



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---



Ana Luiza Borges Marinho

Produção de ligantes para argamassa obtida a partir da reciclagem de resíduo sólido de siderurgia – Escória de Forno Panela

Ouro Preto  
2013

Ana Luiza Borges Marinho

Produção de ligantes para argamassa obtida a partir da reciclagem de resíduo sólido  
de siderurgia – Escória de Forno Panela

Monografia apresentada ao Curso de  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
de Ouro Preto como parte dos requisitos  
para a obtenção do Grau de Engenheiro  
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Ouro Preto  
2013

Ana Luiza Borges marinho

Produção de ligantes para argamassa obtida a partir da reciclagem de  
resíduo sólido de siderurgia - Escória de Forno Panela

Monografia de conclusão de curso para  
obtenção do Grau de Engenheiro Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto,  
defendida e aprovada em 06 de Setembro  
de 2013, pela banca examinadora  
constituída pelos professores:



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



Prof. Geraldo Donizetti de Paula (D.Sc.) – UFOP



Prof. Guilherme Jorge Brigolini Silva (D.Sc.) – UFOP

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me ajudar a superar todas as dificuldades e por colocar as pessoas certas para me auxiliarem na conclusão desta etapa em minha vida.

Agradeço aos meus pais e à toda a minha família pelas orações, apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

Agradeço ao Felipe, meu namorado, pela paciência, companheirismo e compreensão em todos os dias que dediquei minha atenção à monografia.

Agradeço ao professor Ricardo Fiorotti por todos os conselhos, orientação, ensinamentos e por acreditar em mim.

Agradeço ao Grupo de Pesquisas em Resíduos Sólidos Industriais (RECICLOS) por contribuir para a realização deste projeto. Aos seus membros por todo apoio nos ensaios e desenvolvimento da pesquisa.

## RESUMO

A preocupação ambiental diz respeito, entre outras coisas, ao consumo excessivo ou ineficiente de recursos naturais não renováveis (LEITE, 2001). O setor da construção civil é responsável por um consumo elevado de matérias primas naturais e assim, o crescimento acelerado do mercado da construção impacta cada vez mais o meio ambiente. E por isso, atualmente, a busca por soluções inovadoras e sustentáveis torna-se imprescindível. Deste modo, este trabalho propõe estudar a viabilidade da utilização da escória de Forno Panela substituindo a cal hidratada, normalmente empregada como um ligante para argamassas. A escória trata-se de um subproduto oriundo da fabricação de ferro gusa e do aço, constituída principalmente de silicatos de cálcio e silicato de magnésio, esse resíduo foi devidamente caracterizado e a sua pozolanicidade foi medida. Diante desta caracterização, todas as exigências químicas e físicas de uma cal hidratada para argamassa, conforme a Norma Brasileira NBR 7175/2003 foi ensaiada no resíduo siderúrgico e os resultados demonstraram que embora a material não atenda satisfatoriamente todos os resultados necessários, a escória de Forno Panela apresenta grande potencial como aglomerante, podendo ser realizadas novas pesquisas na qual substitui parcialmente aglomerante necessário à argamassa por escória de Forno Panela.

Palavra Chave: escória de forno panela; sustentabilidade, argamassa, resíduos siderúrgicos.

## **ABSTRACT**

Current environmental concerns include the excessive consumption and inefficient use of non-renewable natural resources (LEITE, 2001). The construction industry is responsible for a high consumption of natural raw materials and thus the rapid growth of the construction market increasingly impacts the environment. And so today, the search for innovative and sustainable solutions is indispensable. Thus, this paper proposes to study the feasibility of using slag Ladle Furnace replacing hydrated lime, usually used as a binder for mortar. The slag is a by-product is derived guso the manufacture of iron and steel mainly consists of calcium silicates and magnesium silicate, the residue was properly characterized and their pozzolanic was measured. Given this characterization, all the chemical and physical requirements of a hydrated lime mortar, as the Brazilian Standard NBR 7175/2003 steel was tested in the residue and the results showed that although the material does not satisfactorily meet all the necessary results, slag Ladle Furnace has great potential as a binder, further research can be conducted in which partially replaces the mortar binder required for Ladle Furnace slag.

Keyword: furnace slag pot, sustainability, mortar, steel waste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Ciclo da Cal Aérea .....	21
Figura 5.1: Amostra de escória utilizada nos ensaios .....	34
Figura 5.2: Amostra das quatro frações da areia normal brasileira .....	35
Figura 5.3: Material utilizado no ensaio .....	36
Figura 5.4: Destilação da água.....	37
Figura 5.5: Material armazenado.....	38
Figura 5.6: Peneirador utilizado no ensaio .....	40
Figura 5.7: Determinação da massa específica da escória Forno Panela .....	40
Figura 5.8: Processo para a determinação do teor de umidade.....	42
Figura 5.9: Condutímetro utilizado.....	44
Figura 5.10: Aparelho de Vicat.....	44
Figura 5.11: Água presente na lavagem do material sobre o jogo de peneiras com abertura de malha de 0,75 mm e 1,18 mm.....	45
Figura 5.12: Argamassa posta no prato com fundo perfurado .....	47
Figura 5.13: Instrumentos e materiais utilizados no ensaio.....	48
Figura 5.14: Parte do ensaio de Determinação da Plasticidade.....	49
Figura 6.1.: Composição granulométrica da CH e da EFP .....	51
Figura 6.2.: Massa específica dos agregados .....	52
Figura 6.3: Resistência compressão 7dias da EFP .....	54
Figura 6.4: Dados da condutividade elétrica das amostras ensaiadas.....	55
Figura 6.5: 1ª observação das amostras após repouso de (18±2)h à temperatura de 40°C .....	57
Figura 6.6: 2ª observação das amostras após repouso de 5h à temperatura de 100°C .....	57
Figura 6.7: Resultados do ensaio de retenção de água .....	58
Figura 6.8: Resultados do ensaio de incorporação de areia .....	59
Figura 6.9: Resultados do ensaio de determinação de plasticidade .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Análise Química do material utilizado.....	33
Tabela 5.2: Análise Mineralógica do material utilizado.....	34
Tabela 5.3: Requisitos químicos e físicos do hidróxido de cálcio – adaptada da NBR 5751. ....	36
Tabela 5.4: Características da cal utilizada.....	38
Tabela 5.5: Distribuição de peneiras serie normal e intermediária.....	39
Tabela 6.1: Análise de óxidos do material utilizado.....	50
Tabela 6.2: Análise Mineralógica do material utilizado.....	50
Tabela 6.3: Resultado do ensaio.....	51
Tabela 6.4: Dados do ensaio de atividade pozolânica com a EFP.....	53
Tabela 6.5: Dados do ensaio do Método de Luxan .....	54
Tabela 6.6: Dados do ensaio de consistência normal .....	55
Tabela 6.7: Resultados dos ensaios de teor pulverulento.....	56
Tabela 6.8: Resultados obtidos no ensaio. ....	59

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>13</b>
	2.1 <i>Objetivo geral</i> .....	13
	2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	13
<b>3</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>14</b>
	4.1 <i>Resíduos sólidos industriais</i> .....	14
	4.2 <i>Escoria de Forno Panela</i> .....	15
	4.3 <i>Pozolanas</i> .....	16

4.3.1	Conceituação .....	16
4.3.2	Classificação das Pozolanas.....	16
4.3.3	Reação Pozolânica.....	17
4.3.4	Métodos para a determinação da pozolanicidade .....	18
4.3.4.1	Método de Luxan – ASTM.....	18
4.3.4.2	Método proposto pela NBR 5751 (ABNT, 2012) .....	18
4.4	<i>Aglomerantes</i> .....	20
4.4.1	Conceituação .....	20
4.4.2	Classificação dos aglomerantes.....	20
4.5	<i>Cal</i> .....	20
4.5.1	Cal Aérea .....	20
4.5.1.1	Classificação da cal aérea:.....	21
4.5.1.2	Ciclo da Cal Aérea .....	21
4.5.1.3	Cal Virgem.....	22
4.5.1.3.1	Conceituação.....	22
4.5.1.3.2	Classificação da Cal virgem.....	22
4.5.1.3.3	Exigências químicas e físicas da cal virgem.....	23
4.5.1.4	Cal Hidratada .....	23
4.5.1.4.1	Conceituação.....	23
4.5.1.4.2	Classificação da Cal Hidratada.....	24
4.5.1.4.3	Exigências químicas e físicas da Cal Hidratada .....	24
4.5.1.5	Cal Hidráulica .....	25
4.5.2	Aplicações da Cal na Construção Civil.....	25
4.6	<i>Argamassa</i> .....	26
4.6.1	Conceituação .....	26
4.6.3	Classificação das Argamassas.....	26
4.6.4	Dosagem das Argamassas .....	27
4.6.6	Propriedades das Argamassas .....	28
4.6.6.1	Propriedades das Argamassas no estado fresco .....	28
4.6.6.3	Propriedades das Argamassas no estado endurecido.....	30
4.6.7	Funções das Argamassas .....	32

<b>5</b>	<b>Metodologia</b>	<b>33</b>
5.1	<i>Materiais</i>	33
5.1.1	Escória de forno panela	33
5.1.2	Agregados miúdo	34
5.1.3	Hidróxido de Cálcio	35
5.1.4	Água	36
5.1.5	Água Destilada	37
5.1.6	Solução de Hidróxido de Cálcio	37
5.1.7	Cal hidratada	37
5.2	<i>Métodos</i>	38
5.2.1	Caracterização das amostras de escória	38
5.2.2	Composição granulométrica	39
5.2.3	Massa específica	40
5.2.4	Determinação do teor de umidade	41
5.2.5	Índice de atividade pozolânica	42
5.2.6	Método de Luxan	43
5.2.7	Ensaio da determinação da consistência normal	44
5.2.8	Determinação do teor de material pulverulento para ligantes	45
5.2.9	Ensaio para a determinação da estabilidade	46
5.2.10	Ensaio de determinação da retenção de água	46
5.2.11	Capacidade de incorporação de areia	48
5.2.12	Ensaio de determinação da plasticidade	48
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
6.1	<i>Análise Química e Mineralógica</i>	49
6.2	<i>Composição Granulométrica</i>	50
6.3	<i>Massa específica</i>	51
6.4	<i>Determinação do teor de umidade</i>	52
6.5	<i>Índice de atividade pozolânica</i>	53
6.6	<i>Método de Luxan</i>	54
6.7	<i>Índice de Consistência Normal</i>	55

6.8	<i>Ensaio para determinação do teor de pulverulento .....</i>	<i>56</i>
6.9	<i>Ensaio para determinação da estabilidade.....</i>	<i>56</i>
6.10	<i>Ensaio para determinação da retenção de água .....</i>	<i>57</i>
6.11	<i>Ensaio para determinação da capacidade de incorporação de areia.....</i>	<i>58</i>
6.12	<i>Ensaio para a determinação da plasticidade .....</i>	<i>59</i>
<b>7</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é considerada uma das maiores consumidoras de matérias primas naturais, contribuindo assim, de maneira relevante, para uma grande degradação do meio ambiente. Segunda estimativa de John (2000) a construção utiliza entre 20 a 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade. São calcários, argilas, areias, entre outros. É uma voraz consumidora de água e energia, no processo construtivo, na produção dos materiais, criando um ciclo que eleva a geração dos resíduos e a extinção gradativa dos recursos naturais.

Antes, assunto que se limitava aos estudiosos e militantes, a questão do meio ambiente virou tema mundial e hoje encontra-se presente nos mais diversos segmentos da sociedade. A preocupação com a preservação do meio ambiente já é vista como prioridade pelos poderes públicos e a adesão da sociedade se faz cada vez mais necessária (OLIVEIRA,2008).

Perante isso, a engenharia moderna vem sendo obrigada a trabalhar em ter variáveis consideradas como básicas e que foram historicamente ignoradas: responsabilidade ambiental, responsabilidade social e sustentabilidade. O fato é que, a engenharia deve se aproximar das reais necessidades humanas, principalmente porque a indústria da construção civil é protagonista no cenário atual de poluição ambiental (DEL CARLO, 2008).

A mudança de mentalidade quanto ao uso de materiais sustentáveis, amplamente discutida nos foros nacionais e internacionais, nos últimos anos, tem mobilizado a opinião pública e assumido um papel preponderante nas comunidades.

Assim, o aproveitamento de resíduos na construção civil está se tornando cada vez mais frequente, já que os materiais alternativos geralmente são mais baratos e, muitas vezes, possuem características de resistência e durabilidade melhores que os materiais convencionais.

Outro fator importante, que faz com que as pesquisas na área cresçam a cada dia é o fato que muitos rejeitos, sejam industriais ou urbanos, acabam por poluir o meio-ambiente, causando problemas de armazenagem de certos produtos.

Numa usina siderúrgica é gerada uma grande quantidade de resíduos industriais, resíduos estes que para serem descartados apresentam inúmeros inconvenientes, tais como (GALDEANO et al, 1994):

- necessidade de grandes áreas para o descarte;

- elevado custo de transporte e preparação da área de descarte;
- perda de materiais;
- agressão ao meio-ambiente.

Pelo simples fato de que a siderurgia lida diariamente com quantidades imensas de matérias-primas e energia, o seu impacto ambiental sempre foi importante.

Nos processos pirometalúrgicos, além da fase líquida constituída pelo banho metálico, está quase sempre presente uma fase líquida de natureza não-metálica, denominada escória (LÚCIO, 1981).

