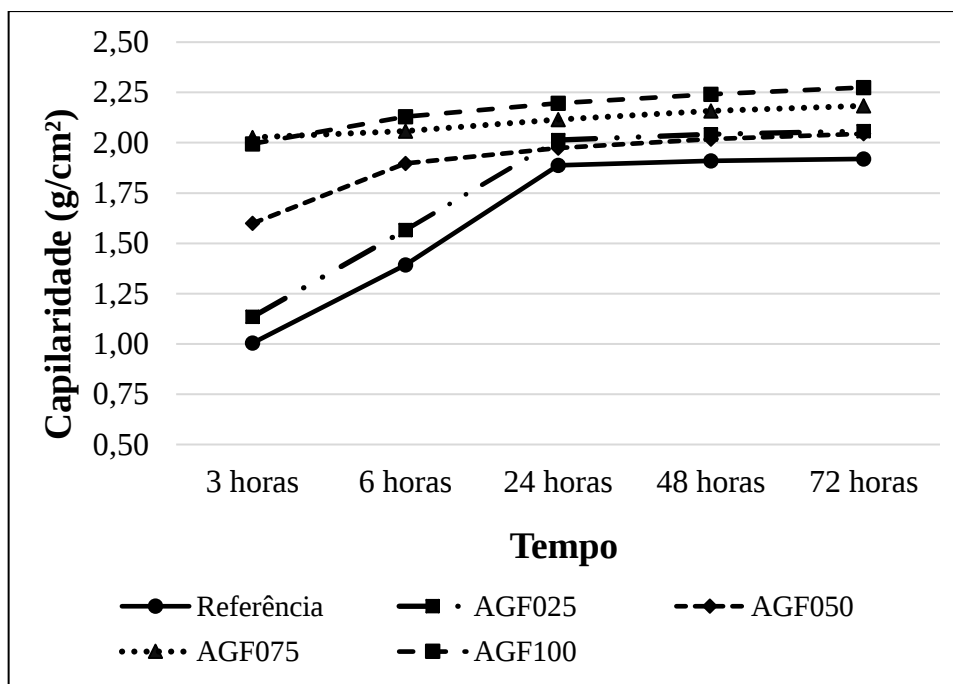
Semelhante às anteriores, dentre as argamassas com granalha batida fina, nas primeiras 24 horas, a mistura de referência e a AGF025 foram as que tiveram menores absorções. Às 72 horas, a absorção máxima sofreu incrementos na medida em que havia aumento dos teores de substituição do agregado convencional.

Figura 41 - Evolução da capilaridade na argamassa de referência e com granalha grossa



Fonte: elaborada pela autora

Figura 42 - Evolução da capilaridade na argamassa de referência e com granalha fina



Fonte: elaborada pela autora

As Figuras 43, 44 e 45 mostram o aspecto dos corpos de prova das argamassas após o ensaio de absorção por capilaridade, quando foram rompidos à compressão diametral.

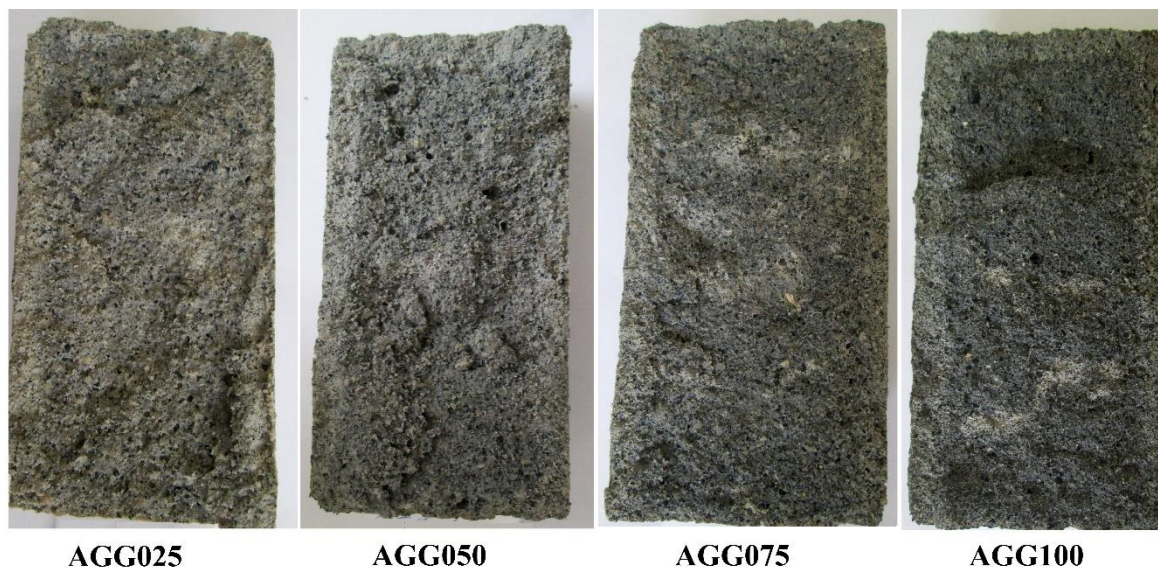
Figura 43 - Aspecto da argamassa de referência após ensaio de capilaridade



Referência

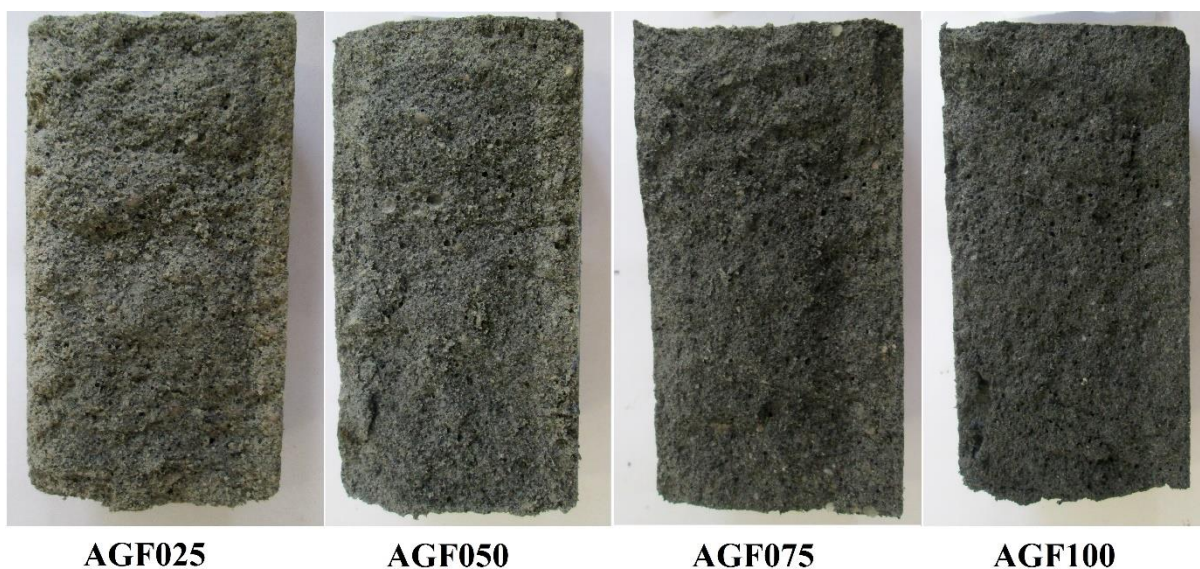
Fonte: imagem registrada pela autora

Figura 44 - Aspecto das argamassas com granalha grossa após ensaio de capilaridade



Fonte: imagem registrada pela autora

Figura 45 - Aspecto das argamassas com granalha fina após ensaio de capilaridade



Fonte: imagem registrada pela autora

O padrão da mancha de umidade nos corpos de prova de todas as misturas estudadas apresentou-se constante, com alturas bem semelhantes e bordas secas com, praticamente, a mesma espessura.

