



## ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE CIMENTOS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Lorenzo Pratti Prando<sup>1</sup>, Marcos Roberto Teixeira Halasz<sup>2</sup>

1. Mestrando no Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental –  
Faculdades Integradas de Aracruz - e-mail: lorenzoprando@hotmail.com

2. Professor das Faculdades Integradas de Aracruz. Brasil.

Recebido em: 06/05/2013 – Aprovado em: 17/06/2013 – Publicado em: 01/07/2013

### RESUMO

Grande parte dos processos industriais são fontes geradoras de resíduos, provocando degradação ao meio ambiente quando expostos de maneira inadequada. A utilização de resíduos proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais, na fabricação do cimento Portland, apresenta-se como uma excelente alternativa para diminuição do impacto ambiental e como bom contribuidor para o desenvolvimento sustentável, considerando que o ramo da construção civil é o único setor capaz de absorver quase que totalmente os resíduos que produz e o que apresenta melhor indicativo para absorção desses materiais. Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica da aplicação de resíduos provenientes do corte e polimento aplicados durante o processo de beneficiamento de rochas ornamentais, como adição mineral na fabricação do cimento Portland. Para tal, foram confeccionadas formulações contendo adições de resíduos em substituições parciais do calcário (material carbonático) nas concentrações de 1,5%, 3%, 5% e 6,5% em massa. Os ensaios indicaram que o cimento fabricado com adições dos resíduos apresentou-se totalmente eficiente em todas as análises quando adicionado a uma proporção de 1,5% e que o ensaio químico, que determina a quantidade de resíduo insolúvel presente no cimento, limitou a adição de concentrações superiores. Observa-se que, na concentração de 1,5%, todas as características e propriedades determinam o produto como cimento, estando de acordo com as normas técnicas de fabricação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Adições minerais, cimento Portland, resíduos de rochas ornamentais, sustentabilidade.

### ANALYSIS OF PHYSICAL CHEMICAL PARAMETERS OF CEMENTS WITH INCORPORATION OF ORNAMENTAL STONES WASTE

#### ABSTRACT

Many of the industrial processes are sources of waste, causing environmental degradation when exposed improperly. The use of waste from the processing of dimension stone in the manufacture of Portland cement, presents itself as an excellent alternative to reducing environmental impact, and greater contribution to

sustainable development, considering that the construction industry is the only sector capable of almost totally absorb the waste it produces, and presents better target for uptake of these materials. This study aims to analyze the feasibility of application of waste from the cutting and polishing generated during the processing of natural stones, such as mineral admixture in the manufacture of Portland cement CP III - 40. For this, formulations were prepared containing additions of residues in total substitution of lime (carbonate material) at concentrations of mass by 1.5%, 3.0%, 5.0% and 6.5%. The tests indicated that the cement manufactured with additions of waste has been completely effective when added at a ratio of 1.5% and the chemical assay which determines the amount of insoluble residue present in the cement restricted adding higher concentrations. It is observed that at a concentration of 1.5% all the characteristics and properties necessary to characterize the product as a cement have been reached being in accordance with the standards manufacturing techniques.

**KEYWORDS:** Additions minerals, Portland cemen, dimension stone wastes, Sustainability.

## INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca no cenário mundial em relação ao beneficiamento de rochas ornamentais, liderando tanto a produção quanto o consumo na América Latina, sendo responsável por cerca de 1,8% do consumo mundial. A participação do Brasil alcança 4,2% se situando entre os 10 maiores produtores e consumidores mundiais de cimento. Apesar de ser o quarto maior consumidor de cimento do mundo, o consumo per capita de 311 kg de cimento/habitante, em 2010, está muito abaixo do registrado em países desenvolvidos que, em tese, deveriam consumir menor quantidade do produto por terem sua infraestrutura já desenvolvida (SNIC, 2011).