Tendo em vista o panorama que se encontra atualmente, apresenta-se a proposta de trabalho a fim de contribuir de maneira significativa, ao desenvolvimento de novas possibilidades para fabricação de produtos de base tecnológica para aplicação na construção civil, a partir da fabricação de um aglomerante para argamassa através de escoria de Forno Panela. De forma viável, técnica e econômica.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Produzir aglomerante para argamassas a partir da substituição da cal hidratada pela escória siderúrgica de forno panela.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterização física dos aglomerantes para produção de argamassa.
- Caracterização física e ambiental do material proveniente da siderúrgica para produção da argamassa.
- Caracterizar as argamassas formuladas com a escória através dos ensaios de índice de consistência, retenção de água, finura, estabilidade, plasticidade e incorporação de areia.
- Avaliação dos parâmetros relacionados às exigências físicas e químicas com o uso do material na produção da argamassa, conforme a norma NBR 7175.
- Desenvolver metodologia para processamento de escórias de forno panela com vistas à produção de aglomerantes para argamassas

- Disponibilizar informações relacionadas à viabilidade do uso desses resíduos como aglomerante na argamassa.

### **3 JUSTIFICATIVA**

Segundo o Instituto de Aço Brasil a atividade siderúrgica gera anualmente o equivalente de 0,7 a 1,3 milhões de toneladas de escória. O grande volume de resíduos gerados, o pequeno percentual de reaproveitamento e a inadequada destinação destes causam um expressivo impacto ambiental, que pode ser observado através da poluição visual dos pátios de estocagem, da esterilidade provocada nas áreas destes pátios, da contaminação dos rios em virtude do carregamento de partículas finas para os cursos de água, dentre outros.

A reciclagem tem sido desenvolvida para melhorar a qualidade ambiental, diminuindo assim, os resíduos gerados pela atividade industrial. As empresas estão se conscientizando de que a geração de resíduos gera custos, pois requer seu tratamento e disposição em locais apropriados. As indústrias vêm buscando opções para diminuir os custos visando à redução dos impactos ambientais e o aumento da credibilidade perante o mercado consumidor.

A construção civil, setor de grande importância econômica, e também responsável por grande parte dos recursos naturais extraídos e pela produção de resíduos degrada de forma incisiva o meio ambiente.

Só no Brasil, o consumo de argamassas para assentamento de blocos e revestimento é em torno de 100 milhões de toneladas por ano. (ABAI, 2009)

Considerando a geração de rejeitos e o consumo de materiais naturais, este trabalho pretende contribuir para a sustentabilidade dos setores de siderurgia e construção civil, sugerindo produção de um aglomerante para argamassas, produzido integralmente com escória de Forno Panela.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 Resíduos sólidos industriais**

A norma NBR 10004/04 que classifica os resíduos, define os mesmos como resíduos sólidos ou semissólidos, que resultam de atividade de origem industrial

dentre outras. Esses resíduos podem ser classificados como perigosos e não perigosos. O anexo 1 apresenta a classificação segundo a norma.

A construção civil não gera resíduos perigosos ao meio ambiente, no entanto é responsável pelo consumo de 20-50% dos recursos naturais do planeta (SJÖSTRÖM, 1996). Estes estudos revelam, ainda, que 53% dos resíduos perigosos são tratados, 31% são armazenados e os 16% restantes são depositados no solo.

Levando em consideração o papel econômico e social desempenhado pela indústria da construção civil no Brasil, pode-se assegurar que ações que impliquem em melhorias ambientais são de suma importância para o alcance do desenvolvimento sustentável. Sabe-se, ainda, que a indústria da construção civil possui grande potencial para a solução dos problemas apresentados, visto que este setor apresenta viabilidade de incorporação de resíduos nos materiais de construção, permitindo, ainda, redução nos custos dos produtos da construção (ÂNGULO et al., 2000).

#### **4.2 Escória de Forno Panela**

A escória de alto-forno é um resíduo obtido nas siderúrgicas no processo de redução de minério de ferro. Pode ser classificada em básica ou ácida em função do tipo de carvão utilizado, mineral ou vegetal.

Ao sair do alto-forno a escória é submetida a um resfriamento, que quando é feito com grande quantidade de água é denominado brusco, e produz a escória granulada, a qual é parcialmente utilizada pela indústria cimenteira, podendo ser empregada também como agregado miúdo ou como parte do aglomerante. O resfriamento brusco, ao provocar a vitrificação do material, aumenta sua pozolanicidade. As pozolanas por si só não apresentam qualidades cimentantes, mas em presença de umidade reagem com o hidróxido de cálcio, formando produtos com propriedades específicas comparáveis ao cimento Portland comum (Couto et al, 2006). As pozolanas mais utilizadas atualmente têm sido a microssílica, o carvão ativado e a escória de alto-forno básica. (Almeida, 2008).

A composição química da escória é determinada pelos elementos que contribuem na sua formação: a ganga (material inerte do minério), os fundentes (substâncias ou materiais que auxiliam a fusão dos metais) e as cinzas do

combustível utilizado (carvão vegetal ou coque). Os principais componentes da escória de alto-forno são: sílica -  $\text{SiO}_2$ , alumina -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ambos provenientes da ganga) e cal -  $\text{CaO}$  (proveniente do calcário utilizado como fundente) (Starling, et al, 1990).

Uma das propriedades mais importantes da escória, sob o ponto de vista siderúrgico, é a sua fluidez, a qual depende da relação entre os teores de cal e sílica, denominada índice de basicidade simplificado. A proporção de cal tem importância especial para a remoção do enxofre, originária do carvão mineral. Em altos fornos a carvão vegetal, esta circunstância tem importância secundária, já que este tipo de combustível não contém quase nenhum enxofre. As escórias obtidas em fornos a carvão vegetal apresentam então a sílica como componente predominante e são classificadas como ácidas, enquanto as escórias obtidas em fornos a carvão mineral são básicas.

### **4.3 Pozolanas**

#### **4.3.1 Conceituação**

Segundo a NBR 12653/2012, a exemplo da definição dada pela American Society for Testing and Materials (ASTM), em sua norma C 125-03, pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

#### **4.3.2 Classificação das Pozolanas**

A norma NBR 12653 (ABNT, 2012) classifica as pozolanas, em função da origem, da seguinte forma:

- Pozolanas naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de  $\text{SiO}_2$ ) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica;
- Pozolanas artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica;

- Argilas calcinadas: materiais provenientes de calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500 e 900°C, de modo a garantir sua reatividade com hidróxido de cálcio;
- Cinzas volantes: resíduos finamente divididos com atividade pozolânica que resultam da combustão do carvão mineral pulverizado ou granulado;
- Outros materiais: materiais não tradicionais, tais como: escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral.

A NBR 12653 (ABNT, 2012) classifica também, os materiais pozolânicos segundo, suas características físicas e químicas, em três classes, N, C e E. No anexo 2 são exibidas as exigências químicas e físicas para as diferentes classes.

- Classe N: enquadram tanto pozolanas naturais quanto artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
- Classe C: cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.
- Classe E: pozolanas cujos requisitos diferem das classes anteriores.

### 4.3.3 Reação Pozolânica

A reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada reação pozolânica. A reação é lenta. Portanto, as taxas de liberação de calor e desenvolvimento da resistência são lentas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A sílica amorfa presente na pozolana reage com o hidróxido de cálcio formando silicatos de cálcio hidratados, C-S-H, tal como a equação 4.1 (CORDEIRO, 2006).



Para que haja atividade pozolânica é necessário que a sílica e a alumina não estejam em elevado grau de cristalinidade. A reatividade pozolânica está, portanto, ligada à sua estrutura interna, ela será tanto maior quanto mais longe estiver do seu estado cristalino (NEVILLE, 1982). Qualquer material que possui apenas uma ordem de curto alcance de átomos ou íons é um material amorfo (ou seja, não cristalino). (ASKELAND, 2008).

É fundamental a determinação do teor de vidro ou de material vítreo (sílica amorfa) da pozolana, pois este influencia a reatividade da mesma, e este teor pode ser avaliado pela difração de raios-X. Esse método permite avaliar se o material apresenta-se amorfo ou cristalino. (VAN VLACK, 1984).

Além da composição dos compostos, a finura afeta a sua reatividade com a água, por isso é muito importante caracterizar esse tipo de material quanto à granulometria, pois, sendo um material fino, preenche os vazios, apresentando o efeito secundário de filler. Com esses dois efeitos, efeito físico e químico, um material pozolânico substitui o cimento com vantagem, desde que não implique em aumento da relação água/cimento, pois quanto mais fino for o material, maior será a quantidade de água requerida na mistura (RODRIGUES, 2008). É válido ressaltar que a pozolana apresenta eficiência até certos percentuais de substituição, pois o efeito químico da mesma depende da disponibilidade de hidróxido de cálcio liberado pela reação do cimento (ISAIA, 1995).

#### **4.3.4 Métodos para a determinação da pozolanicidade**

##### **4.3.4.1 Método de Luxan – ASTM**

A determinação da atividade pozolânica prevista por Luxan et al., (1989) consiste em medir a pozolanicidade através da variação de condutividade de uma solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  antes e depois de 2 minutos da pozolana ser adicionada e misturada de forma contínua na solução a  $40^\circ\text{C}$  (5g de pozolana para 200ml de solução). Após a adição da pozolana, a condutividade decresce devido à menor quantidade de íons  $\text{Ca}^{+2}$  e  $(\text{OH})^-$  na solução. É possível classificar o material da seguinte forma:

- Materiais sem atividade pozolânica:  $\Delta < 0,4 \text{ mS/cm}$ .
- Materiais de atividade pozolânica moderada:  $\Delta < 1,2 \text{ mS/cm}$ .
- Materiais de boa atividade pozolânica:  $\Delta > 1,2 \text{ mS/cm}$ .

##### **4.3.4.2 Método proposto pela NBR 5751 (ABNT, 2012)**

Esta norma prescreve um método de determinação do índice de atividade pozolânica com cal. Trata-se de um método físico de determinação da pozolanicidade.

Os ensaios envolvendo a medição da resistência mecânica de mistura pozolana/cal podem ser executados em argamassas (pozolanas +  $\text{Ca(OH)}_2$  + areia + água) ou em pastas (pozolanas +  $\text{Ca(OH)}_2$  + água). A opção pelas argamassas representa uma tentativa de ensaiar o material sob condições mais próximas daquelas empregadas correntemente. Entretanto, a interação entre as curvas granulométricas da areia e da pozolana pode mascarar ligeiramente as medições e contribuir para a obtenção de resultados diferenciados.

Segundo ZAMPIERE (1993), a realização deste ensaio tem como objetivo eliminar as variações decorrentes dos desempenhos diferenciados dos cimentos. Muitos autores (REGO, 2004 e POUHEY,2006) têm optado por investigar a qualidade dos materiais pozolânicos em misturas com cal hidratada.

Para WEBER (2001), este ensaio não é muito utilizado devido à variação na qualidade da cal e seu reflexo sobre os resultados obtidos neste ensaio.

#### **4.3.4.3 Método proposto pela NBR 5752 (ABNT, 2012)**

Esta norma descreve o método de determinação do índice de atividade pozolânicas com o cimento Portland. Trata-se de um método físico de determinação da pozolanicidade.

O método de ensaio é avaliado em função do desempenho mecânico de duas argamassas, preparadas com o proporcionamento e a consistência padronizados. A primeira argamassa tem o traço 1:3 (em massa) de cimento e areia normal, ajustando-se a água para um índice de consistência de  $(225 \pm 5)$ mm conforme NBR 7215 (ABNT, 1982); na segunda, 35% do volume de cimento utilizado na primeira argamassa é substituído por pozolana, acrescentando-se água da mesma maneira descrita para a primeira argamassa, até o índice de consistência especificado.

É um método com algumas limitações já que os resultados podem ser facilmente influenciados por fatores externos, como por exemplo, a composição do cimento usado e a variação da relação água/aglomerante (GAVA,1999; WEBER,2001)

## **4.4 Aglomerantes**

### **4.4.1 Conceituação**

Aglomerantes são produtos empregados na construção civil para fixar ou aglomerar materiais entre si. Constituem o elemento ativo que entra na composição das pastas, argamassas e concretos. São geralmente materiais pulverulentos que, misturados intimamente com água, formam uma pasta capaz de endurecer por simples secagem, ou então, o que é mais geral, em virtude de reações químicas. (CARVALHO, 2009)

Tem como principais matérias prima: argila, gipsita, calcário e dolomito.

### **4.4.2 Classificação dos aglomerantes**

Os aglomerantes podem ser classificados, em função do processo de endurecimento, da seguinte forma:

- Aglomerantes aéreos: São os aglomerantes que necessitam estar em contato com o ar para que o processo de endurecimento se manifeste. Os seus produtos de hidratação não resistem à água. Tais como cal aérea, gessos, etc.
- Aglomerantes hidráulicos: São os aglomerantes que o endurecimento ocorre por reações químicas entre seus constituintes e a água, independente do ar. Os seus produtos de hidratação também são resistentes à água. Tais como cimentos, cal hidráulica.
- Aglomerantes quimicamente inertes: Barro e materiais betuminosos.

## **4.5 Cal**

A cal é um aglomerante inorgânico, produzido a partir de rochas calcárias, composto basicamente de cálcio e de magnésio, que apresenta como um pó muito fino. (CINCOTTO e JONH, 2003).

Existem dois tipos de cales: cal aérea (cal virgem e cal hidratada) e a cal hidráulica.

### **4.5.1 Cal Aérea**

Cal aérea é um tipo de aglomerante que endurece pela ação química do  $\text{CO}_2$  no ar.

#### 4.5.1.1 Classificação da cal aérea:

A cal aérea pode ser classificada quanto ao teor de impurezas.

- Cal Gorda: 90% CaO, mínimo, branca, melhor qualidade e rendimento.
- Cal Magra: o teor de magnésio supera 20% e pode atingir até 50% do volume.

O problema básico da magnésia é que sua extinção é muito mais lenta que a do CaO, o que pode prejudicar seriamente os revestimentos com ela executados.

#### 4.5.1.2 Ciclo da Cal Aérea

A figura 4.1 representa o ciclo da cal aérea, mostrando desde da sua fabricação, na qual utiliza-se como matéria prima o calcário (Carbonato de Cálcio) com teor desprezível de argila até a fabricação da argamassa endurecida na qual a cal aérea já foi desenvolvida. O anexo 3 apresenta todas as reações para a fabricação da cal.