4.2.2 Ensaios mecânicos

4.2.2.1 Resistência à compressão axial das argamassas de assentamento

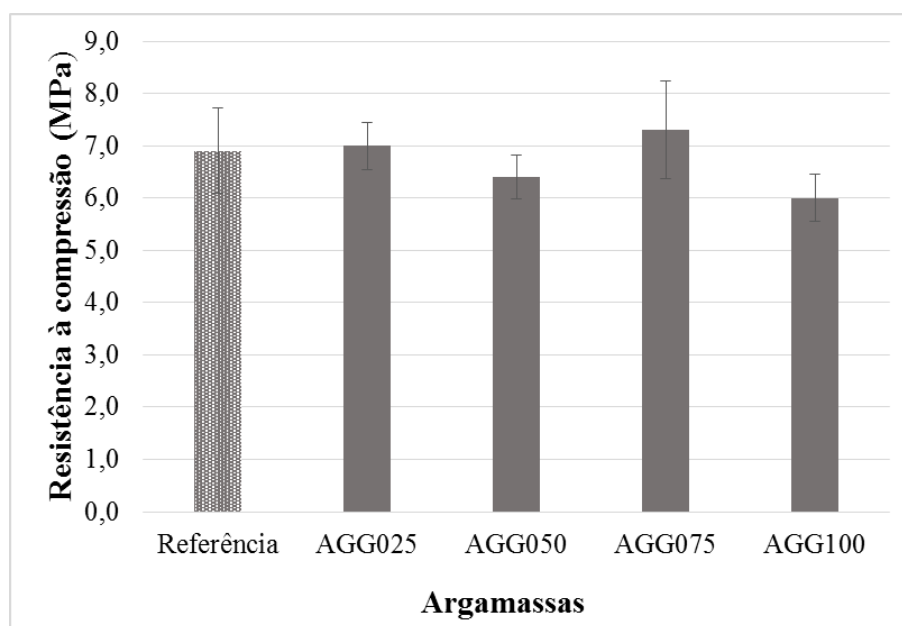
Dos ensaios de compressão axial realizados com as amostras de argamassa de diferentes teores de substituição, foram obtidos os resultados indicados na Tabela 15 e nas Figuras 46 e 47. No Apêndice A, estão mostradas as curvas de evolução da força, para cada uma das misturas, geradas pelo *software* da máquina universal de ensaios.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial

Argamassa	Resistência à compressão	
	Média (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	6,9	11,8
AGG025	7,0	6,4
AGG050	6,4	6,6
AGG075	7,3	12,8
AGG100	6,0	7,5
AGF025	5,3	10,2
AGF050	4,0	25,4
AGF075	0,9	30,8
AGF100	1,1	12,7

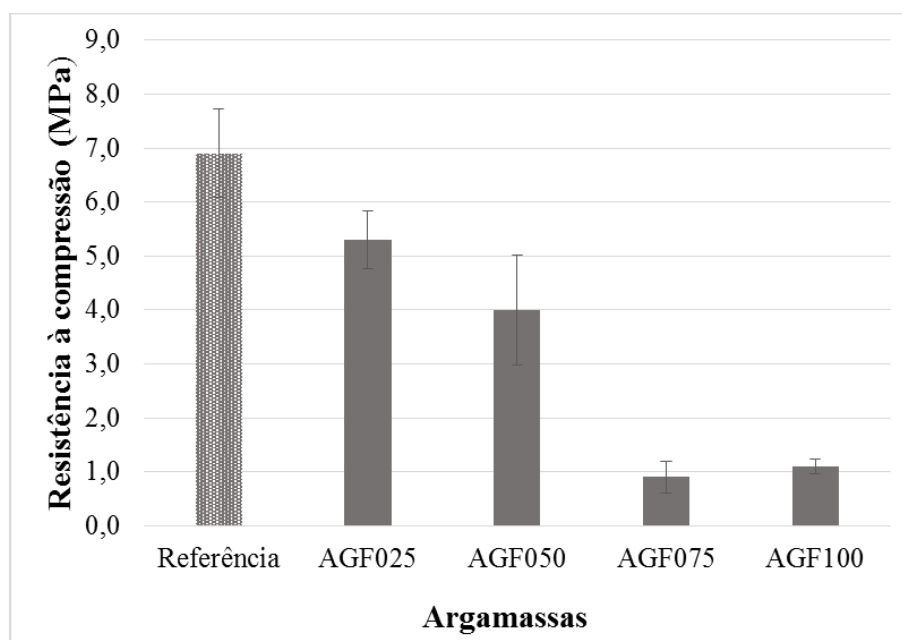
Fonte: elaborada pela autora

Figura 46 - Valores médios da resistência à compressão para as amostras com granalha batida grossa



Fonte: elaborada pela autora

Figura 47 - Valores médios da resistência à compressão para as amostras com granalha batida fina



Fonte: elaborada pela autora

Os ensaios de resistência à compressão axial mostraram que, em relação à argamassa de referência, para a substituição de 25% do agregado convencional por granalha batida grossa, numa primeira análise, não houve variação dessa propriedade. Para a mistura AGG050, houve uma redução dessa propriedade de 8% e para a substituição de 75%, a resistência aumentou em 5,5%. Para a mistura AGG100, houve redução de desempenho de 13%. A mistura AGG075 foi aquela que exigiu menor relação água/aglomerantes, dentre todas as estudadas, o que justifica esse desempenho diferenciado. Contudo, de acordo com a análise de variação, houve diferença significativa entre os valores obtidos (ANOVA, $F = 3,80$; $F_{crit} = 2,76$; $p = 0,02$).

No caso das argamassas com substituição do agregado natural pela granalha batida fina, os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial mostraram que houve reduções para todos os teores em relação à argamassa de referência. Para 25% de substituição, houve uma redução de 23%, para a mistura AGF050, a redução foi de 42%, para a AGF075, a redução foi de 87% e para a mistura com 100% de substituição, houve redução de 84%. A análise de variância mostrou que houve diferença significativa entre os valores obtidos (ANOVA, $F = 97,8$; $F_{crit} = 2,76$; $p = 6,9E-15$).

No caso das argamassas com substituição do agregado convencional por granalha batida fina, houve reduções de desempenho, tanto em relação à argamassa de referência, como em relação às argamassas com mesmos teores de granalha batida grossa. Pode-se atribuir esse desempenho ao fato de que a granalha batida fina, por ter sido utilizada como material abrasivo em maior número de vezes, traz consigo maiores teores de impurezas, algumas das quais de natureza orgânica, como fragmentos de película de pintura dos tanques jateados. Sabe-se que a presença de matéria orgânica nos agregados para misturas cimentícias traz retardo na pega e no endurecimento do material cimentício, comprometendo seu desempenho mecânico.

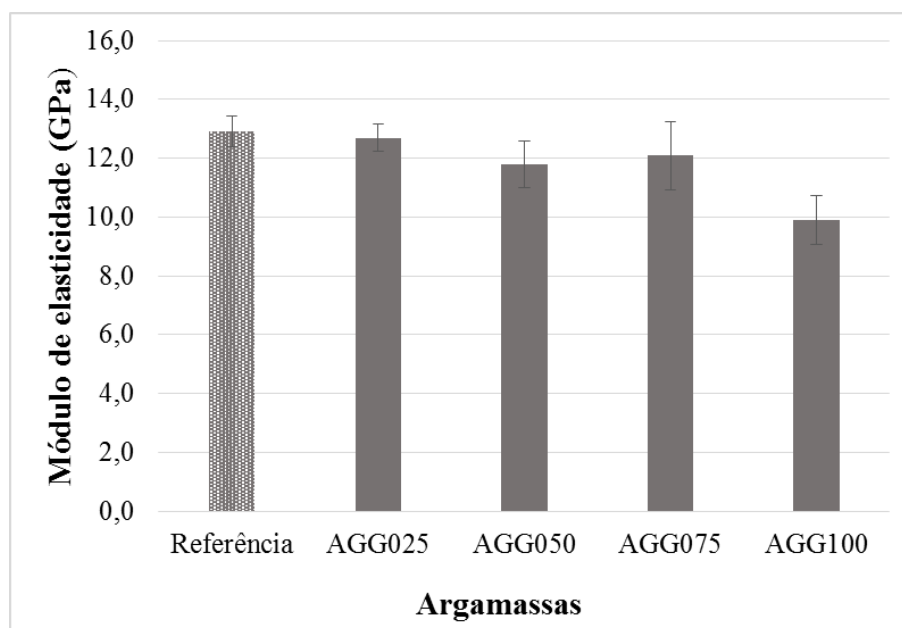
4.2.2.2 Módulo de elasticidade das argamassas de assentamento

Os valores médios de módulo de elasticidade à compressão, para as amostras de argamassa estudadas, estão mostrados na Tabela 15 e nas Figuras 48 e 49. No Apêndice B, constam as curvas tensão *versus* deformação específica geradas pelo *software* da máquina universal de ensaios.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade

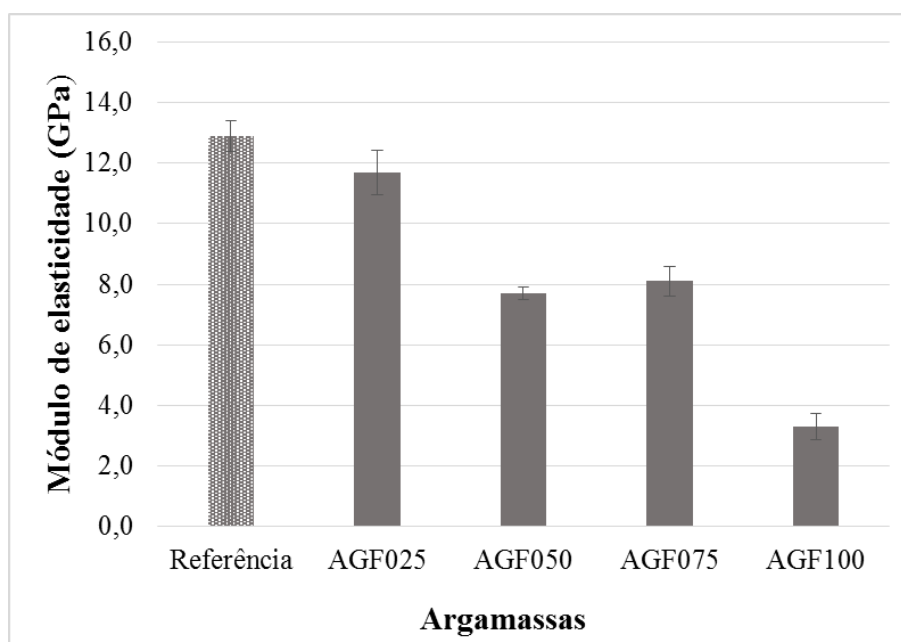
Argamassa	Módulo de elasticidade	
	Média (GPa)	Coeficiente de variação (%)
Referência	12,9	3,96
AGG025	12,7	3,50
AGG050	11,8	6,81
AGG075	12,1	9,60
AGG100	9,9	8,53
AGF025	11,7	6,29
AGF050	7,7	2,44
AGF075	8,1	6,04
AGF100	3,3	12,75

Fonte: elaborada pela autora

Figura 48 - Valores médios de módulo de elasticidade para as amostras com granalha batida grossa

Fonte: elaborada pela autora

Figura 49 - Valores médios de módulo de elasticidade para as amostras com granalha batida fina



Fonte: elaborada pela autora

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade mostraram, numa primeira análise, que, para as substituições do agregado convencional pela granalha grossa em 25%, 50% e 75%, as variações foram pouco significativas, conforme ratificado pela análise de variância (ANOVA, $F = 4,40$; $F_{crit} = 5,20$; $p = 0,07$). Para a substituição de 100%, o módulo ficou reduzido em 22,9%, em relação à mistura de referência.

As misturas com granalha fina tiveram reduções bastante intensas no módulo de elasticidade, conforme ratificadas pela análise de variância (ANOVA, $F = 112,47$; $F_{crit} = 5,19$; $p = 4,40E-5$). Para 25% de substituição, a redução da rigidez foi de 9% em relação à referência e, para substituição de 100%, a redução desta propriedade alcançou 75%. Assim como para o desempenho à compressão, a presença de matéria orgânica na granalha batida fina, pode responder pelo decréscimo no desempenho medido pelo módulo de elasticidade.

4.2.2.3 Ensaios de tração por compressão diametral das argamassas de assentamento

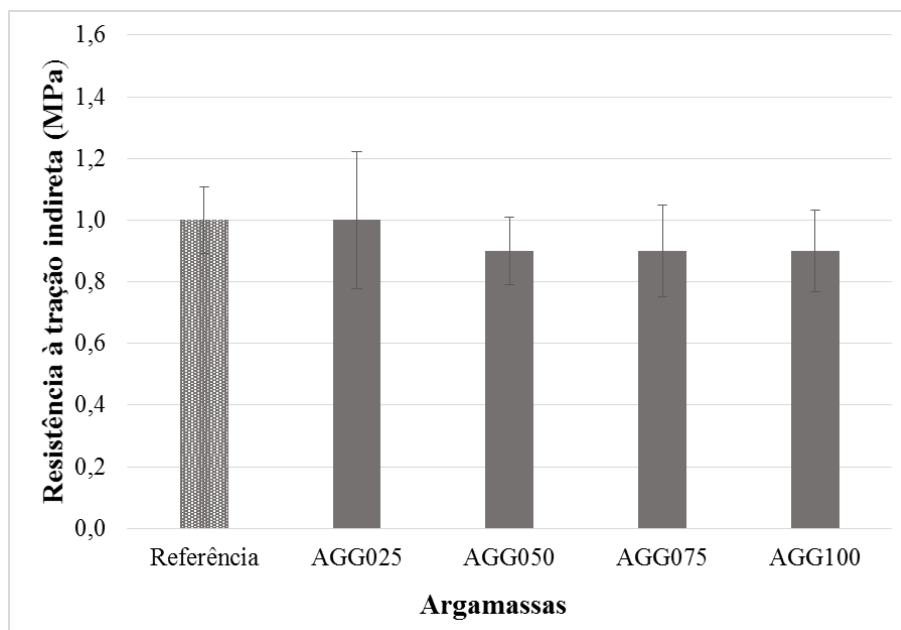
Os resultados médios para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão mostrados na Tabela 16 e nas Figuras 50 e 51. As curvas força *versus* tempo geradas pelo *software* da máquina universal de ensaios encontram-se no Apêndice C.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de resistência à tração indireta

Argamassa	Resistência à tração indireta	
	Média (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	1,0	11,10
AGG025	1,0	21,25
AGG050	0,9	11,57
AGG075	0,9	16,88
AGG100	0,9	15,19
AGF025	0,7	11,12
AGF050	1,5	21,03
AGF075	0,1	27,66
AGF100	0,1	8,24

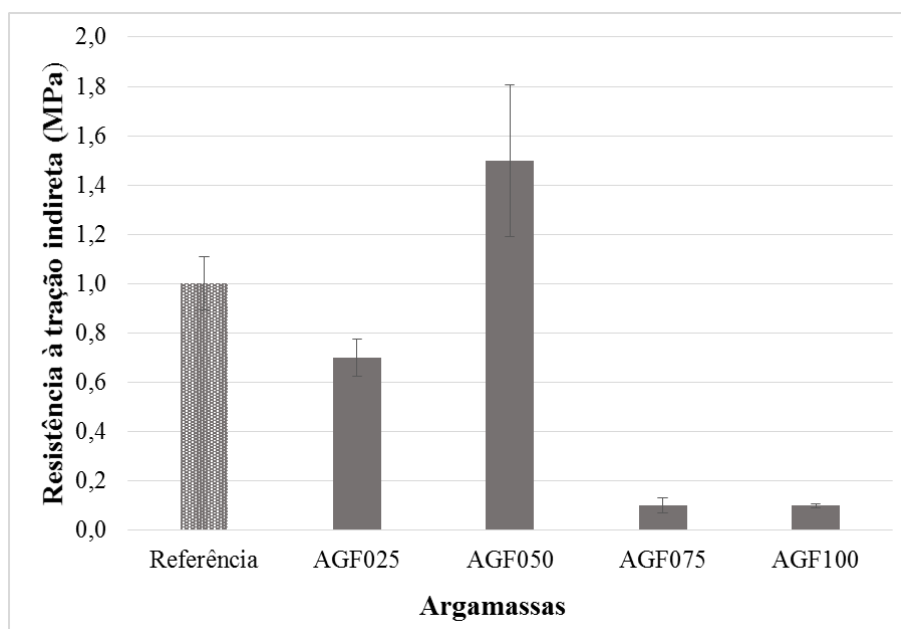
Fonte: elaborada pela autora

Figura 50 - Valores médios de resistência à tração indireta para as amostras com granalha batida grossa



Fonte: elaborada pela autora

Figura 51 - Valores médios de resistência à tração indireta para as amostras com granalha batida fina



Fonte: elaborada pela autora

Sob tração por compressão diametral, praticamente, não houve variação significativa dessa propriedade, comparando-se as misturas com substituição do agregado convencional pela granalha batida grossa, em relação à mistura de referência (ANOVA, $F = 1,25$; $F_{crit} = 2,76$; $p = 0,31$). Para as misturas AGG050, AGG075 e AGG100, observou-se uma redução de 10%.

Para a substituição do agregado convencional por granalha fina, as reduções na resistência à tração foram expressivas, chegando-se a um decréscimo de cerca de 90% para a mistura AGF100 (ANOVA, $F = 90,46$; $F_{crit} = 2,76$; $p = 1,71E-14$). Contrariando a tendência, a mistura AGF050 apresentou resistência à tração por compressão diametral 50% superior à da mistura de referência.