Devido à ascensão do setor de rochas ornamentais nos últimos anos, houve um aumento da preocupação com o impacto ambiental causado tanto na extração como no processo de beneficiamento de rochas ornamentais. Dentre os grandes problemas ambientais atuais, encontra-se a necessidade de destinar milhões de toneladas de resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais sem comprometer o meio ambiente e o bem-estar da população (NEVES, 2002).

A destinação incorreta dos resíduos provenientes de corte e polimento de rochas ornamentais causam problemas no fluxo hídrico, assoreamento, turbidez e destruição de espécies nativas que dependem exclusivamente de condições biológicas naturais. Demonstrar o constante desenvolvimento do setor, sem que haja um impacto sobre o meio ambiente, é uma missão que pode ser alcançada. Dessa forma, a reciclagem do resíduo em forma de um subproduto ou, até mesmo, na inserção de novos produtos no mercado torna-se uma modalidade viável que possibilita agregar valor e ajudar a minimizar o problema ambiental.

Tendo em vista que as estimativas para o consumo de cimento são crescentes e que o mercado atual atende apenas ao consumo interno, a falta de produto, no mercado, acarretaria o aumento disparado do preço, uma vez que a oferta é escassa. Uma alternativa para aumentar a produção sem ocasionar custo adicional seria a inserção de materiais mais baratos no processo produtivo, sem que haja perda nas características físicas e químicas do produto (CARPIO, 2005).

A utilização de resíduos, provenientes de rochas ornamentais para a obtenção

de um cimento modificado tem, como vantagens, diminuir a quantidade de rejeito a ser descartado de maneira incorreta, além de agregar valor a um resíduo indesejável. O uso de adições minerais na construção civil é um importante exemplo de prática sustentável, em que as adições minerais normalmente utilizadas são resíduos provenientes de outras indústrias, os quais seriam descartados em grandes quantidades em locais impróprios, gerando riscos de contaminação do solo e fontes de água (DAL MOLIN, 2005).

Neste trabalho, foi investigada, por meio de ensaios experimentais, a viabilidade técnica da incorporação de resíduos de corte e polimento de rochas ornamentais na produção de cimento Portland (CPIII-40).

## **MATERIAL E METODOS**

Na realização dos ensaios experimentais para a fabricação do cimento Portland modificado, os resíduos de corte e polimento foram adicionados, separadamente, com as demais adições no processo. As matérias-primas utilizadas na fabricação (clínquer, gesso e escória de alto forno) foram cedidas por uma empresa do segmento de fabricação de cimento Portland, localizada ao norte do estado do Espírito Santo, assim como os ensaios físicos e químicos no cimento Portland modificado.

Este trabalho utilizou, como objeto de estudo a lama proveniente do processo de corte e polimento de rochas ornamentais. Para realização dos ensaios foram utilizados 60 kg de resíduo proveniente do processo de corte e 60 kg do resíduo do polimento variando a sua aplicação no cimento de acordo com as quantidades determinadas pelo planejamento experimental. Os resíduos foram recolhimentos de dois lugares distintos: a primeira amostragem do silo de corte, a uma elevada umidade, tendo em vista que, neste processo, água é adicionada para facilitar o corte; e a segunda amostragem realizada no silo de polimento, onde se utilizam agentes químicos (ceras e resinas) para moldar às chapas, proporcionando brilho e acabamento.

### **PREPARAÇÃO DA AMOSTRA**

Os objetivos de uma preparação inicial do material a ser trabalhado são: realizar a separação dos constituintes e remoção de compostos indesejáveis na amostra (ex: componente grosseiro). O resíduo foi pesado em balança com precisão de 0,1 g e realizado o quarteamento, processo no qual é realizada a divisão em quatro partes iguais de uma amostra semi-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si, para constituir uma nova amostra, e descartadas as partes restantes. O processo de quarteamento foi realizado conforme preconiza a NBR 10007 (ABNT, 2004). Por meio de ensaios em laboratório, o resíduo foi caracterizado quanto as suas propriedades como umidade, densidade e distribuição granulométrica.