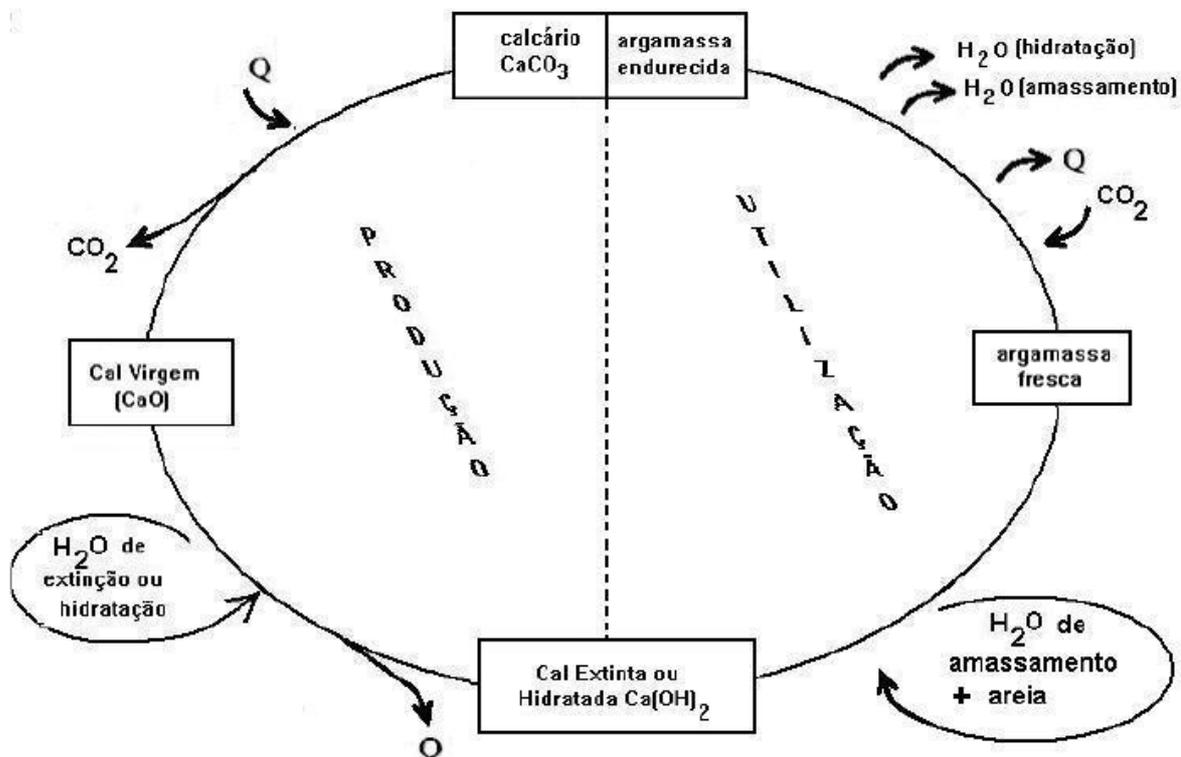


Figura 4.1: Ciclo da Cal Aérea

### **4.5.1.3 Cal Virgem**

#### **4.5.1.3.1 Conceituação**

Segundo a NBR 6453/2003 cal virgem é o produto obtido pela calcinação de carbonatos de cálcio e/ou magnésio, constituído essencialmente de uma mistura de óxido de cálcio e óxido de magnésio, ou ainda de uma mistura de óxido de cálcio, óxido de magnésio e hidróxido de cálcio.

#### **4.5.1.3.2 Classificação da Cal virgem**

O comportamento de diferentes qualidades da cal na extinção é muito variável, devendo-se tomar cuidado a isto para que essa operação seja compensada pela obtenção de uma pasta melhor e em maior quantidade.

Para classificar a cal quanto à rapidez de extinção, colocam-se em um pequeno tacho, dois ou três fragmentos da cal do tamanho de um punho fechado ou no caso de pedras menores, uma quantidade equivalente. Adiciona-se água até cobrir a cal e observa-se o tempo que decorre até que o fenômeno da extinção se inicie (esse fenômeno começa quando há fragmentos que se soltam ou que se esboroam).

Se a extinção começar:

- Em menos de cinco minutos, diz-se que a cal é de extinção rápida;
- Entre cinco e trinta minutos, diz-se que a cal é de extinção média;
- Depois de trinta minutos, diz-se que a cal é de extinção lenta.

Para se extinguir a cal de extinção rápida, deve-se adicionar sempre cal a água e não água a cal. A água deve ser inicialmente suficiente para cobrir completamente toda a cal. Observar constantemente a cal e a mais leve aparência de desprendimento de vapor, revolver inteira e rapidamente a massa e adicionar-lhe água, até cessar o desprendimento. Não rezear colocar muita água com esse tipo de cal.

Para se extinguir a cal de extinção média, deve-se adicionar água a cal e empregar inicialmente água suficiente para que a cal fique meio submersa. Mexer ocasionalmente se houver desprendimento de vapor e ir adicionando aos poucos a água necessária para evitar que a pasta resulte seca e friável. Ter cuidado em não adicionar mais água do que o necessário e nem muita água de uma só vez.

Para se extinguir a cal de extinção lenta, deve-se adicionar água a cal para umedecê-la completamente e deixar o material na caixa até que a reação se inicie. Adicionar cautelosamente a água necessária um pouco por vez, tomando cuidado para não provocar o resfriamento da massa por água adicionada em excesso. Não se deve mexer enquanto a extinção não estiver completamente completa.

#### **4.5.1.3.3 Exigências químicas e físicas da cal virgem**

A NBR 6453/2003 especifica os requisitos exigíveis no recebimento da cal virgem a ser empregada na construção civil. O anexo 4 explicita todas as exigências presentes na norma.

##### CONDIÇÕES QUÍMICAS:

Para fins de verificação das exigências químicas da cal virgem, devem ser seguidas as NBR 6471/1998 e NBR 6473/2003, e deve atender às seguintes condições:

- Porcentagem máxima de 15% de anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>);
- Porcentagem mínima de 88% de óxidos básicos na base não volátil (CaO + MgO);
- Porcentagem máxima de 4% de água combinada.

##### CONDIÇÕES FÍSICAS:

As exigências físicas devem ser verificadas de acordo com os métodos de ensaios indicados nas normas NM 159/2000 e NM 249/2001. A cal virgem deve atender a seguinte condição:

- Porcentagem máxima retida na peneira 1,00mm de 5%
- Porcentagem máxima retida na peneira 0,30mm de 30%

#### **4.5.1.4 Cal Hidratada**

##### **4.5.1.4.1 Conceituação**

Segundo a NBR 7175/2003 cal hidratada é o pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e

hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

#### 4.5.1.4.2 Classificação da Cal Hidratada

A cal hidratada deve ser designada conforme os teores de óxidos não hidratados e de carbonatos, pelos seguintes tipos e siglas:

- CH-I (cal hidratada especial)
  - ✓  $\text{Ca(OH)}_2$  (Jazida de calcário cálcico, boa queima)
  - ✓  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$  (Jazida de calcário dolomítico, boa queima e completa hidratação)
  
- CH-II (cal hidratada comum)
  - ✓  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2 + \text{MgO}$  (A hidratação do óxido de magnésio é muito demorada e difícil)
  
- CH-III (cal hidratada comum com carbonatos)

#### 4.5.1.4.3 Exigências químicas e físicas da Cal Hidratada

A NBR 7175/2003 fixa as características exigíveis no recebimento de cal hidratada destinada a ser empregada em argamassas para a construção civil. O anexo 5 explicita todas as exigências presentes na norma.

##### CONDIÇÕES QUÍMICAS:

Para fins de verificação das exigências químicas da cal hidratada, deve ser seguida as normas NBR 6471/1998 e NBR 6473/2003 e deve atender às condições indicadas abaixo:

- Porcentagem máxima de 15% de anidrido carbônico ( $\text{CO}_2$ );
- Porcentagem máxima de 15% de óxido não hidratado;
- Porcentagem mínima de 88% de óxidos totais na base não volátil ( $\text{CaO} + \text{MgO}$ ).

### CONDIÇÕES FÍSICAS:

As exigências físicas devem ser verificadas de acordo com os métodos de ensaios indicados nas normas NBR 9289/2000, NBR 9205/2001, NBR9206/2003, NBR9207/2003 e na NBR9290/1996. A cal hidratada deve atender a seguinte condição:

- Porcentagem máxima retida na peneira de malha 0,60mm de 0,5%
- Porcentagem máxima retida na peneira de malha 0,075mm de 15%
- Ausência de cavidades e protuberâncias;
- Porcentagem mínima de 70% de retenção de água;
- Porcentagem mínima de 110% de plasticidade;
- Porcentagem mínima de 2,2% de incorporação de areia.

#### **4.5.1.5 Cal Hidráulica**

A cal hidráulica pode ser classificada como um produto intermediário entre a cal virgem e o cimento Portland. Resulta da calcinação de calcários argilosos. Procedimento que produz a combinação do hidróxido de cálcio com a sílica-quartzo e os minerais argilosos, formando relativa alta na porcentagem de compostos com propriedades hidráulicas (GUIMARÃES, 2002).

#### **4.5.2 Aplicações da Cal na Construção Civil**

A cal possui as mais diversas aplicações. Normalmente é utilizada na indústria química, petroquímica, alcoolquímica, alimentícia, farmacêutica, metalúrgica, e, sobretudo na construção civil. Pode ser utilizada na produção de argamassas para revestimento, pinturas, na estabilização de solos, na pavimentação asfáltica, e inclusive no saneamento básico, para tratamento de água.

Na área da construção civil existe uma experiência de séculos. As argamassas à base de cal são duradouras, não abrem fendas, suportam os choques climáticos, oferecem maior resistência à propagação de sons, têm uma melhor trabalhabilidade e são um obstáculo à penetração da água - o pior inimigo das construções.

Em função de algumas propriedades que possui, devemos ter em conta algumas características importantes para sua utilização:

- Endurece facilmente em contato com o ar;

- Quando utilizada com argamassa de revestimento, não deve receber outra camada superior antes de alguns dias, para que endureça;
- Em geral encontrada no mercado em sacos de 8, 20, 25 e 40 kg;
- A cal reduz a permeabilidade da argamassa, aumenta a sua plasticidade e a trabalhabilidade;
- Diminui o custo da argamassa.

## **4.6 Argamassa**

### **4.6.1 Conceituação**

Segundo a NBR 13281/ 2005, argamassas são materiais de construção com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir de mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água, podendo conter aditivos ou adições minerais, e ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

Têm grande uso na construção civil no assentamento de alvenarias e no revestimento em geral, emboço, reboco ou revestimento de camada única de paredes e tetos.

### **4.6.3 Classificação das Argamassas**

A NBR 13530/1995 descreve a classificação das argamassas segundos vários critérios:

- Quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea e hidráulica;
- Quanto ao número de aglomerantes: argamassa simples e mista;
- Quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, de cimento e de cimento e cal;
- Quanto à função do revestimento: argamassa de chapisco, de emboço e de reboco;
- Quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa dosada em central, preparada em obra, industrializada e mistura semipronta para argamassa;
- Quanto a propriedades especiais: argamassa aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica, hidrófuga e termoisolante.

Usualmente nas obras utilizam-se as argamassas de cal, argamassas de cimento e areia e as argamassas de cimento, cal e areia, mais conhecidas como argamassas mistas. A argamassa de cal é composta por cal, agregado miúdo e água. A pasta de cal preenche os vazios entre os grãos do agregado miúdo, melhorando a plasticidade e a retenção de água. A argamassa de cimento Portland é composta, essencialmente, por cimento, agregado miúdo e água. Adquire elevada resistência mecânica em pouco tempo, porém, tem pouca trabalhabilidade e baixa retenção de água. Este tipo de argamassa tem emprego específico para certas situações, como por exemplo, na confecção de pisos como argamassa armada ou na confecção de chapisco, sendo raramente utilizadas em revestimentos de alvenaria. A argamassa mista utiliza basicamente cimento, cal, agregado miúdo e água. Segundo SABBATINI (1984), os ingleses utilizam a proporção 1: 3 (aglomerante: areia seca) em volume como traço básico, pois partem do princípio de que com esta proporção os vazios da areia são preenchidos pela pasta aglomerante.

#### **4.6.4 Dosagem das Argamassas**

O adequado desempenho das argamassas depende fundamentalmente da correta escolha dos materiais e de seu proporcionamento, cujas operações são denominadas de dosagem (LARA et al., 1995).

Segundo CARNEIRO (1999), usualmente a composição e a dosagem das argamassas adotadas no Brasil são feitas com base em traços (massa ou volume) descritos ou especificados em normas internacionais ou nacionais, como Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e cadernos de encargos. De acordo com o mesmo autor, para argamassas de revestimentos tem-se adotado com mais frequência os traços de dosagem 1: 1: 6 (cimento: cal: areia) e 1: 2: 9, em volume, numa proporção aglomerante: agregado de 1: 3 ou 1: 4. A escolha de um desses traços está de acordo com o desempenho esperado da argamassa ao longo do tempo, ou seja, sua durabilidade. No entanto, na prática identifica-se o emprego de traços mais pobres, como 1: 4 a 1: 9 (aglomerante: agregado), como constataram CAMPITELI et al. (1995), não dando qualidade ao revestimento.

Os traços variam de acordo com a utilização que vai ser dada à argamassa. O anexo 6 apresenta os traços indicados para as utilizações mais comuns das

argamassas segundo Tabela de Composições de Preços para Orçamentos - TCPO 10.

#### **4.6.6 Propriedades das Argamassas**

A avaliação do desempenho dos materiais de construção é considerada como um fator de grande importância (KRUS et AL, 1997). Para que se possa prever o desempenho dos materiais de construção quando da sua exposição às intempéries, as propriedades dos mesmos precisam ser estudadas anteriormente as suas aplicações. A análise da relação entre a microestrutura e as propriedades contribui positivamente para o desempenho dos mesmos (QUENARD et al, 1998).