4.2.2.4 Ensaios de aderência das argamassas de assentamento

Os resultados médios para os ensaios de aderência das argamassas estão mostrados na Tabela 17. Esses ensaios foram feitos somente com as argamassas com 50% de substituição do agregado convencional, pois foram as que tiveram melhor desempenho mecânico dentre as que tinham o mesmo tipo de granalha. Porém, com a argamassa com granalha batida fina não foi possível obter resultados, pois durante a execução do corte na argamassa, para delimitar a área de arrancamento, houve o descolamento na interface argamassa-bloco. Para os ensaios de arrancamento da argamassa de referência, somente foi possível obter dois resultados, pois também houve descolamento na interface argamassa-bloco na preparação do ensaio. Para a argamassa AGG050, foram obtidos quatro resultados.

Tabela 17 - Resultados dos ensaios de aderência

Argamassa	Resistência potencial de aderência	
	Média (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	0,26	6,5
AGG050	0,24	10,1

Fonte: elaborada pela autora

Para a NBR 13281 (ABNT, 2005b), as argamassas de referência e a AGG05 estariam classificadas na classe A2, ou seja, com resistência potencial de aderência à tração igual ou superior a 0,20 MPa.

4.2.2.5 Ensaio de flexão da argamassa para contrapiso autonivelante

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão das argamassas de referência e da autonivelante encontram-se na Tabela 18. As curvas força *versus* deformação geradas pelo *software* da máquina universal de ensaios encontram-se no Apêndice D. Houve redução de 57% da resistência à tração da argamassa autonivelante com relação à de referência, de forma significativa (ANOVA, $F = 75,59$; $F_{crit} = 5,32$; $p = 2,39E-5$). Credita-se essa redução à presença de granalha batida como adição fina, contendo partículas de matéria orgânica em sua composição.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão

Argamassa	Resistência à flexão	
	Média (MPa)	Coefficiente de variação (%)
Referência	2,47	4,63
Autonivelante	1,06	17,56

Fonte: elaborada pela autora

5 CONCLUSÕES

Observou-se o desempenho físico e mecânico das argamassas de assentamento e para contrapiso autonivelante produzidas com substituição do agregado convencional pelas granalhas batidas grossa e fina. As conclusões são descritas a seguir.

No estado fresco, percebeu-se que as medidas de espalhamento de todas as misturas variaram de 260 mm a 280 mm, respeitando o intervalo previamente estabelecido. De forma geral, as argamassas com granalha batida, tanto fina quanto grossa, requereram menores teores de água, em relação à massa de aglomerantes, que a mistura de referência. O mesmo ocorreu com os concretos estudados por Anjos (2015), cuja melhoria na consistência foi atribuída à baixa absorção de água e à forma preferencialmente esférica dos grãos da granalha batida.

Os ensaios de medida de porosidade indicaram que a absorção de água das argamassas com granalha batida grossa e fina teve pouca variação, ao compará-las entre si e com a mistura de referência. Por outro lado, os índices de vazios das argamassas com granalha apresentaram valores significativamente superiores aos da argamassa de referência, atingindo, para a granalha fina, um incremento ainda maior que os medidos para as argamassas com granalha do tipo grossa.

As massas específicas secas das argamassas com granalha batida grossa tiveram incrementos crescentes, de 33% para a AGG025 e 51% para a AGG100. Nas misturas com granalha batida fina, os incrementos foram bem superiores, com a mistura AGF100 alcançando 64% de aumento em relação à argamassa de referência. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior empacotamento granular, conferido pela presença de grãos mais finos.

No ensaio de absorção de água por capilaridade, as argamassas com granalha batida grossa apresentaram valores de absorção bem próximos, em torno de 2 g/cm². Para as misturas com granalha do tipo fina, a absorção máxima sofreu incrementos, na medida em que havia aumento dos teores de substituição do agregado convencional.

Com relação à resistência mecânica, verificou-se que na mistura AGG025, praticamente, não houve variação dessa propriedade; porém, para a argamassa com substituição de 75% do agregado convencional por granalha grossa, a resistência aumentou em 5,5%. Essa melhoria de desempenho da AGG075 é justificada pelo teor água/aglomerantes exigido por essa mistura, sendo o menor dentre todas as estudadas.

Verificou-se também, pelos ensaios de mecânicos, que a inserção da gralha batida fina provocou uma considerável queda na resistência à compressão axial das argamassas. A esse declínio, atribui-se o fato de que, por ter sido utilizada como material abrasivo em maior número de vezes, havia grande quantidade de impurezas em sua composição, como partículas de tinta e óxidos e hidróxidos que formavam a camada corroída dos tanques.

Nos ensaios de medida do módulo de elasticidade, observou-se que, para as substituições do agregado convencional pela gralha grossa em até 75%, as variações foram pouco significativas. No entanto, o módulo da mistura AGG100 ficou reduzido em 22,9%, em relação ao de referência. No caso das argamassas com gralha fina, as reduções de rigidez foram bastante intensas, fenômeno que pode ser explicado pela presença de matéria orgânica no resíduo, semelhante ao que ocorreu com a resistência à compressão.

Quanto à resistência à tração, obtida pelo ensaio de compressão diametral, observou-se que não houve variação significativa dessa propriedade na série com gralha do tipo grossa, havendo apenas uma redução de 10% nas misturas com 50%, 75% e 100% de substituição do agregado convencional por este resíduo, em relação à de referência. Ao contrário do que ocorreu com as argamassas com gralha grossa, as misturas com gralha batida fina tiveram reduções expressivas da resistência à tração, com uma redução máxima de 90% para a mistura AGF100.

Com relação aos ensaios de aderência das argamassas de assentamento, os valores obtidos para a argamassa de referência e para a AGG050 foram próximos: 0,26 MPa e 0,24 MPa, respectivamente. De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005b), ambas as argamassas estariam classificadas na classe A2, ou seja, com resistência potencial de aderência à tração igual ou superior a 0,20 MPa.

A argamassa para contrapiso autonivelante, produzida com adição inerte de gralha batida de cobre, apresentou um espalhamento de 24 cm e um tempo de fluxo de oito segundos, valores que atendem aos intervalos requeridos pela norma europeia EFNARC (2002).

Os resultados dos ensaios de resistência à flexão mostraram que houve redução de 57% da resistência à tração da argamassa autonivelante com relação à de referência, o que pode ser explicado pela presença de partículas de matéria orgânica na composição da adição fina na gralha.

Da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que, para pequenas substituições do agregado convencional por gralha batida, especificamente a gralha grossa, houve

viabilidade de aplicação das argamassas de assentamento estudadas, considerando que, para assentamento de alvenarias, não são exigidos elevados índices de resistência e rigidez.

Quanto à argamassa para contrapiso autonivelante com adição inerte de granalha batida, sua aplicação também se mostrou viável, visto que, para esse tipo de serviço, não é exigido um índice de resistência elevado, já que se trata de uma camada de nivelamento sem fins estruturais.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se produzir argamassas de assentamento com outros traços, estudar o uso da granalha batida de cobre em elementos pré-moldados de argamassa. Para a argamassa autonivelante, recomenda-se a realização de outros ensaios, tais como a avaliação da retração e da expansão por umidade, além da produção de misturas com variados teores.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, J.; SEQUEIRA, C.; COSTA, M. **Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas**. 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa 2005.
- ALVES, N.J.D.; DO Ó, S.W. Aditivos incorporadores de ar e retentores de água. Cap. 4. In. BAUER, E. (coord.) **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM – UnB, Sinduscon, 2005.
- ALVES JUNIOR, A., GARCIA FILHO, J., TINOCO, J.E.L.; **O ciclo do calcário e da cal**. Curso de Gestão e Prática de Obras de Conservação e Restauro do Patrimônio Cultural. Olinda/PE: CECI, 11ª Edição, 2011.
- ANJOS, M.A.G. **Aplicação da granelha batida de cobre como substituta do aglomerante e do agregado miúdo em concreto de cimento Portland**. 2015. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2015.
- ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de revestimento de argamassa**. 2002
- ABDI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Relatório Técnico 01**. Análise da cadeia produtiva de agregados minerais para obras de construção civil e infraestrutura. 2012. Brasília. 2012. 57 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. 2001. Rio de Janeiro. 2001. 5 p.
- ABNT. **NBR NM 45**. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006. Rio de Janeiro. 2006. 8 p.
- ABNT. **NBR NM 52**. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. 2009. Rio de Janeiro. 2009a. 6 p.
- ABNT. **NBR NM 65**. Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. 2003. Rio de Janeiro. 2003a. 4 p.
- ABNT. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. 2003. Rio de Janeiro. 2003b. 6 p.
- ABNT. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. 2014. Rio de Janeiro. 2014. 4 p.
- ABNT. **NBR 6453**: Cal virgem para construção civil – Requisitos. 2003. Rio de Janeiro. 2003c. 3 p.
- ABNT. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. 2003. Rio de Janeiro. 2003d. 4 p.
- ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto. 1983. Rio de Janeiro. 1983. 9 p.