### **DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO RESÍDUO**

Para determinação da umidade do resíduo (h) do processo de corte e do polimento, cerca de  $400 \pm 0,01g$  foram adicionadas a uma cápsula metálica, pesando todo o conjunto, determinando assim M1. Em seguida, foi levada para uma estufa, a temperatura de  $105 \pm 3^{\circ}C$ , por um período de, aproximadamente, 24 horas. O conjunto foi retirado e levado para um dessecador onde permaneceu até atingir a temperatura ambiente, determinando assim M2, esse processo foi realizado até se

obter um peso constante. O experimento foi realizado em triplicata para uma maior confiabilidade nos dados obtidos, sendo determinado pelo procedimento descrito na NBR 6457 (ABNT, 1986).

O teor de umidade presente no resíduo do processo de corte e do polimento é determinado por meio da Equação 1.

$$h = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3} \cdot 100 \quad (1)$$

Em que  $h$  é o teor de umidade, em %,  $M_1$  é a massa do resíduo úmido mais a massa do recipiente,  $M_2$  é a massa do resíduo seco mais a massa do recipiente e  $M_3$  é a massa do recipiente (cápsula metálica).

#### DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO RESÍDUO

O método usado para determinação da massa específica dos resíduos foi a picnometria. Esse método é utilizado pelo fato de o resíduo possuir um baixo coeficiente de dilatação e um maior grau de eficiência em relação aos demais métodos para determinação da massa específica. O experimento foi realizado em triplicata para uma maior confiabilidade nos dados obtidos conforme procedimento determinado pela NBR 6508 (ABNT, 1984). Os picnômetros utilizados nos testes podem ser observados na Figura 01. Para o ensaio, foram usados cerca de 350 g de resíduo, previamente preparado.



**FIGURA 1** - Picnômetro para determinação da massa específica dos resíduos

Fonte: Acervo do autor.

A massa específica do resíduo do processo de corte e de polimento foi determinada por meio da Equação 2.

$$\rho = \frac{M_1 \cdot 100 / (100 + h)}{\left[ M_1 \cdot \frac{100}{100 + h} \right] + M_3 - M_2} \cdot \rho_T \quad (2)$$

Em que  $\rho$  é a massa específica em g/cm<sup>3</sup>,  $M_1$  é a massa do resíduo úmido,  $M_2$  é a

massa do conjunto (picnômetro + resíduo + água) na temperatura de ensaio e  $M_3$  é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência;  $h$  é a umidade inicial do resíduo e  $\rho_T$  a massa específica da água, na temperatura de ensaio, obtida na tabela anexo à norma NBR 6508 (ABNT, 1984).

#### DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Consiste em determinar uma sequência de peneiras com aberturas diferentes, que permitem que diferentes percentuais de materiais fiquem retidos e outros percolem para a próxima peneira. O resíduo para ser adicionado ao cimento deve passar pela peneira com 0,075 mm de diâmetro (série Taylor # 200). Por ser mais grosso que a amostra requerida, o material foi caracterizado utilizando uma série de peneiras seguindo a sequência proposta na Tabela 1. O resultado do processo de peneiramento é a quantidade retida acumulada do material em cada peneira.

**TABELA 1** - Sequência de peneiras.

Tyler / Mesh	Abertura (mm)
28	0,589
48	0,295
60	0,248
80	0,175
100	0,147
200	0,075

Fonte: acervo do autor.

#### DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA DOS RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Inicialmente, foi necessário caracterizar o resíduo, bem como as matérias-primas, para determinar o tipo de cimento Portland a ser utilizado na incorporação dos resíduos. Os resíduos de corte e polimento foram caracterizados quimicamente por meio de ensaios de fluorescência de raios-X (FRX). A fluorescência foi obtida pelo método do pó, coletado em um equipamento Bruker-AXS D5005, equipado com espelho de Goebel para feixe paralelo de raios X, nas seguintes condições de operação: radiação Co K $\alpha$  (35 kV/40 mA); velocidade do goniômetro de 0,02° 2 $\theta$  por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e coletados de 5 a 80° 2 $\theta$ .