##### **4.6.6.1 Propriedades das Argamassas no estado fresco**

###### Consistência

Segundo CINCOTTO et al. (1995) a consistência é a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a resistir à deformação. Diversos autores classificam as argamassas, segundo a consistência, em secas (a pasta preenche os vazios entre os grãos), plásticas (a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados) e fluidas (os grãos ficam imersos na pasta). A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante. Em geral, nas argamassas de consistência plástica a fluida pode se manifestar a exsudação de água, que é uma propriedade que também interfere na trabalhabilidade, exigindo misturas frequentes para homogeneização do material e pode interferir na capacidade de adesão da argamassa ao ser lançada contra a base (SELMO, 1989).

Para a avaliação da consistência da argamassa é utilizada normalmente a mesa de consistência (flow table) prescrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996) e são realizados procedimentos de ensaio para determinação do índice de consistência prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2005).

### Trabalhabilidade

Em termos práticos, a trabalhabilidade significa facilidade de manuseio. Pode-se dizer que uma argamassa é trabalhável, de um modo geral, quando ela distribui-se facilmente ao ser assentada, não gruda na ferramenta quando está sendo aplicada, não segrega ao ser transportada, não endurece em contato com superfícies absorptivas e permanece plástica por tempo suficiente para que a operação seja completada (SABBATINI, 1984).

De acordo com o documento MR-3 da RILEM (1982) trabalhabilidade das argamassas é uma propriedade complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades, tais como consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, endurecimento sob sucção e tixotropia.

Avaliar, mensurar e prescrever valores de trabalhabilidade das argamassas por meio de ensaios é uma tarefa muito difícil, uma vez que ela depende não só das características intrínsecas da argamassa, mas também da habilidade do pedreiro que esta executando o serviço e de várias propriedades do substrato, além da técnica de aplicação (CASCUDO et al., 2005).

### Coesão e Tixotropia

A coesão pode ser definida como sendo a propriedade da argamassa de manter seus constituintes homogêneos sem haver segregação. Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa no estado fresco e às ligações químicas da pasta aglomerante (CINCOTTO et al, 1995). Ainda, segundo os autores, a influência da cal sobre a consistência e a trabalhabilidade das argamassas provém das condições de coesão interna que a mesma proporciona, em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado.

A tixotropia é a propriedade pela qual um material sofre transformações isotérmicas e reversíveis do estado sólido para o estado gel (SELMO, 1989). O estado gel, no caso das argamassas, diz respeito à massa coesiva de aglomerante na pasta, mais densa após a hidratação (CINCOTTO et al., 1995).

### Plasticidade

A plasticidade é a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a conservar-se deformada após a redução das tensões de deformação. De acordo com CINCOTTO et al. (1995), a plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a trabalhabilidade, e são influenciadas pelo teor de ar aprisionado, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade de mistura das argamassas.

A plasticidade adequada para cada mistura, de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, demanda uma quantidade ótima de água a qual significa uma consistência ótima, sendo esta função do proporcionamento e natureza dos materiais (CASCUDO et al. 2005).

### Retenção de Água

A retenção de água é a capacidade da argamassa no estado fresco de manter sua consistência ou trabalhabilidade quando submetida a solicitações que provocam perda de água de emassamento seja por evaporação, sucção do substrato ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal (CINCOTTO et al, 1995).

Segundo ROSELLO citado por SELMO (1989) as argamassas tendem a conservar a água necessária para molhar as partículas dos aglomerantes e do agregado miúdo e a água em excesso é cedida facilmente, devido à absorção do substrato. ROBINSON et al. citados por CARASEK (1996) constataram em seus experimentos utilizando argamassas com diferentes retenções de água aplicadas em diferentes tipos de substratos, que aquelas com menores capacidades de retenção de água produziam maior resistência de aderência do revestimento.

#### **4.6.6.3 Propriedades das Argamassas no estado endurecido**

##### Resistência Mecânica

A resistência mecânica pode ser definida como a propriedade das argamassas de suportarem as ações mecânicas de diferentes naturezas, devidas à abrasão superficial, ao impacto e à contração higroscópica (BAIA e SABATTINI, 2000).

Após o seu endurecimento, independente do tipo de aplicação, as argamassas sempre serão submetidas a algum tipo de esforço mecânico. As argamassas de assentamento são solicitadas à compressão e as de revestimento à abrasão superficial, impacto, tensões de cisalhamento decorrentes de movimentações do substrato e variações térmicas/higrométricas.

A resistência mecânica depende basicamente do consumo e da natureza dos agregados e aglomerantes da argamassa e da técnica de execução, que busca a compactação da argamassa durante a sua aplicação e acabamento. A resistência mecânica aumenta com a redução da proporção de agregado na argamassa e varia inversamente com a relação água/cimento da argamassa (BAIA e SABATTINI, 2000). Porém, outros fatores como a temperatura e umidade podem interferir de maneira relevante no desempenho da resistência mecânica da argamassa (KOLIAS,1994).

#### Aderência no Estado Endurecido

Segundo SABBATINI (1984), aderência da argamassa ao substrato pode ser definida como sendo a capacidade que a interface substrato/argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se. Ainda, segundo o autor, não existe uma correspondência biunívoca entre um dado parâmetro e a capacidade de aderência. Por exemplo, aumentando o teor relativo de cimento no aglomerante pode-se aumentar ou diminuir a capacidade de aderência, dependendo das características do substrato.

Patologias, tais como o descolamento em placas que ocorre junto à interface argamassa/substrato, podem ser relacionadas com a inadequada condição do substrato para possibilitar a penetração da pasta de aglomerante em seus poros, como por exemplo, base impregnada com pulverulência e com gordura (CARVALHO JR et al., 2005).

De acordo com GONÇALVES (2004), fatores como processo de execução do revestimento, materiais utilizados e condições climáticas respondem por uma variabilidade de até 33% nos resultados do ensaio de aderência.

A aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como a porosidade e a absorção de água, a resistência mecânica, a textura superficial e pelas condições de execução do revestimento. A capacidade de aderência da

interface argamassa/substrato depende, ainda, da capacidade de retenção de água, da consistência e do teor de ar aprisionado da argamassa. Segundo SILVA (2005b), a aderência é influenciada favoravelmente pelo teor de finos do agregado miúdo.

A NBR 15258/2005, propõe procedimentos de ensaio para determinação da resistência de aderência à tração. Esta norma introduz o conceito de aderência potencial, estabelecendo um substrato-padrão para a aplicação das argamassas de modo a minimizar a influência da base na aderência, buscando assim avaliar apenas a contribuição da argamassa na resistência de aderência à tração (ANTUNES 2005).

### Elasticidade

Segundo SABBATINI e BAIA (2000), elasticidade ou resiliência é a propriedade da argamassa de suportar tensões sem romper, sem apresentar fissuras prejudiciais e sem perder aderência. No entanto, este sentido é estendido, no caso de argamassas, para o estado tal de deformação plástica em que a ruptura ocorre sob forma de fissuras microscópicas ou capilares não prejudiciais.

Segundo GOMES (1997), graças aos estudos realizados por inúmeros pesquisadores correlacionou à velocidade de propagação de onda sonora que se propaga através de um determinado corpo com o módulo de elasticidade do material que o constitui. As normas que descrevem procedimentos para realização dos ensaios para determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica para avaliação da qualidade do concreto são a NBR 8802 (ABNT, 1994) – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica.

#### **4.6.7 Funções das Argamassas**

A argamassa é um material muito importante em qualquer construção feita com pedras, tijolos ou blocos cerâmicos, pois tem a função de juntar as diversas unidades desses materiais entre si, favorecendo a distribuição dos esforços. A outra função básica das argamassas é o revestimento, de modo a propiciar uma maior proteção aos vários elementos construtivos. Além de ser encontrada também nos reparos de obras de concreto, através de injeções, na qual nesse caso é necessário o uso de aditivos expansores.

Conseqüentemente, uma boa argamassa tem grande parcela de colaboração na durabilidade das edificações.

Segundo SABBATINI (1984), os revestimentos de argamassas têm, em geral, as seguintes funções:

- Proteger as vedações e a estrutura contra a ação de agentes agressivos e, por consequência, evitar a degradação precoce das mesmas, aumentar a durabilidade e reduzir os custos de manutenção dos edifícios;
- Auxiliar as vedações a cumprirem com as suas funções, tais como: isolamento termo-acústico, estanqueidade à água e aos gases e segurança ao fogo;
- Estéticas, de acabamento e aquelas relacionadas com a valorização da construção ou determinação do padrão do edifício.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Materiais

#### 5.1.1 Escória de forno panela

O material utilizado neste trabalho, escória de Forno Panela (EFP), consiste do subproduto oriundos da fabricação do ferro gusa e do aço. São impurezas que, por serem muito leves, ficam como o sobrenadante na massa líquida de ferro ou aço, a altas temperaturas. Em condições ambientes, apresenta-se no estado sólido, de cor clara, ilustrado na figura 5.1.

As amostras utilizadas neste experimento foram obtidas na Siderúrgica Arcelor Mittal, Piracicaba-SP. As análises química e mineralógica são representadas na Tabela 5.1 e 5.2:

Tabela 5.1: Análise Química do material utilizado

Análise Química	%
<b>CaO</b>	57,3-64,4
<b>MgO</b>	6,15-8,37
<b>SiO<sub>2</sub></b>	24,5-36,8
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,08-3,94
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,14-0,29
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,37-1,42
<b>MnO</b>	0,17-1,64
<b>Feo</b>	0,68-4,55

Simplificadamente, essas escórias são formadas pela reação do calcário (calcítico, magnesiano ou dolomítico) com a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), presente no minério de ferro, conforme reação 5.1.



Tabela 5.2: Análise Mineralógica do material utilizado

Análise Mineralógica	
Silicato de cálcio	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ e $\text{CaSi}$
Bredegita ou Bridigite	$\text{Ca}_{14}\text{Mg}_{12}(\text{SiO}_4)_8$

O material artificial utilizado como aglomerante foi granulometricamente separado segundo as peneiras n° 30, n° 50, n°100, n°200, e a fração de material passante na peneira n°200 foi utilizado nos ensaios realizados. As amostras foram coletadas e armazenadas de forma representativa para o procedimento das análises, conforme a NBR 6471/1998.



Figura 5.1: Amostra de escória utilizada nos ensaios

### 5.1.2 Agregados miúdo

O agregado miúdo utilizado neste trabalho consiste na areia normal brasileira, material utilizado convencionalmente para a produção de argamassas e concretos em obras de arte corrente de engenharia. Tem características padronizadas, conforme NBR 7214/1982.

O material é fornecido nas seguintes frações granulométricas: grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100). Apresenta um teor de material pulverulento inferior a 1,0 % em peso, umidade máxima de 0,2 % em peso, teor de conglomerados argilosos no material retido na peneira ABNT 0.6 mm (nº30) máximo, de 1,0% em número de grãos, teor de feldspato inferior a 15,0 % em número de grãos, teor de mica inferior a 2,0 % em número de grãos e um índice de coloração, em termos de ácido tânico inferior a 100 partes por milhão.

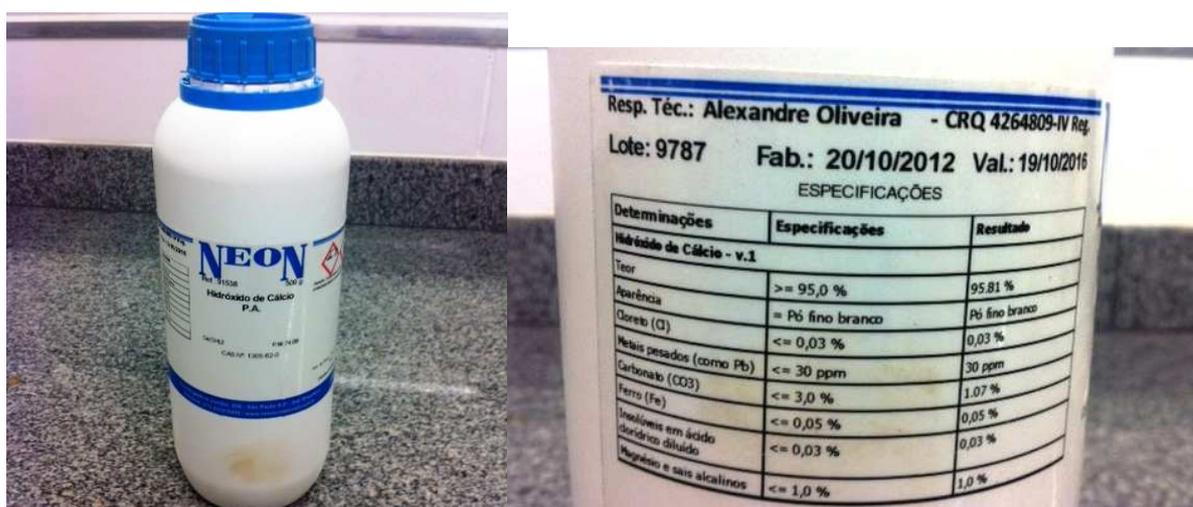
Foram utilizadas as quatro frações de areia para a realização de todos os ensaios, ilustrado na figura 5.2, amostra das frações.



**Figura 5.2: Amostra das quatro frações da areia normal brasileira**

### **5.1.3 Hidróxido de Cálcio**

O Hidróxido de Cálcio utilizado neste trabalho consiste de um reagente utilizado convencionalmente para a produção de argamassas e concretos em obras de arte corrente de engenharia. Também conhecido com cal apagada, cal hidratada ou ainda, cal extinta, o hidróxido de cálcio é uma base inorgânica de fórmula química  $\text{Ca(OH)}_2$ , formada pela junção do cátion  $\text{Ca}^{2+}$  e dois ânions  $\text{OH}^-$  (hidróxido). Em condições ambientes, se apresenta no estado sólido, de cor branca, pouco solúvel em água, com pH de 12,8, densidade de  $2,2 \text{ g/cm}^3$  e ponto de fusão de  $580^\circ\text{C}$ , comercialmente apresentado em embalagens plásticas, conforme ilustrado na figura 5.3 apresentada a seguir.