ABNT. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. 2011. Rio de Janeiro. 2011a. 5 p.

ABNT. **NBR 7348**: Pintura industrial – Preparação de superfície de aço com jato abrasivo e hidrojateamento. 2007. Rio de Janeiro. 2007. 10 p.

ABNT. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. 2008. Rio de Janeiro. 2008a. 16 p.

ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2009. Rio de Janeiro. 2009b. 4p.

ABNT. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. 2012. Rio de Janeiro. 2012. 3p.

ABNT. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. 2011. Rio de Janeiro. 2011b. 16p.

ABNT. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm. 2013. Rio de Janeiro. 2013a. 4p.

ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. 2015. Rio de Janeiro. 2015. 6p.

ABNT. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. 2005. Rio de Janeiro. 2016. 2 p.

ABNT. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2005. Rio de Janeiro. 2005a. 9 p.

ABNT. **NBR 13281**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. 2005. Rio de Janeiro. 2005b. 9 p.

ABNT. **NBR 13529**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. 2013. Rio de Janeiro. 2013b. 13 p.

ABNT. **NBR 15116**. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. 2004. Rio de Janeiro. 2004. 17 p.

ABNT. **NBR 15258**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. 2005. Rio de Janeiro. 2005c. 10 p.

ABNT. **NBR 15558**. Concreto – Determinação da exudação. 2008. Rio de Janeiro. 2008b. 7 p.

ABNT. **NBR 15575-3**. Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 3: requisitos para os sistemas de pisos. 2013. Rio de Janeiro. 2013c. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO DRYWALL. **Resíduos de gesso na construção civil Coleta, armazenagem e reciclagem**. SindusCon, SINDUSGESSO. SÃO PAULO. Jun. 2012.

AFAM - ASOCIACIÓN NACIONAL DE FABRICANTES DE MORTERO. **Guía morteros especiales**. 1ª Edición: Madrid, marzo de 2005.

ASTM Standard C125, 2000a. **Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.

AUSTIN S.A.; ROBINS, P.J.; GOODIER, C. I. **Construction and repair with wet-process sprayed concrete and mortar. Technical Report**, Concrete Society, Crowthorne, UK, N° 56, 59 p. 2002.

BARROS, M.M.S.B.; SABABATINI, F.H. **Tecnologia de produção de contrapisos para edifícios habitacionais e comerciais. BT/PCC/44** – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1991.

BAUER, E. Sistemas de revestimento de argamassa – generalidades. Cap. 1. In. BAUER, E. (coord.) **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM – UnB, Sinduscon, 2005.

BAUER, E.; SOUZA, J.G.G. Materiais constituintes e suas funções. Cap. 2. In. BAUER, E. (coord.) **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM – UnB, Sinduscon, 2005.

BRANCO, A.C.; BRITO, M. **Contrapiso Autonivelante**. 2º caderno de casos de inovação na construção civil. 2014

CARASEK, H. Argamassas. Cap. 28. In. ISAIA, G. C. (ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2010.

CICHINELLI, G.C. Acabamento projetado. **Revista Técnica**, 158 ed., Mai. 2010, PINI, São Paulo.

CICHINELLI, G. C. Execução de contrapiso autonivelante industrial. **Revista Técnica**, 293 ed., Mar. 2012, PINI, São Paulo.

CICHINELLI, G. C. Contrapiso autonivelante. **Revista Equipe de Obra**, 58 ed., Abr. 2013, PINI, São Paulo.

CINCOTTO, M.A., QUARCIONI, V.A., JOHN, V.M. Cal na Construção Civil. Cap. 22. In. ISAIA, G. C. (ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2010.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. **Argamassa projetada: sistema de revestimento racionalizado**. Coletânea Argamassa Projetada, 2012 – Parte 1.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002**. Brasília: MMA/CONAMA, 2002.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION. **Copper Mining and Extraction: Sulfide Ore**. Disponível em: <<http://copperalliance.org.uk/education-and-careers/education-resources/copper-mining-and-extraction-sulfide-ores>> Acesso em: 27/04/2016

EFNARC - EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. United Kingdom, 2002.

FEIBER, S. D.; **Técnicas Construtivas Tradicionais no Brasil**. Curso de Gestão e Prática de Obras de Conservação e Restauro do Patrimônio Cultural. Olinda/PE: CECI, 11ª Edição, 2011.

FERREIRA, G.E., PEREIRA, L.S. Mercados de agregados no Brasil. Cap. 1. In. ALMEIDA, S. L. M., LUZ, A. B. (ed) **Manual de agregados para construção civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

FIORITO, A.J.S.I.; **Manual de argamassa e revestimentos** – Estudos e Procedimentos de Execução, 2ª edição. São Paulo. Editora PINI, 2009.

GALLEGOS, H., CASABONNE, C. **Albañilería estructural**. 3 ed. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo editorial, 2005.

GENTIL, V. Revestimentos: Limpeza e Preparo de superfícies. In:_____. **CORROSÃO**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Cap. 21.

GORAI, B., JANA, R.K., PREMCHAND. Characteristics and utilisation of copper slag - a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 39, n. 4, p. 299-313, 2003.

HANNANT, D.J. Cement-base composites. Volume 4; pp. 323-362. In. KELLY, A.; ZWEBEN, C. (ed) **Comprehensive Composite Materials**. Guildford: University of Surrey, 2000.

HANSINK, J.D. An Introduction to Abrasives for Protective Coating Removal Operations. **Journal of Protective Coatings and Linings**, vol. 17, no. 4, pp 66-73, Apr 2000.

ICSG - INTERNATIONAL COPPER STUDY GROUP. **The World Copper Factbook 2014**. Lisboa, 2015.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 8501-1**. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness – Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings. Genève, 2007.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 8504-2**. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Surface preparation methods – Part 2: Abrasive blast-cleaning. Genève, 2001.

JOHN, V.M., CINCOTTO, M.A. Gesso na Construção Civil. Cap. 23. In. ISAIA, G.C. (ed) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2010.

KAMBHAM, K.; SANGAMESWARAN, S.; DATAR, S.R.; KURA, B. Copper slag: optimization of productivity and consumption for cleaner production in dry abrasive blasting. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 465 - 476, 2006.

MADANY, I.M.; AL-SAYED, M.H.; RAVEENDRAN, E. Utilization of copper blasting grit waste as a construction material. **Waste Management**, v. 11, p. 35-40, 1991.

MARTINELLI, F.A.; HELENE, P.R.L. **Usos, funções e propriedades das argamassas mistas destinadas ao assentamento e revestimento de alvenarias**. BT/PCC/47 – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1991.

MARTINS, E.J. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa auto-nivelante**. 2009. 139 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete** - microstructure, properties, and materials. 3ª edição. McGraw-Hill: Estados Unidos, 2006.

MEJIA JUNIOR, A. P. **Jateamento Abrasivo**. 2014. Disponível em: <<http://aprietojato.com>> Acesso em: 21 de jun. de 2016.

MTE - MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Norma Regulamentadora 15 – Atividades e operações insalubres**. 2015.

MTE - MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Norma Regulamentadora 25 – Resíduos industriais**. 2011.

MOURA, W.A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul (2000), p. 207.

MURARI, K.; SIDDIQUE, R.; JAIN, K. Use of waste copper slag, a sustainable material. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 17, p. 13-26, 2015.

NAKAKURA, E.N.; CINCOTTO, M.A. Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. **BT/PCC/359** – Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2004.

NAKAMURA, J. Revestimento argamassado. **Revista Equipe de Obra**, 62 ed., Ago. 2013, PINI, São Paulo.

NAZER, A.S.; PAVEZ, O.; ROJAS, F. Use of copper slag in cement mortar. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, 65(1), 87-91, jan. mar., 2012.

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

PADDISON R.D. What type of abrasive to use? An overview on selection and use of common blast-cleaning materials. **Protective Coatings Europe** 2000; 5:10e6, 63.