#### DETERMINAÇÃO DA ANÁLISE QUÍMICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS

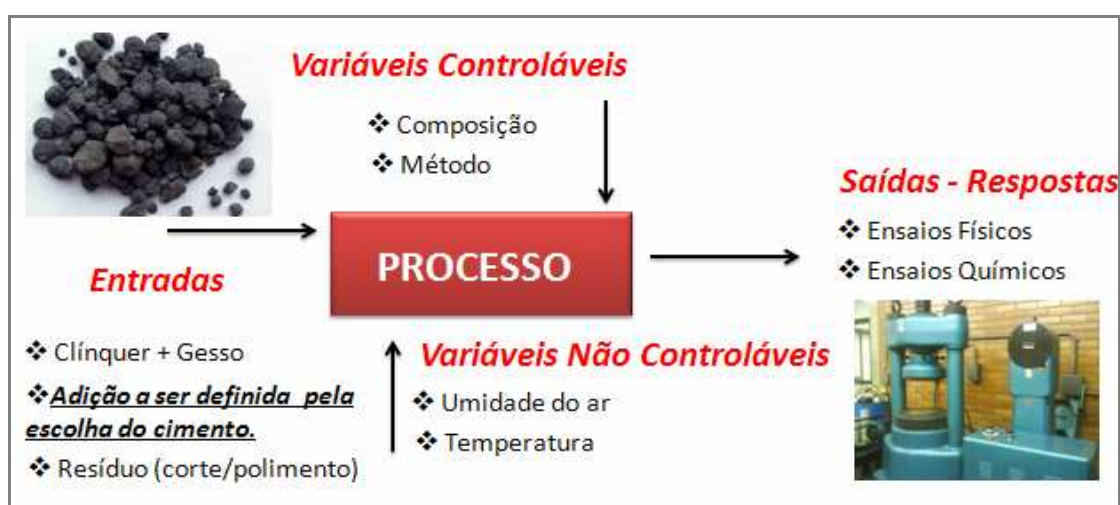
A análise química das matérias-primas do cimento: gesso, clínquer e escória de alto-forno, foi realizada por fluorescência de raios-X (FRX) em laboratório de empresa especializada em tecnologias do cimento. Com base nas análises químicas das matérias-primas e dos resíduos do processo de corte e polimento, foi determinado o tipo de cimento Portland a ser produzido e, posteriormente, verificado, com base nos resultados experimentais, se o cimento atende às legislações pertinentes. Os ensaios físicos foram realizados com o intuito de verificar a possibilidade de incorporação do resíduo de corte e polimento no cimento e qual a sua faixa de aplicação.

#### DETERMINAÇÃO DAS PROPORÇÕES DE INCORPORAÇÃO

Para determinação da quantidade de resíduos que seriam adicionados aos corpos de provas foi realizado um planejamento para realização dos ensaios experimentais. No planejamento, foi utilizada a variação de dois

componentes que são as principais matérias-primas para constituição do cimento Portland CP III – 40, o conjunto (clínquer + gesso) e os resíduos de corte e polimento, a quantidade de escória de alto-forno se manteve constante. Essa análise engloba as restrições de ambos os limites dos componentes, ou seja, tanto inferior como superior, proporcionando, assim, uma situação de otimização de misturas.

A metodologia utilizada para a fabricação das diversas concentrações de resíduo no cimento será executada com base nas informações fornecidas pela literatura e o procedimento definido pelas variáveis respostas do planejamento, assim como a quantidade de ensaios que deverão ser realizados experimentalmente. O processo de fabricação é afetado por uma série de variáveis, que podem ser controláveis ou não, conforme Figura 2. O planejamento foi afetado pela escolha do tipo de cimento Portland utilizado, assim como as suas propriedades físicas e químicas.