**Figura 5.3: Material utilizado no ensaio**

O hidróxido de cálcio utilizado nesse experimento apresenta-se em conformidade com NBR 5751/1992, conforme mostra a tabela 5.3.

Tabela 5.3: Requisitos químicos e físicos do hidróxido de cálcio – adaptada da NBR 5751.

Requisitos químicos e físicos	Limites
Óxido de cálcio e magnésio (não-voláteis), mín. %	95
Óxido de magnésio (após calcinação), máx. %	5
Dióxido de carbono, máx. %	7
Material retido na peneira 600 $\mu\text{m}$ (nº 30) (A), máx. %	0,5
Material retido na peneira 75 $\mu\text{m}$ (nº 200) (A), máx. %	15

#### 5.1.4 Água

Utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento local.

### 5.1.5 Água Destilada

A água destilada utilizada no trabalho, foi obtida por meio da destilação da água não pura, através de destilador do laboratório, ilustrado na figura 5.4. Consiste numa substância pura, com pH aproximado de 7 e massa volumétrica de 1g/ml.



**Figura 5.4: Destilação da água**

### 5.1.6 Solução de Hidróxido de Cálcio

A solução de hidróxido de cálcio utilizada no trabalho, foi preparada em recipientes contendo 200 ml de água destilada e 1,2g de hidróxido de cálcio mantidos em um agitador magnético, por 20 minutos de constante agitação, para a homogeneização completa. As soluções foram filtradas e colocadas novamente no agitador magnético para o monitoramento e leitura do pH e da condutividade elétrica.

### 5.1.7 Cal hidratada

Para realização de alguns ensaios fez-se uso da cal hidratada CH-II. A cal foi armazenada em um recipiente plástico, vedado, revestido internamente com saco plástico. Ficando assim protegida das intempéries.

Parte da caracterização da cal foi fornecida pelo fabricante, representada na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Características da cal utilizada.

Análise da Cal	
CaO total	67%
Ca(OH) <sub>2</sub>	89%
MgO	2%
Umidade	0,6%
CO <sub>2</sub>	1%

## 5.2 Métodos

### 5.2.1 Caracterização das amostras de escória

Ao chegarem ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Ouro Preto (LMC), as amostras foram devidamente identificadas e acondicionadas em bombonas plásticas, hermeticamente fechadas e lacradas, conforme ilustra a Figura 5.5 para evitar a contaminação do material. Posteriormente as amostras foram preparadas para os ensaios de caracterização física segundo métodos fixados pela normalização.



Figura 5.5: Material armazenado

### 5.2.2 Composição granulométrica

As amostras foram preparadas por quarteamento e secagem em estufa até a constância de massa, a massa das amostras foi determinada com resolução de 0,1g e a amostra foi colocada no conjunto de peneiras da série normal e intermediária como mostra a Tabela 5.5. Após a vibração mecânica do conjunto de peneiras (Figura 5.6) foi avaliada a massa de material retida em cada peneira.

Tabela 5.5: Distribuição de peneiras serie normal e intermediária

Série Normal	Série Intermediária
76mm	-
-	64mm
-	50mm
38mm	-
-	32mm
-	25mm
19mm	-
-	12,5mm
9,5mm	-
-	6,3mm
4,8mm	-
2,4mm	-
1,2mm	-
0,6mm	-
0,3mm	-
0,15mm	-

O material devidamente preparado foi submetido à análise granulométrica segundo NBR NM 248/2003, para determinação dos diâmetros médios de seus constituintes, identificando a partir de então as faixas de interesse ao projeto, sua dimensão máxima característica e o módulo de finura de cada material.



**Figura 5.6: Peneirador utilizado no ensaio**

### **5.2.3 Massa específica**

A massa específica de um material pode ser definida como a relação entre a massa do material seco em estufa até constância de massa e o volume igual do sólido, incluídos os poros impermeáveis. A determinação da massa específica de cimento Portland e outros materiais em pó utilizados nesse experimento foi conduzida em conformidade com prescrições normativas estabelecidas à NBR NM 23/2000.

A massa específica foi determinada com auxílio do frasco de Le Chatelier (Figura 5.7).



**Figura 5.7: Determinação da massa específica da escória Forno Panela**

A partir dos dados obtidos, a massa específica ( $\rho$ ) foi determinada segundo equação 5.2, apresentada a seguir:

$$\rho = \frac{m}{(V_2 - V_1)} \quad (\text{Equação 5.2})$$

Sendo:

- $\rho$ : massa específica da amostra
- $V_1$ : Primeira leitura do volume realizado após ter sido colocada no banho termorregulador
- $V_2$ : Segunda leitura do volume realizada após a colocação da amostra de massa conhecida do material

#### 5.2.4 Determinação do teor de umidade

O ensaio para determinação do teor de umidade realizado na EFP foi conduzida em conformidade com prescrições normativas estabelecidas à NBR 9939/2011. Este ensaio consiste na pesagem da massa inicial do material após 24 horas de exposição ao ar em temperatura ambiente, e uma segunda pesagem, após constância de massa, depois de submetido ao processo de secagem do material em estufa a uma temperatura de  $105 \pm 5$  °C por igual período de 24 horas.

O teor de umidade do material é dado em percentual e é obtido pela Equação 5.3 a seguir.

$$TU = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad (\text{Equação 5.3})$$

Onde:

- TU é o teor de umidade da amostra em porcentagem
- $P_u$  é o peso úmido da amostra em gramas
- $P_s$  é o peso da amostra seco em estufa em gramas

A figura 5.8 apresentada a seguir ilustra o processo de determinação do teor de umidade e a estufa utilizada para a realização deste ensaio.



**Figura 5.8: Processo para a determinação do teor de umidade**

### 5.2.5 Índice de atividade pozolânica

O ensaio para a determinação do índice de atividade pozolânica com cal, foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 5751/1992.

Para a determinação da atividade pozolânica são necessárias proporções para os materiais; sendo:

- Cal hidratada: 1 → 104g
- Areia: 9 → 936g (234g de cada uma das quatro frações da areia normal)
- Material Pozolânico: igual ao dobro do volume da cal hidratada, quantidade do material pozolânico calculada pela equação 5.4.

$$m = 2 * \frac{\delta_{\text{poz}}}{\delta_{\text{cal}}} * 104g \quad (\text{Equação 5.4})$$

Onde  $\delta_{\text{poz}}$  e  $\delta_{\text{cal}}$  são, respectivamente, os valores da massa específica do material pozolânico e da cal hidratada, determinados de acordo com a NBR 6474.

Água: a quantidade correspondente à obtenção do índice de consistência  $(225 \pm 5)$ mm obtido a partir do ensaio na mesa de abatimento, determinado segundo a NBR 7215/1982.

O material pozolânico deve estar seco em estufa até a constância de massa, NBR 8952/1992.

Após dosagem dos traços, quais correspondem as padrões indicados, foram moldados 3 (três) corpos-de-prova, NBR 7215/1982, curados nos próprios moldes e

mantidos vedados para a garantia de umidade. O tempo de cura foi de 7 (sete) dias. Sendo que os corpos de provas foram mantidos em câmara úmida à temperatura de  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$  no primeiro dia, e mantidos por 6 (seis) dias subsequentes à temperatura de  $(55\pm 5)^{\circ}\text{C}$  até  $(4\pm 0,5)\text{h}$  antes do ensaio de ruptura, quando então deveriam voltar a temperatura de  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ .

Após período de cura, os corpos-de-prova foram desmoldados cuidadosamente, 1 h antes da determinação de sua resistência a compressão. A pozolanicidade é dada pela média de resistência à compressão, em MPa, dos três exemplares, NBR 12653/2012.

### 5.2.6 Método de Luxan

O ensaio para a determinação do índice de atividade pozolânica, foi conduzido segundo método, proposto por Luxan et al. (1989).

Para a determinação da pozolanicidade, segundo método, utilizou-se 200ml de solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $40^{\circ}\text{C}$ ; com adição de 5g de escória, mantida em agitador magnético, para homogeneização. Após a adição do material, a variação da condutividade foi monitorada por um período de 120s, sendo o índice de atividade Pozolânica definido como a relação entre a condutividade antes da adição do material e aquela após decorridos tempo da adição.

Para a realização do ensaio foram utilizados:

- Água destilada;
- Hidróxido de cálcio;
- Amostras de escórias;
- Condutímetro (Figura 5.9);
- Agitador magnético com controle de temperatura;
- Becker de 200ml.

Através da variação de condutividade de uma solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  antes e depois da pozolana ser adicionada é possível classificar o material da seguinte forma:

- Materiais sem atividade pozolânica:  $\Delta\text{mS}/\text{cm} < 0,4$ ;
- Materiais de atividade pozolânica moderada:  $\Delta\text{mS}/\text{cm} < 1,2$ ;
- Materiais de boa atividade pozolânica:  $\Delta\text{mS}/\text{cm} > 1,2$ ;



**Figura 5.9: Condutímetro utilizado**

### **5.2.7 Ensaio da determinação da consistência normal**

O ensaio para a determinação da água que confere consistência normal à pasta foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 14399/1999.

Para determinação da pasta de consistência, utilizou-se aparelho de Vicat modificado (Figura 5.10), com o seguinte proporcionamento dos materiais:

- Ligante:  $(500,00 \pm 0,2)$ g;
- Água: a quantidade de água determinada por para que se atingisse valor de consistência normal par a pasta.

A consistência da pasta é considerada normal quando seu índice de consistência for igual a  $(20 \pm 2)$  mm.



**Figura 5.10: Aparelho de Vicat**

### 5.2.8 Determinação do teor de material pulverulento para ligantes

A escória foi submetida ao ensaio de teor de material pulverulento conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas às NBR NM 46/03 e NBR 9289/2000. Neste ensaio consideram-se as partículas minerais com dimensão inferior a 0,75 mm, inclusive os materiais solúveis em água, presente no material.

Nos procedimentos para a realização deste ensaio, deve-se, inicialmente, coletar de forma representativa uma amostra de 500 g de cada material previamente seco em estufa até constância de massa. O ensaio consiste basicamente na lavagem do material sobre o jogo de peneiras com abertura de malha de 0,75 mm e 1,18 mm até que a água esteja clara, ilustrada na figura 5.11.

O teor de material pulverulento é correlativo a massa dissipada durante a lavagem comparativamente a massa inicial seca em estufa, obtido pela Equação 5.5 a seguir.

$$TP = \frac{Ps - Pl}{Ps} \times 100 \quad (\text{Equação 5.5})$$

Onde:

- TP é o teor de material pulverulento da amostra em porcentagem
- Ps é o peso inicial da amostra seco em estufa em gramas
- Pl é o peso da amostra seco em estufa após lavagem em gramas

Para essa análise, em função da disponibilidade de equipamentos do laboratório, foram empregados métodos adaptados.



**Figura 5.11: Água presente na lavagem do material sobre o jogo de peneiras com abertura de malha de 0,75 mm e 1,18 mm**

### **5.2.9 Ensaio para a determinação da estabilidade**

O ensaio para a determinação da estabilidade de cal hidratada para argamassas, mediante observação visual, foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9205/2001.

Para determinação dos resultados de estabilidade, produziu-se corpo de prova com o traço em massa 1,00: 4,00 (500 g de EFP para 2 000 g de areia normal) segundo prescrições normativas NBR 7214/2012, composta de 20% de material retido na peneira número 100, 40% de material retido na peneira número 50 e 40% de material retido na peneira número 30. Com massa de água ajustada para a consistência de  $(280 \pm 5)$  mm, conforme anexo B da NBR 7215/1996.

Imediatamente após a preparação da massa espalharam-se camadas com aproximadamente 5 mm de espessura dessa argamassa em placas de vidro, com um acabamento mais liso. Essas placas permaneceram em repouso por  $(18 \pm 2)$  h à temperatura de  $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$ . Após esse período, procedeu-se observação de ocorrências relativamente ao surgimento de protuberâncias e/ou pipocamentos (1ª observação).

Após a primeira observação as placas de vidro foram mantidas em ambiente saturado, a temperatura  $100^\circ\text{C}$ , constante durante 5 h.

Após período de imersão em vapor, procedeu-se à 2ª observação, relativamente ao surgimento de protuberâncias e/ou pipocamentos.

### **5.2.10 Ensaio de determinação da retenção de água**

O ensaio de retenção de água de cal hidratada para argamassas, através de funil de Buchner modificado, foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9290/1996.

A argamassa ensaiada foi composta de 500 g de EFP e 1500 g de areia normal padrão composta de partes iguais em peso das quatro frações, conforme a NBR 7214/2012. A quantidade de água no recipiente foi ajustada para o índice de consistência normal dentro do intervalo 205 mm a 215 mm.

A argamassa permaneceu em repouso, por um período de 16 h a 24 h. Após esse tempo, foi remisturada e a sua quantidade de água foi ajustada para que se obtivesse novamente o índice de consistência normal.

Colocou o prato com fundo perfurado com a argamassa adensada, como mostra a figura 5.12, sobre o funil. Abriu a torneira para aplicar na amostra a sucção correspondente à coluna de 51 mm de mercúrio durante 60 s, fechando-a em seguida. E com a argamassa remisturada, determinou novamente o índice de consistência.

O valor do índice de retenção de água (RA) deve ser calculado a partir da média dos índices (RA) obtidos em duas determinações, conforme a equação 5.6:

$$RA = \frac{A-125}{B-125} \times 100 \quad (\text{Equação 5.6})$$

Onde:

- RA = índice de retenção de água de cada determinação, em %.
  - A = consistência após a sucção no funil de Buchner modificado, em mm.
  - B = consistência antes da sucção no funil de Buchner modificado, em mm.
- A figura 5.13 ilustra todos os instrumentos e materiais utilizados no ensaio.