PAES, I.N.L.; GOLÇALVES, S.R.C. Dos momentos iniciais pós-aplicação ao desenvolvimento da aderência. Cap. 6. In. BAUER, E. (coord.) **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM – UnB, Sinduscon, 2005.

PETROBRÁS - PETRÓLEO BRASILEIRO S/A. **N-9: Tratamento de superfícies de aço com jato abrasivo e hidrojateamento**. Rev. F., 2011.

RECENA, F.A.P. **Conhecendo argamassa**, 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2011.

RESENDE, C.M.A. **Estudo da viabilidade de incorporação de escória de cobre como agregado fino em produtos de construção**. 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

RUBIN, A.A. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra**. 2015. 205 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2015.

SABBATINI, F.H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente**. São Paulo; ABCP, 2.ed. 1998. 44p. (ET-91).

SANTANA, M.J.A.; CARNEIRO, A.P.; SAMPAIO, T.S. Uso do agregado reciclado em argamassas de revestimento. Cap. 8. In. CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. de; CASSA, J. C. S. (org.) **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001.

SANTIAGO, C.C. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007. 202 p.

SANTOS, C.C.N.; RAMOS, D.V.M. Aspectos das argamassas projetadas. Cap. 7. In. BAUER, E. (coord.) **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM – UnB, Sinduscon, 2005.

SOUZA, U.E.L. Argamassa para contrapiso. **Revista Equipe de Obra**, 12 ed., Jul. 2007, PINI, São Paulo.

SINDICEL - SINDICATO DA INDÚSTRIA DE CONDUTORES ELÉTRICOS, TREFILEÇÃO E LAMINAÇÃO DE METAIS NÃO FERROSOS DO ESTADO DE SÃO PAULO; ABCobre - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO COBRE. **Anuário Estatístico 2014**. São Paulo, 2014. 20 p.

SIDNEY, M. Concrete constituent materials. Chap. 1. In. NAWY, E. G. (ed) **Concrete construction engineering handbook**. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.

SOUZA, J.G.G.; LARA, P.L.O. Reologia e trabalhabilidade das argamassas. Cap. 3. In. BAUER, E. (coord.) **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. Brasília: LEM – UnB, Sinduscon, 2005.

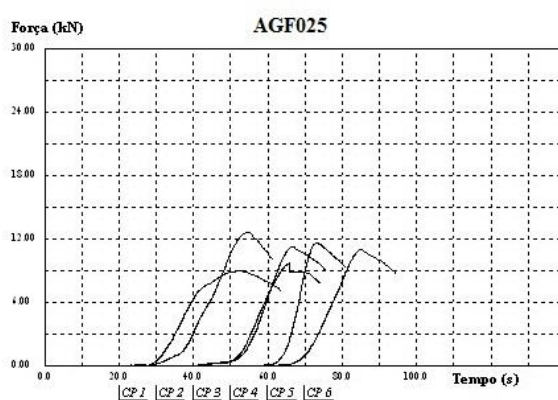
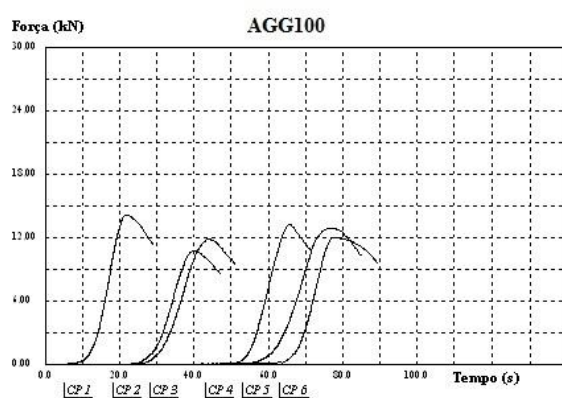
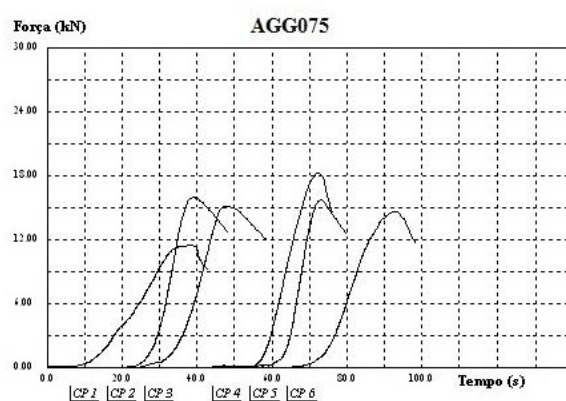
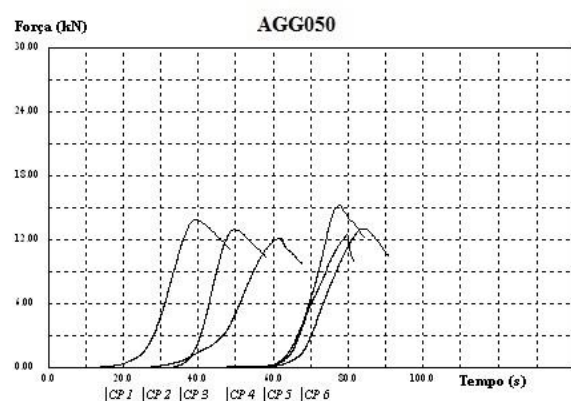
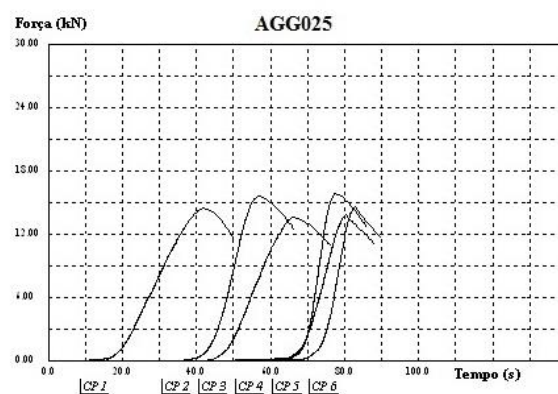
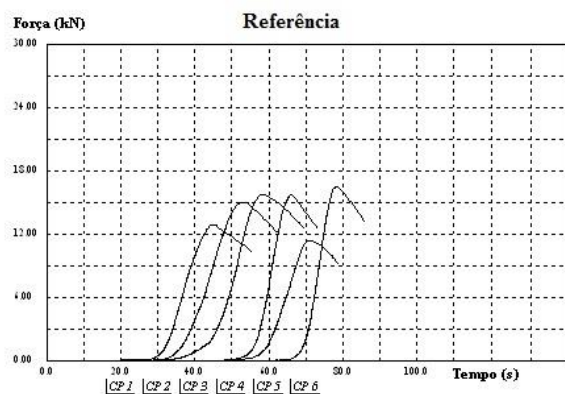
SOUZA, N.C. **Análise de desempenho do contrapiso autonivelante em relação ao sistema convencional**. 2013. 119 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013.

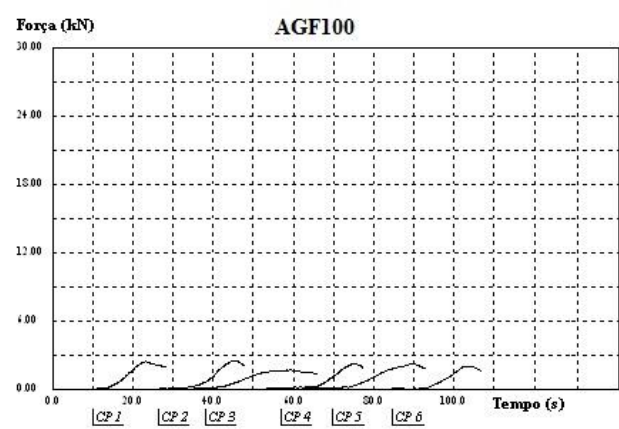
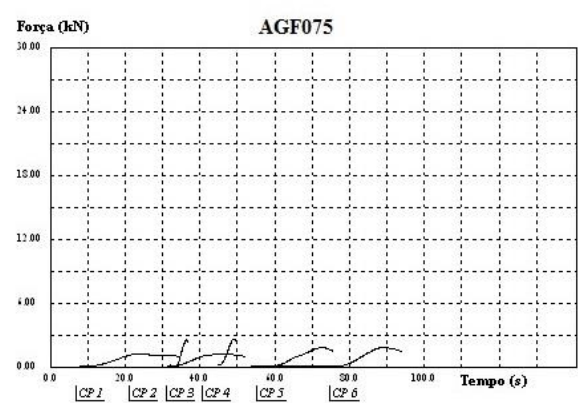
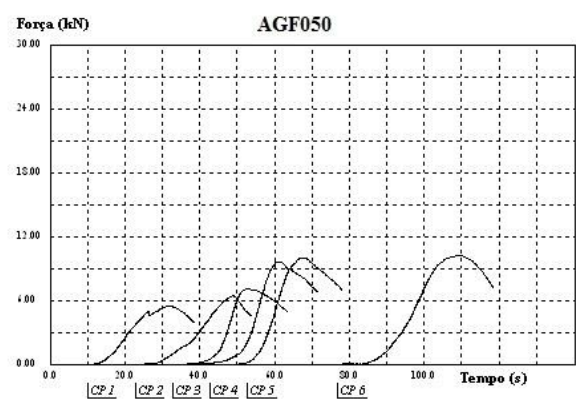
SSPC - STEEL STRUCTURES PAINTING COUNCIL. **Protective Coatings Glossary**. Acronyms and Terms Related to Coating Industrial Steel and Concrete Structures as well as Failure Analysis and Regulations. 2011.