**FIGURA 2** - Fluxograma da determinação da proporção de adição de resíduos no cimento Portland.

A ordem de execução dos experimentos é aleatória, com o propósito de minimizar a influência de fatores externos e até mesmo evitar tendenciar resultados. O *software Minitab Versão 16.0* foi o programa de estatística usado para realizar os cálculos referentes ao planejamento. As porcentagens foram determinadas por meio dos dados da composição de cada componente presente no cimento Portland CP III – 40. Para verificação da real funcionalidade do cimento Portland modificado, foram realizados ensaios físicos e químicos, visando a expor o material a reais condições de uso.

#### CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND (CPIII-40)

A caracterização química do cimento Portland foi realizada através do ensaio de determinação de resíduo insolúvel, determinação de perda ao fogo e determinação de compostos químicos (Anidrido Sulfúrico  $SO_3$ ).

#### Determinação do Resíduo Insolúvel

A determinação da quantidade de resíduo insolúvel presente no cimento foi determinada pelo procedimento descrito pela NBR 15 (ABNT, 2004). Seu valor (%) é usado como parâmetro para estimar o teor de cinza presente no cimento. Para a

determinação da quantidade de resíduo insolúvel presente no cimento, preparado com adições de resíduo do processo de corte e polimento, foi pesado cerca de  $1,00 \pm 0,001$  g e adicionado 25 mL de água e 5 mL de HCl. A solução foi aquecida em uma placa aquecedora para manter a temperatura próxima a de ebulição (Figura 3). Quando a amostra se dissolveu totalmente, foi diluída em, aproximadamente, 50 mL de água. A amostra foi filtrada com utilização de papel de filtro em um béquer e por, aproximadamente, 12 vezes, foi realizado o processo de lavagem do papel e do resíduo com água quente.



**FIGURA 3** - Solução na placa aquecedora para determinação do resíduo insolúvel.

Fonte: Acervo do autor.

O papel de filtro e seu conteúdo foram transferidos para o béquer inicialmente usado e adicionado 100 mL de solução de NaOH 1%. O papel de filtro foi macerado e digerido pela solução por, aproximadamente, 15 min (Figura 4). Na solução foram adicionadas 4 gotas de solução de vermelho de metila (indicador) e para acidificação do meio, 5 gotas de HCl (solução passando do meio básico para o meio ácido) adquirindo coloração rosada, sendo filtrada com papel de filtro e lavada a amostra final com solução quente de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  para retirar toda a acidez da solução. O precipitado formado foi transferido para um cadinho de porcelana, sendo seco em estufa por aproximadamente, 60 min e queimado lentamente sem inflamar até desaparecer todo o carvão do papel. Em seguida, o resíduo foi calcinado entre  $900^\circ\text{C}$  a  $1000^\circ\text{C}$ , durante 30 min, seco em um dessecador e pesado.



**FIGURA 4** - Adição de NaOH na solução com papel macerado.  
Fonte: Acervo do autor.

A porcentagem de resíduo insolúvel presente no cimento com aproximação de 0,01% foi determinada por meio da Equação 3.

$$RI = \frac{m_2 - m_1 - m_3}{m} \times 100 \quad (3)$$

Em que  $m$  é a massa da amostra, em gramas;  $m_2$  é a tara do cadinho mais a massa do resíduo insolúvel, em gramas;  $m_1$  é a massa do cadinho, em gramas; e  $m_3$  é a massa do resíduo devido ao ensaio em branco, quando realizado, em gramas.

#### Determinação de Perda ao Fogo

A determinação da quantidade de perda ao fogo, no cimento, foi determinada pelo procedimento descrito pela NBR NM 18 (ABNT, 2004). Para a determinação da quantidade de perda ao fogo presente no cimento, preparado com adições de resíduo do processo de corte e polimento, foi pesado cerca de  $1,00 \pm 0,001$  g e adicionado a um cadinho de porcelana, levado a uma mufla à temperatura de  $950^\circ\text{C}$  (Figura 5) por, aproximadamente, 15 min. Após o processo de calcinação, a amostra foi seca em um dessecador. Esse processo foi realizado em períodos de 5 min até obter uma massa constante.