**Figura 5.12: Argamassa posta no prato com fundo perfurado**



**Figura 5.13: Instrumentos e materiais utilizados no ensaio**

### **5.2.11 Capacidade de incorporação de areia**

O ensaio para a determinação da capacidade de incorporação de areia no plastômetro de Voss, foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9207/2000, que permite determinar a quantidade máxima de areia-padrão que pode ser misturada a uma ligante para argamassas, sem prejudicar as características de trabalho da mistura resultante.

Após a preparação da argamassa de EFP com um traço de 1:1, produziu-se corpo de prova molde tronco-cônico, com a base apoiada na mesa de consistência, de modo bem centrado. O índice de consistência, expresso em milímetros, correspondeu à média de três medidas do diâmetro ortogonais da base do tronco de cone da argamassa, após a deformação.

Repetiu-se a operação, aumentando a proporção areia/EFP até que não fosse possível determinar o índice de consistência.

Esta análise foi adaptada, para mesa de consistência, em função da disponibilidade (Plastômetro de Voss) de equipamentos do laboratório.

### **5.2.12 Ensaio de determinação da plasticidade**

O ensaio para a determinação da plasticidade de cal hidratada para argamassas, empregando-se o plasticímetro de Emley, foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9206/2003. Para essa análise, em função da disponibilidade de equipamentos do laboratório, foram empregados métodos adaptados.

Preparou-se uma pasta de EFP com a qual foi obtida uma penetração de  $(20 \pm 2)$  mm do aparelho de Vicat modificado, de acordo com a NBR 14399, como ilustra a figura 5.19. A pasta foi transferida para um recipiente e coberta por um tecido umedecido, a fim de fosse evitada evaporação, por um período de  $(20h \pm 2)h$ , conforme ilustra a figura 5.14. Após esse período, a pasta foi remisturada e a sua quantidade de água foi ajustada para que se obtivesse novamente o índice de consistência inicial. O índice de consistência foi medido antes e depois da adição de água, e monitorado por um período de 5 minutos em intervalos de 1 em 1 minuto. O mesmo processo foi conduzido para a cal (CH).



**Figura 5.14: Parte do ensaio de Determinação da Plasticidade**

## **6 RESULTADOS**

### **6.1 Análise Química e Mineralógica**

A análise química (ÓXIDOS) realizada pela Arcelor Mittal, indicaram considerável presença de óxido de cálcio próximo aos teores presentes em cales, e ainda teores de cálcio, sílica e alumina maiores que 70%, o que sugere pozolanicidade segundo NBR12653/2012(Tabela 6.1).

Tabela 6.1: Análise de óxidos do material utilizado

Análise Química	%
<b>CaO</b>	57,3-64,4
<b>MgO</b>	6,15-8,37
<b>SiO<sub>2</sub></b>	24,5-36,8
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,08-3,94
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,14-0,29
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,37-1,42
<b>MnO</b>	0,17-1,64
<b>Feo</b>	0,68-4,55

As análises conduzidas por difração de raios X, indicaram estruturas mineralógicas formadas a partir de silicatos de cálcio e magnesianos, conforme indicado na tabela 6.2 apresentada a seguir.

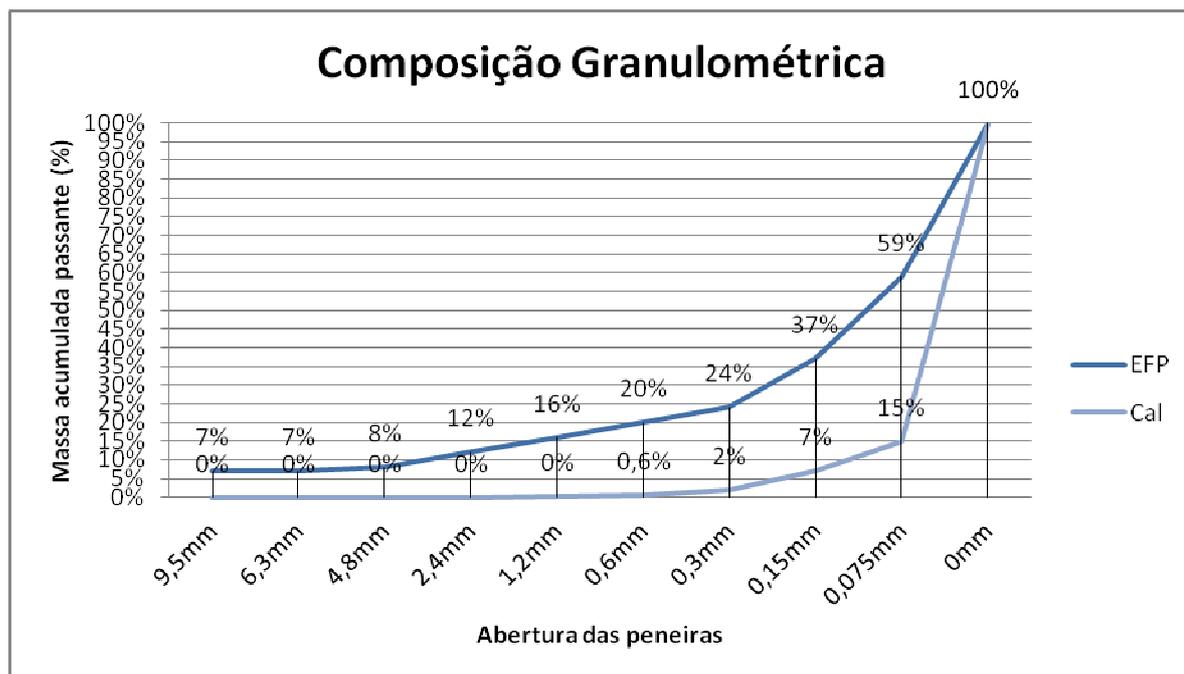
Tabela 6.2: Análise Mineralógica do material utilizado

Análise Mineralógica	
<b>Silicato de cálcio</b>	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> e CaSi
<b>Bredegita ou Bridigite</b>	Ca <sub>14</sub> Mg <sub>12</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>8</sub>

## 6.2 Composição Granulométrica

A análise granulométrica da escória de forno panela (EFP) apresentou distribuição granulométrica, segundo curva indicada na figura 6.2.

Observa-se que aproximadamente 40% da massa do material sólido possui diâmetro inferior a 0,075mm. A curva granulométrica apresentada a seguir, ilustrada na figura 6.1, indicam parâmetros físicos que caracterizam EFP, comparativamente aos resultados plotados também para cal utilizada nesse experimento.



**Figura 6.1.: Composição granulométrica da CH e da EFP**

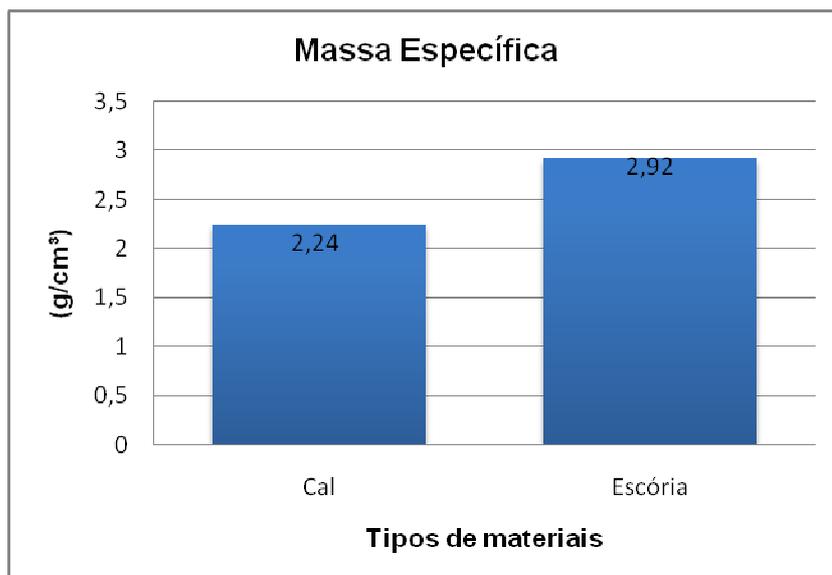
O percentual superior a 60% de materiais com diâmetros inferiores a 0,075mm habilita a EFP para utilização como ligante para argamassas utilizando apenas essa porcentagem passante, que está em conformidade com parâmetros físicos e limites normativos indicados à NBR 7175/1992. A tabela 6.3, a seguir, indica os valores obtidos de dimensão máxima característica e módulo de finura encontrado para a EFP.

Tabela 6.3: Resultado do ensaio

<b>Dimensão máxima característica</b>	<b>9,5mm</b>
<b>Módulo de finura</b>	<b>1,8</b>

### 6.3 Massa específica

Resultados obtidos das análises para massa específica, indicaram valores superiores para EFP, comparativamente as cales. A escória de Forno Panela é 30% mais denso que a cal hidratada. A Figura 6.2 apresentada a seguir, ilustra os resultados obtidos.



**Figura 6.2.: Massa específica dos agregados**

A diferença dos valores para massa específica pode estar relacionado a maior concentração de sílica na EFP, que nas cales analisadas, bem como também estar relacionado a forma dos grãos das cales e das escórias.

#### 6.4 Determinação do teor de umidade

O resultado do ensaio para determinação do teor de umidade realizado com a escória de Forno Painela, conforme a norma NBR 9939/11, mostra que o agregados material não apresenta variação significativa de umidade.

O teor de umidade do material é dado em percentual e foi obtido pela Equação 6.1 a seguir.

$$TU = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad (\text{Equação 6.1})$$

Onde:

TU é o teor de umidade da amostra em porcentagem

P<sub>u</sub> é o peso úmido da amostra em gramas

P<sub>s</sub> é o peso da amostra seco em estufa em gramas

O teor de umidade obtido para EFP foi de 1%. Através dos resultados obtidos nota-se que a escória apresenta valor superior a cal hidratada, que geralmente apresenta 0,6% de teor de umidade. Fato este que evidencia a higroscopicidade destes grãos, e pode ter como consequências a redução da fluidez, da resistência e a maior facilidade de empedramento.

## 6.5 Índice de atividade pozolânica

Os resultados das cargas de ruptura na avaliação da atividade pozolânica, em conformidade com a NBR 5751/2003, vêm apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Dados do ensaio de atividade pozolânica com a EFP

	Amostras	Carga de Ruptura (kN)	Tensao de Ruptura (Mpa)
<b>1° lote ensaiado</b>	1	0,56	0,29
	2	0,6	0,31
	3	0,55	0,28
<b>2° lote ensaiado</b>	1	0,45	0,23
	2	0,48	0,24
	3	0,5	0,25
<b>3° lote ensaiado</b>	1	0,5	0,25
	2	0,56	0,29
	3	0,59	0,30
<b>4° lote ensaiado</b>	1	0,6	0,31
	2	0,62	0,32
	3	0,65	0,33

Segundo a NBR 12653/1992, as exigências químicas e físicas para que um material seja considerado como uma pozolana, o índice de atividade pozolânica deste material é a própria resistência à compressão simples, aos 7 (sete) dias, a qual deve ser igual ou superior a 6MPa, conforme figura 6.3 apresentada a seguir..



**Figura 6.3: Resistência compressão 7dias da EFP**

As cargas de ruptura obtidas com argamassas de EFP foram muito baixas gerando valores baixos de resistência à compressão, em média 0,28 MPa, bem menores que 6 MPa obtidos na resistência a compressão da cal. A partir desta análise, então, não se pode considerar a escória como pozolanas. Para valores de resistência a compressão, não é possível considerar EFP como material pozolânico.

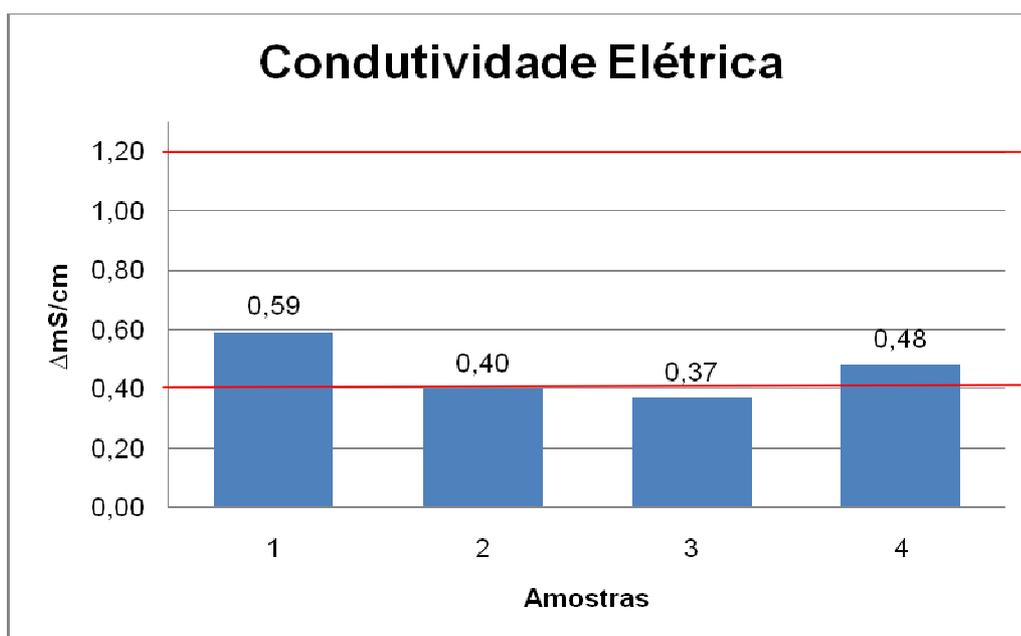
### 6.6 Método de Luxan

Os valores obtidos no ensaio de condutividade elétrica baseado no método descrito por Luxan et al. (1989) são apresentados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Dados do ensaio do Método de Luxan

Amostras	pH	Condutividade Elétrica da solução de Ca(OH) <sub>2</sub>	Condutividade Elétrica da solução com a escória	$\Delta$ Ms/cm
1	12,6	13,5	12,91	0,59
2	12,6	13,25	12,85	0,40
3	12,5	13,38	13,01	0,37
4	12,5	13,35	12,87	0,48

Observa-se a que, segundo método de LUXAN (1989), as escórias de forno panela EFP podem ser considerados como materiais pozolânicos de atividade moderada, conforme ilustra a figura 6.4, com variação da condutividade elétrica no intervalo de 0,35 a 0,59 mS/cm.