VOTORANTIM. **Contrapiso autonivelante** - Argamassa para regularização de pisos em áreas internas, 2015. Disponível em: <<http://www.mapadaobra.com.br/wp-content/uploads/2015/12/130-ficha-tecnica.pdf>> Acesso em: 17 de mai. de 2016.

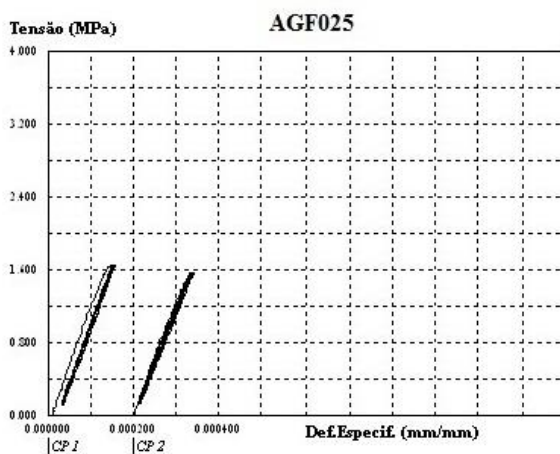
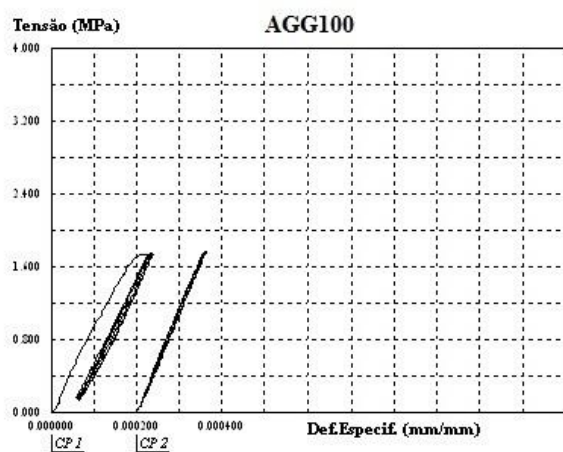
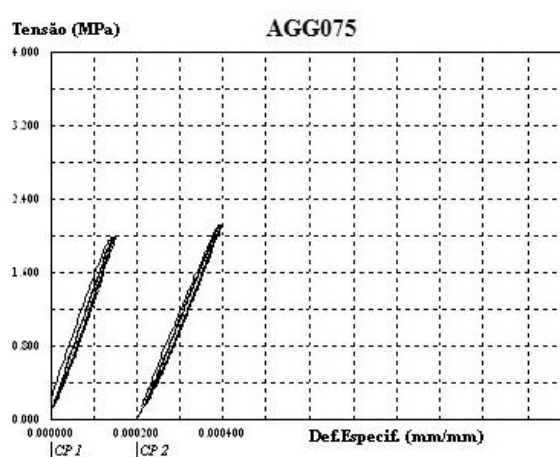
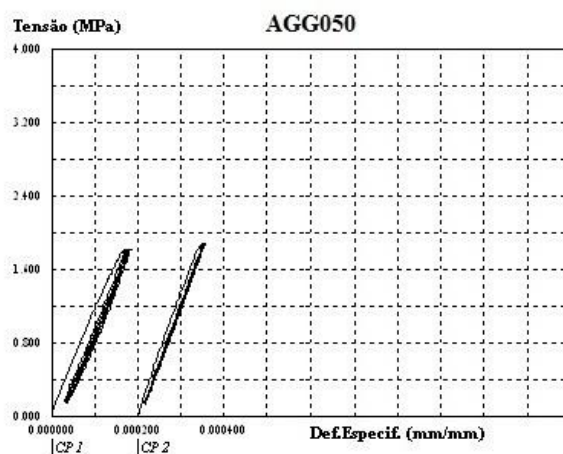
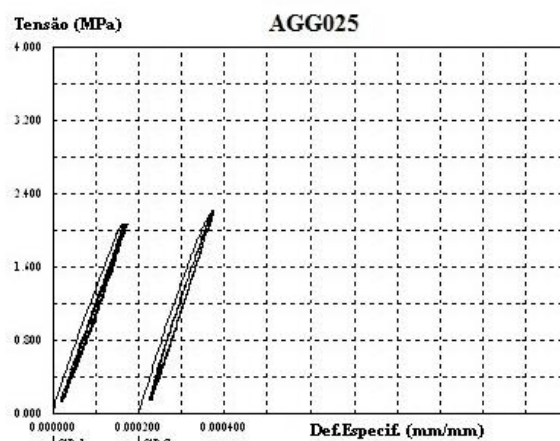
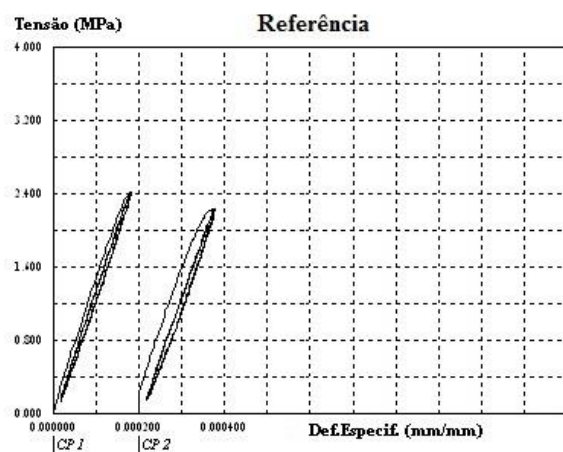
ZAIN, M.F.M.; ISLAM, M.N.; RADIN, S.S.; YAP, S.G. Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag. **Cement & Concrete Composites** 26 (2004); p. 845-851

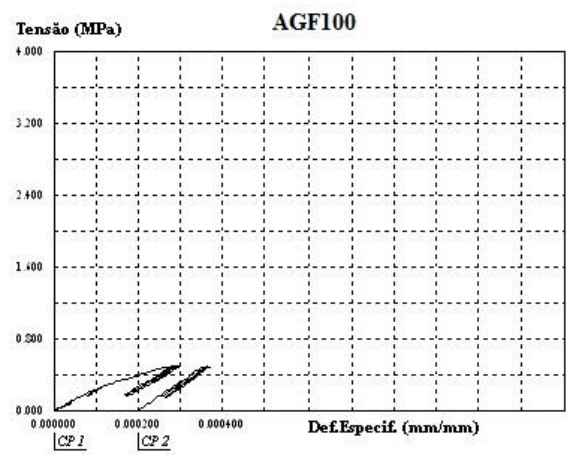
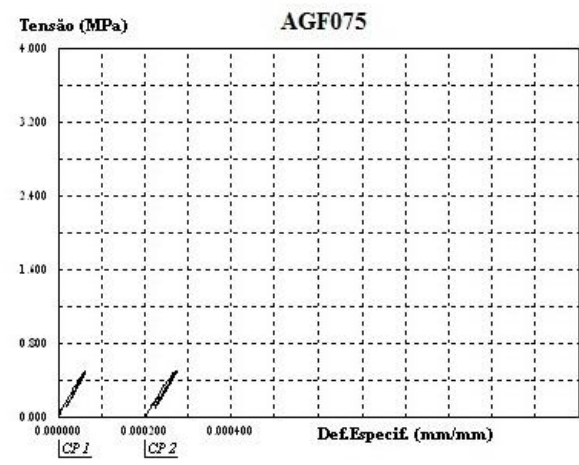
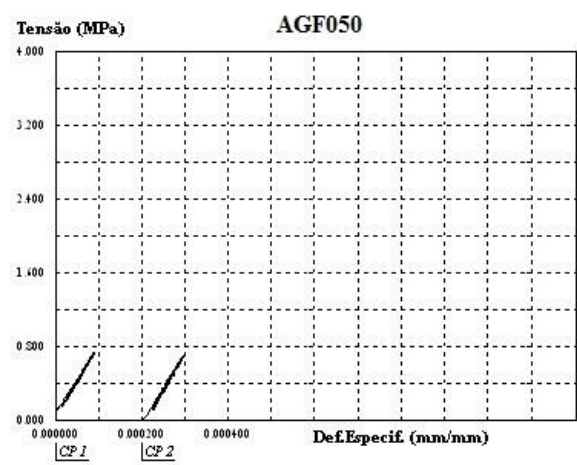
APÊNDICE A – Gráficos força *versus* tempo obtidos a partir dos ensaios de compressão axial realizados em laboratório na máquina universal de ensaios