**FIGURA 5** - Mufla utilizada na determinação de perda ao fogo.  
Fonte: Acervo do autor.

A porcentagem de perda ao fogo do cimento foi determinada através da Equação 4:

$$[\text{Perda ao Fogo}] = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad (4)$$

Em que  $m_1$  é a massa do cadinho mais a massa da amostra ensaiada, em gramas;  $m_2$  é massa do cadinho mais a massa da amostra após a calcinação, em gramas; e  $m$  a massa da amostra utilizada no ensaio, em gramas.

#### Determinação de Compostos Químicos – (Anidrido Sulfúrico $\text{SO}_3$ )

Para determinação de compostos químicos (Anidrido Sulfúrico  $\text{SO}_3$ ) foi empregado o método da pastilha fundida, determinada por Fluorescência de Raios-X (FRX) pelo aparelho Rigaku Ultima IV, gerador de raios-X de 3kV, tubo de raios-X de Cu (foco normal de 2kV), em empresa especializada na fabricação de cimento Portland, sendo o método mais moderno para a determinação de compostos químicos presente no cimento.

#### CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CIMENTO PORTLAND (CPIII-40)

##### Determinação da Resistência Mecânica

A caracterização física do cimento Portland foi realizada através do ensaio de resistência mecânica. Este ensaio mede a quantidade de carga que ele suporta sem lhe causar deformações na sua estrutura, foi realizada por procedimento descrito pela NBR 7215 (ABNT, 1996). Para cada proporção de resíduo, determinado através do planejamento experimental, foi preparada uma massa de cimento e adicionada ao misturador manual sendo misturados a estes quatro tipos de areia com granulometrias diferentes, (areia grossa, média grossa, média fina e fina) obedecendo às quantidades e os critérios da norma.

Após realizar a mistura manual dos materiais sólidos foi adicionada água. A argamassa de cimento pronta foi utilizada para preenchimento dos corpos de provas, nas dimensões de (10 x 4 cm). Para garantia da estanqueidade, antes de

realizar o preenchimento dos corpos de prova, a superfície interna foi untada com uma leve camada de óleo. A colocação da argamassa na forma é realizada com auxílio de uma espátula em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes.

Os corpos de prova, após serem preenchidos com a argamassa, foram imersos, separados entre si num tanque com água (não corrente), saturada de cal na câmara úmida. Desde que são retirados da câmara até o instante do ensaio, os corpos de prova foram protegidos de maneira que toda a superfície exterior permanecesse úmida. A idade de cada corpo de prova é contada a partir do instante em que o cimento é exposto em contato com água saturada com cal, variando de acordo com a norma técnica de 03, 07 e 28 dias de cura. O ensaio foi realizado em três dias, sendo os corpos de provas retirados da solução nas respectivas idades 03, 07 e 28 dias.

Após retirar os corpos de provas da câmara úmida foi realizado o capeamento das faces, fundindo enxofre em pó. Os moldes foram capeados de modo que a camada formada, em cada extremidade, satisfaça as condições geométricas do corpo de prova e apresente espessura em torno de 2,0 mm.

Os corpos de provas capeados foram rompidos na máquina de ensaios de compressão que transmite a carga de compressão ao corpo de prova a  $0,25 \pm 0,05$  MPa/s, nas idades especificadas para o tipo de cimento em ensaio, obedecendo às tolerâncias indicadas pela NBR 7215 (ABNT, 1996). Calculada a média das resistências individuais, em megapascal, dos quatro corpos de prova ensaiados na mesma idade, o resultado foi arredondado ao décimo mais próximo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados apresentados foram determinados em triplicata para uma maior confiança nos dados obtidos com garantia da diminuição de erros experimentais, sendo realizados conforme metodologia, tanto para caracterização dos resíduos como na fabricação do cimento Portland modificado, com adição de resíduos de corte e polimento de rochas ornamentais.