**Figura 6.4: Dados da condutividade elétrica das amostras ensaiadas**

### 6.7 Índice de Consistência Normal

Os resultados obtidos dos ensaios de determinação do índice de consistência normal das pastas de EPF, NBR 14399/1999, são mostrados na tabela 6.6. A água da pasta de consistência normal é expressa em porcentagem de massa relativa à escória.

Tabela 6.6: Dados do ensaio de consistência normal

Massa de escória(g)	Massa de água (g)	Porcentagem
500	400	0,8
500	398	0,8
500	410	0,8
500	420	0,8

### 6.8 Ensaio para determinação do teor de pulverulento

No ensaio de determinação do teor pulverulento na qual o material retido nas peneiras n° 30 e 200 foi pesado antes e depois da lavagem, e os resultados foram obtidos através da Equação 6.2 a seguir.

$$RA = \frac{A-125}{B-125} \times 100 \quad (6.2)$$

Os resultados para materiais pulverulentos, apresentados na tabela 6.7 apresentada a seguir, indicam que a EFP possui grãos maiores que os limites máximos preconizados pela NBR7175/1992.

A presença de grãos em tamanhos superiores aos limites podem ser também responsáveis pela baixa reatividade. A EFP deve ser processada em sistemas de diminuição especializado de forma que possam apresentar características mais adequadas.

Tabela 6.7: Resultados dos ensaios de teor pulverulento

Massa seca em estufa para constância	Massa retida na peneira n° 30	% de massa retida na peneira n° 30	Massa retida na peneira n° 200	% de massa retida na peneira n° 200
500	50	10%	216	43%
500	40	8%	230	46%
500	43	9%	246	49%

### 6.9 Ensaio para determinação da estabilidade

Os resultados para estabilidade indicaram aparecimento de protuberâncias e pipocamentos para corpos de prova EFP, tanto para os tratamentos a 40°C quanto para os tratamentos a 100°C, conforme pode ser observadas nas figuras 6.5 e 6.6 apresentadas a seguir.



**Figura 6.5: 1ª observação das amostras após repouso de (18±2)h à temperatura de 40°C**



**Figura 6.6: 2ª observação das amostras após repouso de 5h à temperatura de 100°C**

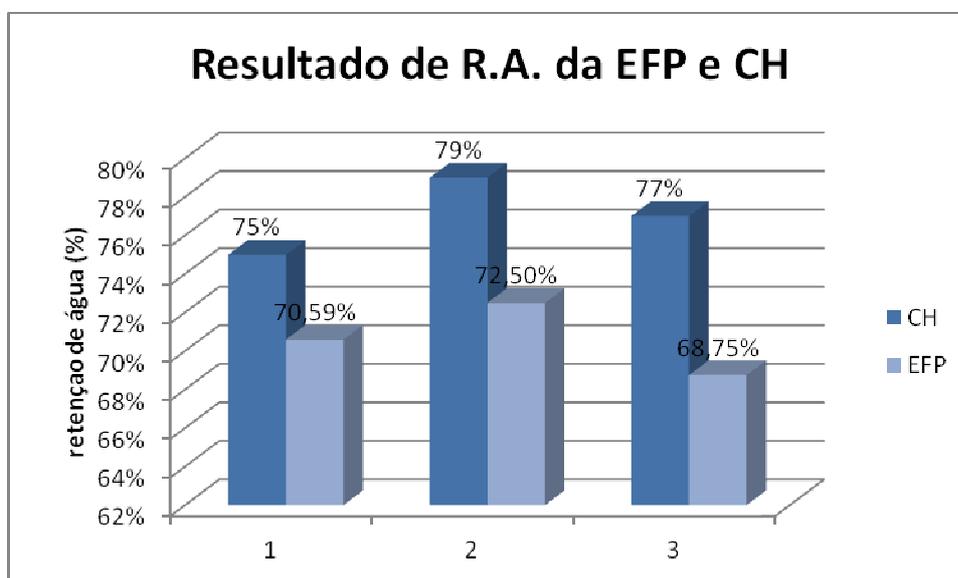
Os resultados obtidos, sugerem a presença de substâncias expansivas na EFP, ou seja, que têm a tendência de reagir depois da argamassa já colocada e seca na parede, podendo verificar-se fenômenos expansivos dos grãos da argamassa e descolamento de pedaços de argamassa da parede.

As observações realizadas, não habilitam EFP para seu uso como aglomerantes, relativamente a sua estabilidade.

#### **6.10 Ensaio para determinação da retenção de água**

Os resultados obtidos dos ensaios de determinação de retenção de água, determinados pela NBR 9290/1996, indicaram ser a EFP capaz de produzir argamassas que retém 70,6% de água em média, valores superiores aos limites

normativos, que são de 70%. A figura 6.7, a seguir, apresenta uma comparação dos resultados obtidos pela argamassa de EFP e a argamassa de CH.



**Figura 6.7: Resultados do ensaio de retenção de água**

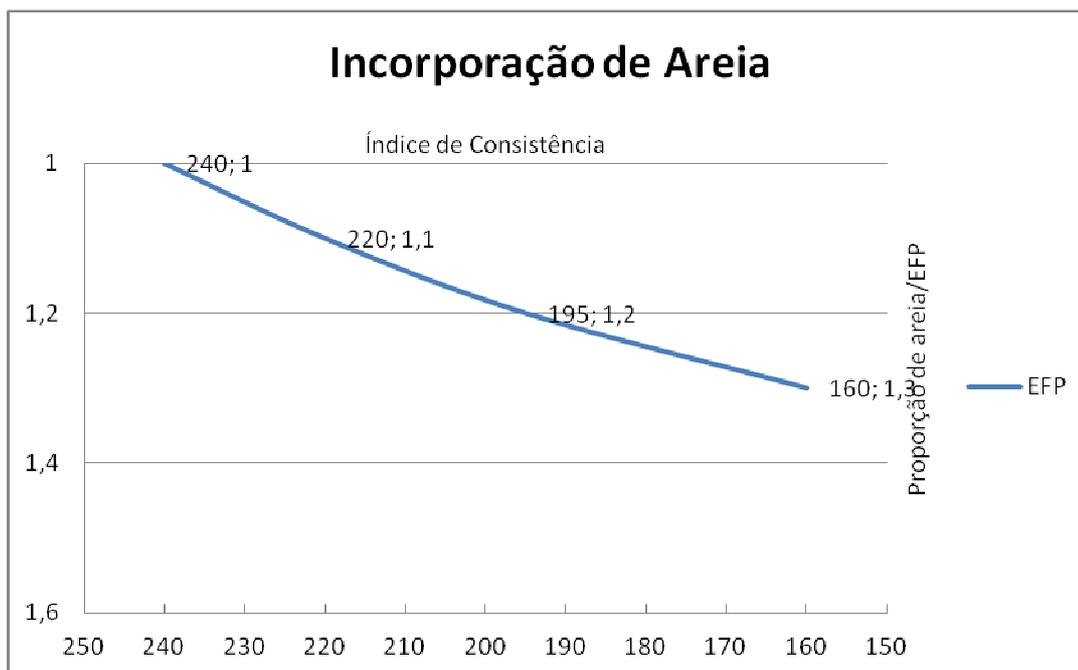
A retenção de água é um importante parâmetro para as argamassas no estado fresco (trabalhabilidade, estabilidade e aderência), que refletem-se também em melhoria do desempenho destas argamassas quando endurecidas.

### **6.11 Ensaio para determinação da capacidade de incorporação de areia**

O método de determinação da capacidade de incorporação de areia no plastômetro de Voss é regulamentada pela norma NBR 9207/2000.

O ensaio foi realizado em etapas, de forma que as argamassas de EFP e areia-padrão, pudessem ser analisadas com incrementos definidos de 10% de massa de areia na proporção areia/cal. Os incrementos seguiram-se até o ponto em que o índice de consistência não pudesse ser determinado, em função do cisalhamento para as argamassas.

Os resultados para incorporação de areia indicam redução do índice de consistência para incrementos percentuais de areia, conforme observado a figura 6.8 apresentada a seguir.



**Figura 6.8: Resultados do ensaio de incorporação de areia**

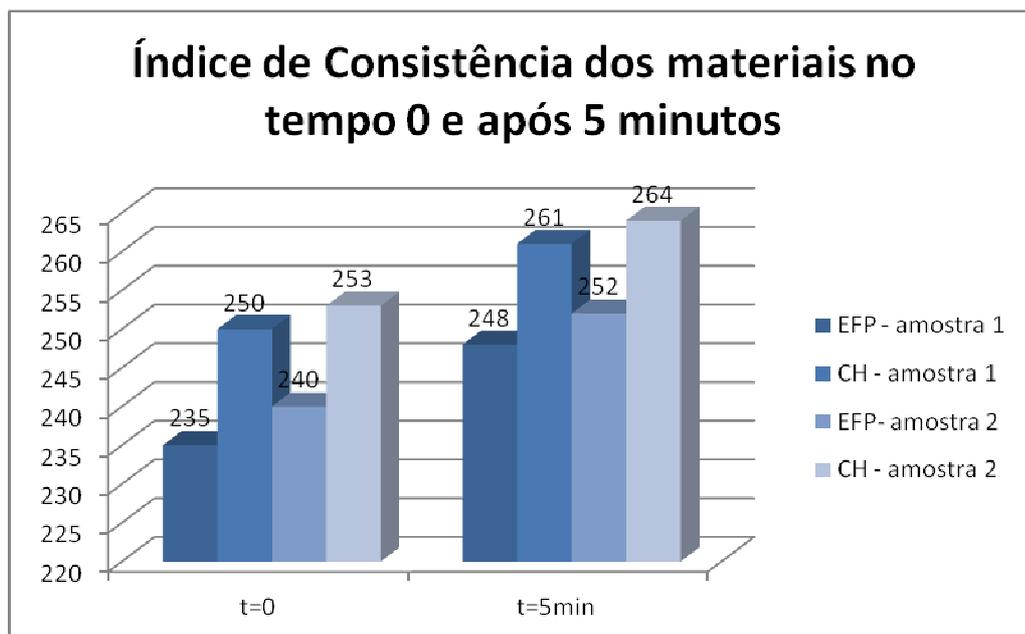
### 6.12 Ensaio para a determinação da plasticidade

O método para determinação da plasticidade de cal hidratada para argamassas, empregando-se o plasticímetro de Emley é regulamentada pela norma NBR 9206/2003. As análises para plasticidade foram adaptadas, utilizando-se da mesa de consistência, para determinação dos valores para plasticidade.

A determinação foi conduzida para argamassas de cal hidratada e argamassas EFP, e estão indicadas na tabela 6.8 e na figura 6.9.

Tabela 6.8: Resultados obtidos no ensaio.

	Índice de Consistência (mm)	Índice de Consistência após 5 minutos (mm)
<b>Pasta de consistência normal de escória</b>	235	248
	240	252
<b>Pasta de consistência normal de cal</b>	250	261
	253	264



**Figura 6.9: Resultados do ensaio de determinação de plasticidade**

As argamassas de cal apresentam maior plasticidade que as argamassas EFP. Fato que pode ser justificado pela maior superfície específica, e, conseqüentemente maior retenção de água. Adicionalmente, menor massa específica da cal produz argamassas mais leves e com menor atrito interno, o que de certa forma contribui para o escoamento das argamassas, assim como a maior retenção de água.

## 7 CONCLUSÃO

O objetivo geral da pesquisa foi mostrar a viabilidade da substituição da cal hidratada por escória de Forno Panela nas misturas de argamassas sem causar danos no desempenho das mesmas.

Encontram-se aqui as principais conclusões obtidas no programa experimental desta pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

Em relação à caracterização dos aglomerantes, pode-se observar que a escória de Forno Panela apresentou propriedades similares a cal hidratada.

A escória também apresentou grande proporção do material pulverulento dentro dos limites estabelecidos em norma para cal hidratada, na qual o material adequado para ser utilizado nos ensaios deve ter uma granulometria menor do que

0,7mm, podendo assim a escória de forno panela se submeter previamente a um peneiramento para assim serem realizados os outros ensaios, utilizando apenas a faixa de interesse.

Sobre os resultados de massa específica e teor de umidade observou-se que a escória obteve resultados superiores a cal hidratada.

As investigações de atividade pozolânica da escória segundo a NBR 5751 e o Método de Luxan apresentaram controvérsias, já que a NBR 5751 apresentou um resultado negativo e o Método de Luxan apresentou um teor moderado de atividade pozolânica.

Em relação as exigências físicas e químicas determinadas pela norma NBR 7175/2003 a escória atende a alguns requisitos normativos tais como a retenção a água, consistência normal e incorporação de areia, mas não apresentam ao limite mínimo exigido quando submetidos a determinação da estabilidade, plasticidade e finura.