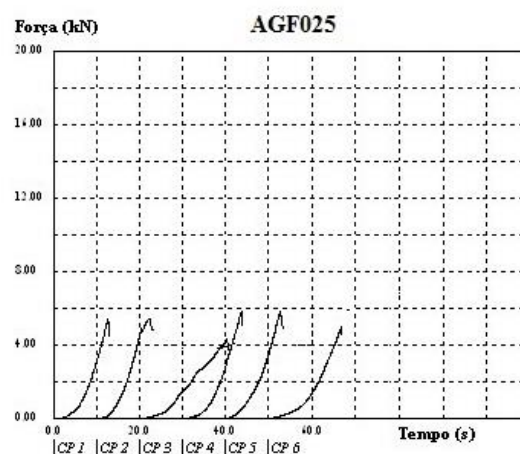
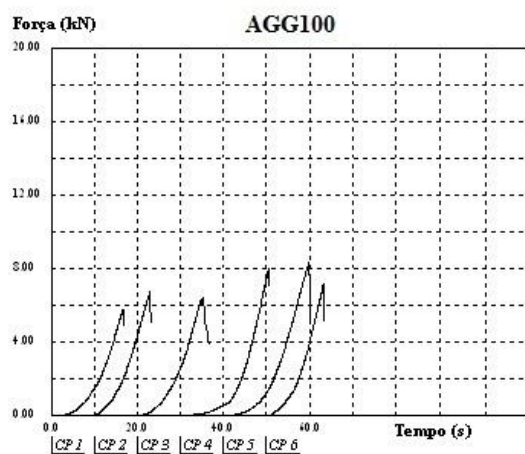
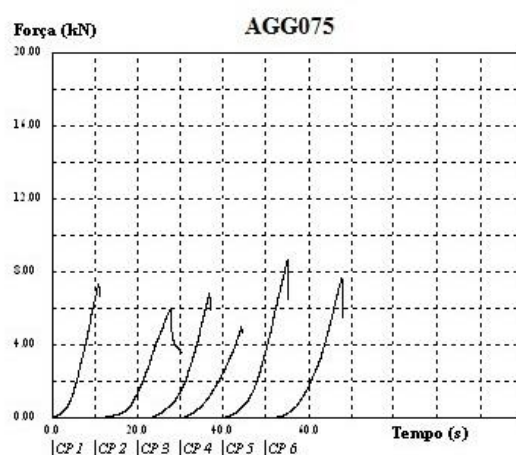
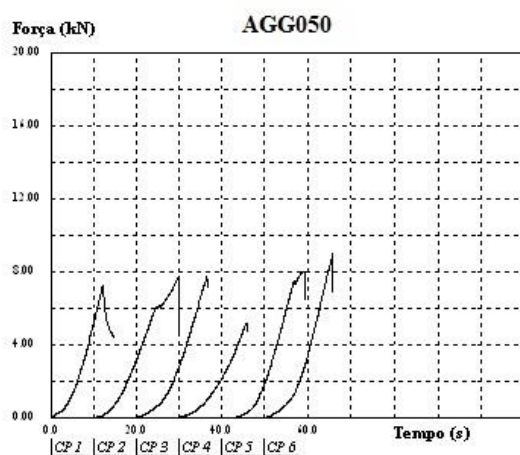
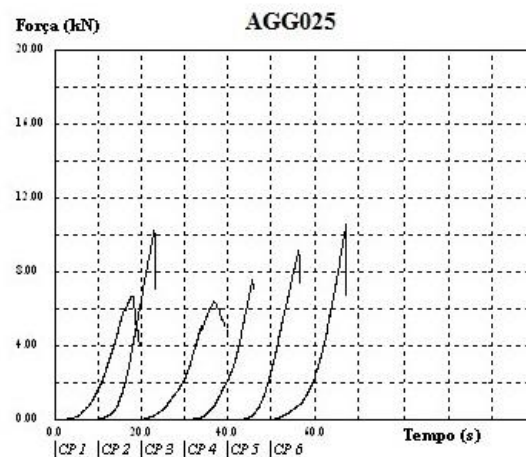
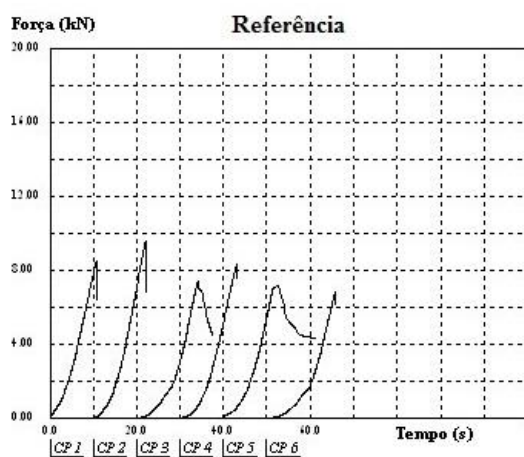


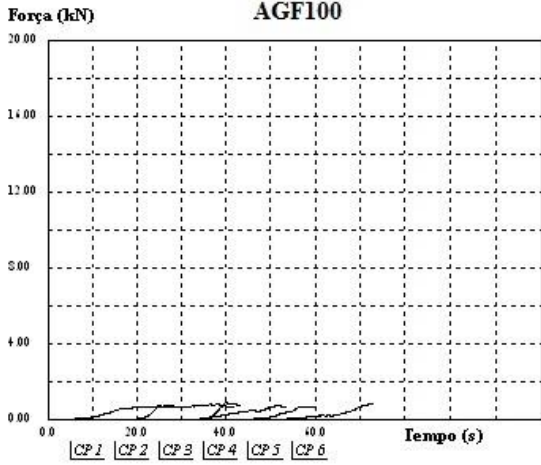
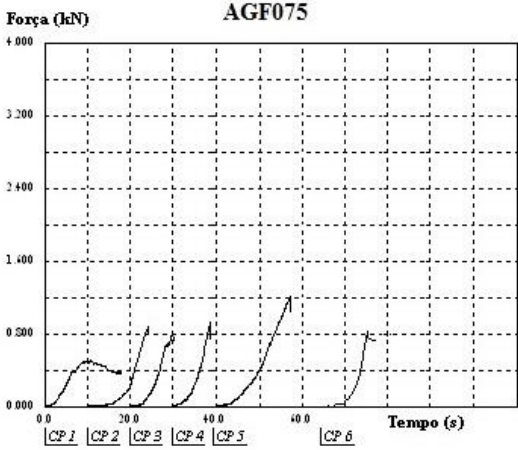
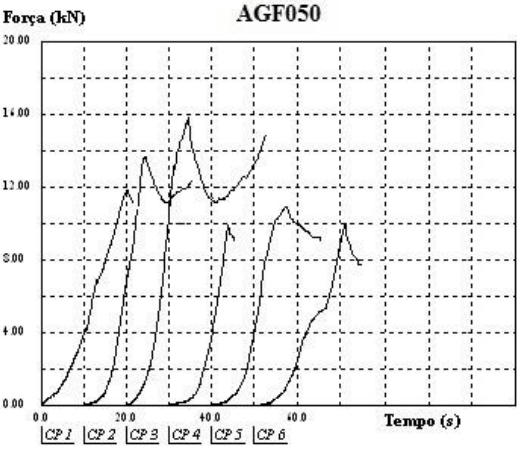
APÊNDICE B – Gráficos tensão *versus* deformação específica obtidos a partir dos ensaios de compressão axial utilizados para obtenção dos módulos de elasticidade





APÊNDICE C – Gráficos força versus tempo obtidos a partir dos ensaios de tração por compressão diametral





APÊNDICE D – Gráficos força versus deformação obtidos a partir dos ensaios de flexão em três pontos