### PROPORÇÕES DE RESÍDUOS ADICIONADOS AO CIMENTO

Na realização do planejamento a quantidade de Escória de Alto-forno (EAF) foi mantida constante, variando apenas as proporções de *CPInd* (clínquer + gesso). Como o clínquer e o gesso foram moídos, industrialmente, na empresa especializada na fabricação de cimento Portland, em proporções mássicas pré-estabelecidas, foi adotada uma única proporção para esse conjunto.

Utilizando a variação de dois constituintes do *CPInd* e do resíduo, obtemos 09 pontos experimentais, dessa forma, será realizada a fabricação de cimento Portland com essas adições de resíduos, cuja composição, em cada corpo de prova em relação ao cimento produzido, pode ser representado na Tabela 2.

**TABELA 2** - Determinação das Proporções pelo Software Minitab.

Pontos Experimentais	Composição das Misturas (X - Componentes)		Composição do Cimento Final			
	Clínquer + Gesso	Resíduo	Escoria Alto Forno	Clínquer + Gesso	Resíduo	% de Resíduos
1	3/4	1/4	0,65	0,338	0,013	1,25%
<b>2</b>	<b>2/3</b>	<b>1/3</b>	<b>0,65</b>	<b>0,350</b>	<b>0,015</b>	<b>1,50%</b>
3	7/8	1/8	0,65	0,344	0,006	0,60%
<b>4</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0,65</b>	<b>0,300</b>	<b>0,050</b>	<b>5,00%</b>
5	6/7	1/7	0,65	0,340	0,007	0,73%
6	4/5	1/5	0,65	0,340	0,010	1,09%
<b>7</b>	<b>1/3</b>	<b>2/3</b>	<b>0,65</b>	<b>0,317</b>	<b>0,030</b>	<b>3,00%</b>
8	5/6	1/6	0,65	0,340	0,008	0,80%
9	8/9	1/9	0,65	0,340	0,005	0,50%

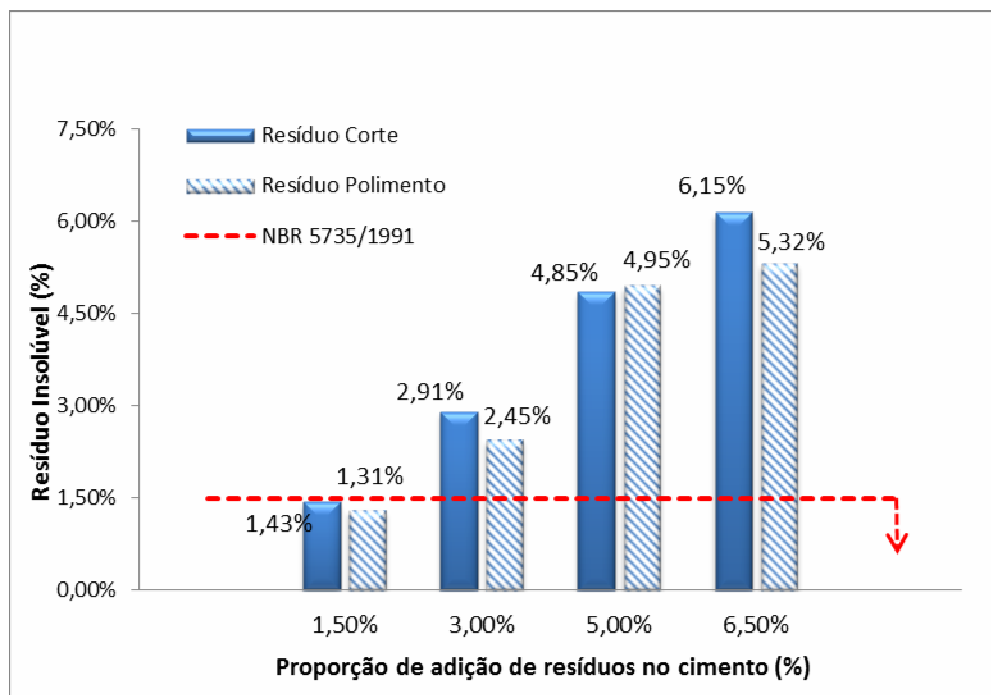
Por meio do planejamento, é possível determinar o total de experimentos que serão necessários para avaliar as variáveis respostas pré-determinadas e ainda minimizar a influência de fatores externos, além de diminuir e otimizar o número de experimentos. Os pontos experimentais com teor de resíduos abaixo de 1,5% foram desconsiderados, levando-se em conta que, industrialmente, uma adição mineral de compostos inferior a este teor tornaria inviável a sua utilização por se tratar de quantidades muito pequenas que inviabilizariam seu custo com transporte e logística, já que o material atualmente usado como material carbonático (calcário) possui um valor de venda no mercado muito baixo.