Embora a material não atenda satisfatoriamente todos os resultados necessários, a escória de Forno Panela apresenta grande potencial como aglomerante, podendo ser realizadas novas pesquisas na qual substitui parcialmente aglomerante necessário à argamassa por escória de Forno Panela.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Janaína – **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto**. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, dezembro, 2008.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. 156 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2005.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P.P. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3ª Edição. São Paulo:Ed. Cengage Learning, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5751 – Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5752 – Materiais pozolânicos — Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland — Índice de atividade pozolânica com cimento — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6453 – Cal virgem para construção civil. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6471 – Cal virgem e cal hidratada - Retirada e preparação de amostra - Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6472 – Cal - Determinação do resíduo de extinção de cal. Rio de Janeiro, 1993.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7214 – Areia normal para ensaio de cimento — Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215 – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8802 – Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9205 – Cal hidratada para argamassas - Determinação da estabilidade. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9206 – Cal hidratada para argamassas - Determinação da plasticidade. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9207 – Cal hidratada para argamassas - Determinação da capacidade de incorporação de areia no plastômetro de Voss. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9289 – Cal hidrata para argamassas - Determinação da finura. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9290 – Cal hidrata para argamassas - Determinação de retenção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9939 – Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004 – Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10791 – Condições de ensaio para centros de usinagem. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653 – Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13530 – Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14399 – Cal hidratada para argamassas - Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15258 – Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 23 – Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 46 – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 58 – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

BAÍA, L.L.; SABBATINI, F.H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa.** Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. 1ª edição. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000.82p.

CAMPITELI, V. C.; MASSARETTO, R.; RODRIGUES, P. T. **Dosagem experimental de argamassas mistas a partir de cal virgem moída.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, I. 1995, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ANTAC, p. 73-82, 1995.

CARASEK, H. **Aderência de argamassa à base de cimento portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** 1996. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1996.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influencia do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1999.

CARVALHO, E. F. T. **Apostila de Materiais de Construção I.** Ouro Preto: [s.n], 2009.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim Técnico n. 68.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** 2006. 445f. Tese

(Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

COUTO, C.; PINTO, J.D.S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 2ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

DEL CARLO, U. **Cultura sustentável**. Revista Técnica. Edição 133. São Paulo – SP: Editora Pini, 2008. P. 22-28.

GALDEANO, O.V.R. et al. **A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações da CSN**. In: Seminário de redução e matérias primas resíduos na siderurgia, 25, Volta Redonda, RJ. Anais...Volta Redonda, 1994. p.271-285.

GAVA, G. P. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para a avaliação da atividade pozolânica**. 1999. 118p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 1999.

GOMES, A. M. **A utilização da ultrassonografia na avaliação das propriedades mecânicas dos revestimentos de paredes através de ensaios “in situ”**. In Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, II., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 1997. p. 445-456.

GONÇALVES, S. R. C. **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – estudo de caso**. 2004. 148 f. Tese (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2ª Edição. 341p. São Paulo: Editora Pini, 2002.

ISAIA, G. C. **Efeitos da mistura binária e termária de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1995.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2000.

KOLIAS, S. **Investigation of the possibility of estimating concrete strength by porosity measurements**. Materials and structures. Vol. 27. 1994. P. 265-272

KRUS, M.; HANSEN, K.K; KUNZEL, H. M. **Porosity and liquid absorption of cement paste**. Materials and structures/Matériaux et constructions. Vol. 30. p. 394-398. 1997

LARA, D. et al. **Dosagem das argamassas**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, I. 1995, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ANTAC, p. 63-72, 1995.

- LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e de demolição.** Porto Alegre, 2001. 270p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- LÚCIO, A. **Físico-química metalúrgica- 2ª parte.** Belo Horizonte: [s. n.], 1981.
- MASSAZZA, F. **Pozzolana and Pozzolanic Cements.** In: Hewlett, P. C. (ed), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4<sup>th</sup> edition, Arnold Publishers, London, 1998
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3ª Edição. São Paulo: Editora Ibracon, 674 p, 2008.
- NEVILLE, A.M. **Cements of different types.** In: *Properties of Concrete*. 3<sup>th</sup> ed. England, Longman Scientific & Technical, p. 63-117, 1982.
- OLIVEIRA, I. **Natureza em pauta.** Revista Foco. Edição 110. Ano VIII, Natal-RN: Editora Foco, Maio 2008. p. 26 -27.
- PINI, Fausto. **TCPO – Tabela de Composições de Preços para Orçamentos.** 13ª Ed. São Paulo: Pini.
- POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2006.
- QUENARD, D. A. et al. **Microstructure and transport properties of porous buildings materials.** *Materials and structures/Matériaux et constructions*. Vol. 31. p. 317-324. 1998.
- REGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas.** 2004. 274p. Tese (Doutorado). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.
- RODRIGUES, M. S. **Caracterização de cinza residual da queima de arroz para a produção de argamassa.** Tese (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas – SP, 128p, 2008.
- SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílicocalcária.** São Paulo. 1984. 298 p. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1984.
- SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios.** 1989. 227 p. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 1989.
- SILVA, N. G.; BUEST, G. T.; CAMPITELI, V. C. **A influência do fíler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento.** In: Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem II., 2005b, São Paulo. **Anais...**p. 1-12.

STARLING, T.; COUTO, C. **Estudo do aproveitamento de escória de alto-forno como agregado miúdo na produção de argamassas e concreto.** 10º ENCO - Encontro Nacional da Construção, Gramado, p. 811-833, Vol 2, 1990.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais.** 4ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Campus, 567 p, 1984.

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz.** 2001. 98p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2001.

ZAMPIERE, V. A. **Determinação da atividade Pozolânica: Avaliação crítica e proposição de uma metodologia alternativa.** In: 3º Congresso Brasileiro do Cimento. Anais... Vol.1. 1993

## ANEXOS

**Anexo 1:** Classificação dos resíduos sólidos

Classificação	
Resíduos de classe I – Perigosos	
Resíduos de classe II – Não Perigosos	Classe II A – Não inertes
	Classe II B - Inertes

**Anexo 2:** Exigências químicas e físicas de pozolanas.

Tabela 1 – Exigências químicas

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % mínimo	70	70	50
SO <sub>3</sub> , % máx.	4.0	5.0	5.0
Teor de umidade, % máxima	3.0	3.0	3.0
Perda ao fogo, % máxima	10.0	6.0	6.0
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O, % máxima	1.5	1.5	1.5

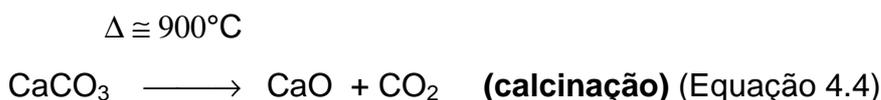
Tabela 2 – Exigências físicas

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 µm, % máxima	34	34	34
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mínima	75	75	75
Índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias, em MPa	6.0	6.0	6.0
Índice de atividade pozolânica água requerida, % máxima	115	110	110

### Anexo 3: Reações do ciclo da cal aérea

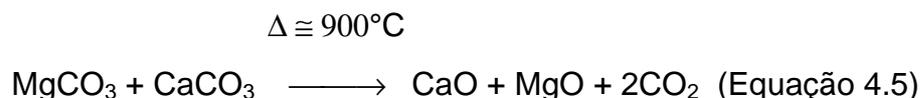
#### Fabricação da Cal Virgem (cal viva):

Obtido a partir de calcários cálcicos que apresentam no máximo 20% de  $MgCO_3$ , numa reação de calcinação ou queima (Equação 4.4).



100                      56      44  
REDUÇÃO DO PESO

Ou a partir de calcários dolomíticos ou magnesiano que apresentam no mínimo 20% de  $MgCO_3$ , numa reação de calcinação ou queima (Equação 4.5).



O  $CaO$  é o principal composto da Cal Virgem Cálcica e o  $CaO + MgO$  são os principais compostos da Cal Virgem Dolomítica ou Magnesiana.

#### Fabricação da Cal Hidratada (Cal Extinta)

A cal extinta, também chamada de cal hidratada, é resultante da combinação da cal viva ou cal virgem com a água. Essa reação de hidratação se faz com grande desprendimento de calor e aumento de volume.

A fabricação pode ser feita de duas maneiras:

- Cal hidratada calcária:



AUMENTO DE VOLUME

- Cal hidratada dolomítica:



### AUMENTO DE VOLUME

Nestas operações que se chamam extinção da cal, as pedras ficam reduzidas a pó finíssimo, que se transforma em pasta se quantidade de água for excessiva. Os produtos principais formados são:

- $\text{Ca(OH)}_2$  da cal hidratada cálcica;
- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$  da cal hidratada dolomítica ou magnesiana.

Fluxograma básico de fabricação da cal aérea:

**calcário** —→ **queima** —→ **hidratação** —→ **moagem** —→ **distribuição**

#### Endurecimento da Cal Hidratada

A pasta uma vez utilizada, seca e endurece pela combinação do  $\text{CO}_2$  do ar com o hidróxido em presença da água, que funciona como um catalisador dissolvendo a cal e o  $\text{CO}_2$ , tal como as equações 4.8 e 4.9.

- Cal hidratada calcária solúvel em água



- Cal hidratada dolomítica ou magnesiana solúvel em água



O endurecimento se faz com a regeneração do calcário e posterior evaporação de água. A argamassa (formada com pasta de cal e areia) deve ter contato com o ar para que possa ocorrer a reação com o  $\text{CO}_2$  (teor de  $\text{CO}_2$  no ar é de apenas 0,04%, o que explica a lentidão do processo), portanto justificado o uso da areia para facilitar a penetração do ar no interior da argamassa. Não podendo

haver também a impermeabilização prematura da superfície de revestimento (através de tintas ou similares).

**Anexo 4:** Exigências químicas e físicas da cal virgem (NBR 6453)

Tabela 1 – Exigências químicas

Compostos		Limites		
		CV-E	CV-C	CV-P
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	<5%	<5%	<13%
	No depósito ou na obra	<7%	<7%	<15%
Óxidos totais na base não-volátil (CaO + MgO)		>90%	>88%	>88%
Água Combinada		<3%	<3,5%	<3%
		<3,6%	<4%	<3,6%

Tabela 2 - Exigências físicas

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

Sendo:

- cal virgem especial: CV-E;
- cal virgem comum: CV-C;
- cal virgem em pedra: CV-P.

**Anexo 5:** Exigências químicas e físicas da cal hidratada (NBR 7175).

Tabela 1 - Exigências químicas

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	Na fábrica	<5%	<5%	<13%
	No depósito ou na obra	<7%	<7%	<15%
Óxido não-hidratado calculado		<5%	Não exigido	<5%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO + MgO)		>88%	>88%	>88%

Tabela 2 - Exigências físicas

Determinações		Limites	
		CH-I e CH-II	CH-III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm (nº 30)	<0,5%	<0,5%
	Peneira 0,075 mm (nº 200)	<15%	<15%
Estabilidade		Ausência de cavidades e protuberâncias	Ausência de cavidades e protuberâncias
Retenção de água		>80%	>700%
Plasticidade		>110%	>110%
Incorporação de areia		<2,5%	<2,2%

Sendo:

- CH-I: cal hidratada especial;
- CH-II: cal hidratada comum;
- CH-III: cal hidratada comum com carbonatos.

**Anexo 6:** Traços indicados para as utilizações mais comuns das argamassas.

APLICAÇÕES		TRAÇOS			
<i>Grupo</i>	<i>Subdivisão</i>	<i>Cimento Portland</i>	<i>Cal Hidratada</i>	<i>Areia</i>	<i>Categoria da Areia</i>
Alvenaria de Tijolos Maciços	Esp. 1 tijolo - 20 a 22 cm	1	1,5	6	Grossa comum
	Esp. 1/2 tijolo - 10 a 11 cm	1	2	8	Grossa lavada
	Esp. 1/4 tijolo - 5 a 6cm (cutelo)	1	2	8	Grossa lavada
Alvenaria de Tijolos Laminados (maciços ou 21 furos)	Esp. 1 tijolo - 20 a 22 cm	1	1	6	Grossa lavada
	Esp. 1/2 tijolo - 10 a 11 cm	1	1	5	Grossa lavada
Alvenaria de Tijolos de 6 Furos	A chato	1	1,5	6	Grossa comum
	A espelho	1	2	8	Grossa lavada
Alvenaria de Tijolos de 8 Furos	A chato	1	1,5	6	Grossa comum
	A espelho	1	2	8	Grossa lavada
Alvenaria de Blocos de Concreto para Vedação	Esp. 20 cm	1	0,5	8	Grossa lavada
	Esp. 15 cm	1	0,5	8	Grossa lavada
	Esp. 10 cm	1	0,5	6	Grossa lavada
Alvenaria de Blocos de Concreto Autoportantes	Esp. 20 cm	1	0,25	3	Grossa lavada
	Esp. 15 cm	1	0,25	3	Grossa lavada
Alvenaria de Blocos de Vidro		1	0,5	5	Média lavada
Alvenaria de Pedras Irregulares		1		4	Grossa comum
Alvenaria de Elementos Vazados de Concreto	Esp. 6 cm	1		3	Média lavada
Chapisco	Sobre alvenaria	1		4	Grossa lavada
	Sobre concreto e tetos	1		3	Grossa lavada

<b>Emboço</b>	Interno, base para reboco.		1	4	Média lavada
	Interno, base para cerâmica.	1	1,25	5	Média lavada
	Interno, para tetos.	1	2	9	Média lavada
	Externo, base para reboco.	1	2	9	Média lavada
	Externo, base para cerâmica.	1	2	8	Média lavada
<b>Reboco</b>	Interno, base para pintura.		1	4	Fina lavada
	Externo, base para pintura.		1	3	Fina lavada
	Barra lisa	1		1,5	Fina lavada
	Interno, para tetos, base para pintura.		1	2	Fina lavada
<b>Assentamento de Revestimentos</b>	Interno-cerâmicas	1	1	5	Média lavada
	Externo-cerâmicas	1	0,5	5	Média lavada
	Peitoris, soleiras e capeamentos.	1		4	Média lavada
<b>Pisos</b>	Base regularizadora para cerâmicas	1		5	Grossa lavada
	Base regularizadora p/ pisos monolíticos	1		3	Grossa lavada
	Base regularizadora p/ tacos	1		4	Grossa lavada
	Colocação de cerâmicas	1	0,5	5	Média lavada
	Colocação de tacos	1		4	Média lavada
	Cimentados alisados	1		3	Fina lavada