As melhores proporções de materiais apontadas pelo *software Minitab* foram as de cimentos com adições de 1,5%, 3% e 5% de resíduos do processo de corte e polimento, com limites de adições variando de 0,5% a 5%.

Por intermédio dessa determinação, foi calculada a quantidade de cada material que será utilizada em cada ensaio. Para confecção experimental dos corpos de ensaio, foi adicionada uma proporção de resíduo que está fora da norma de controle do cimento Portland CP III – 40, a de 6,5% de adição de material carbonático (resíduo). Esse ponto alocado fora dos padrões da norma servirá de indicativo para verificar se, mesmo fora dos limites, essa adição pode ser benéfica ao cimento, quando analisadas as suas propriedades.

#### RESÍDUO INSOLÚVEL (RI)

A determinação da quantidade de resíduo insolúvel presente no cimento com adições de resíduos do processo de corte e polimento é apresentada no Gráfico 1.



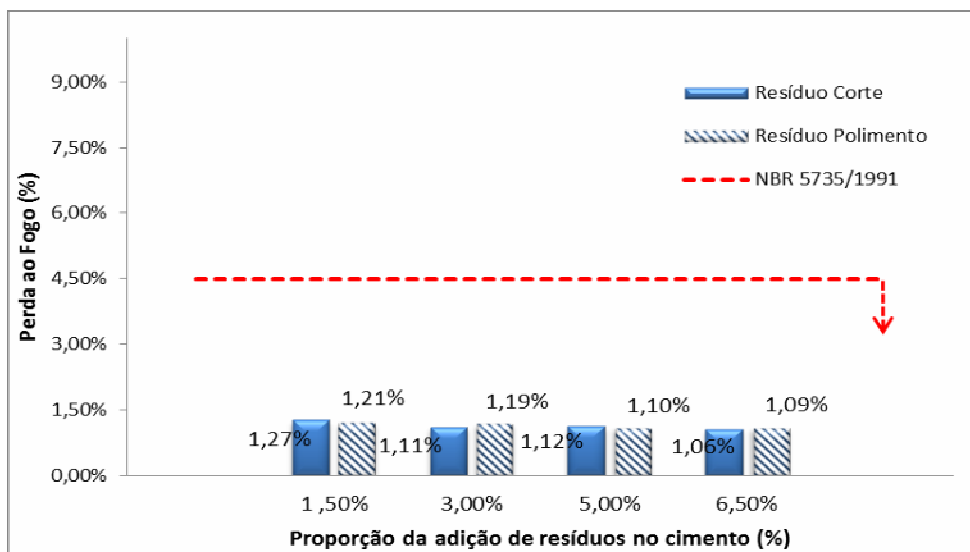
**GRÁFICO 1** - Resíduo insolúvel do cimento com adição de resíduo de corte e polimento.  
 Fonte: Acervo do autor.

Na medida em que se acrescentou o resíduo à mistura, houve um aumento gradativo na geração de resíduos insolúveis, em cada teor de adição. De acordo com a norma NBR 15 (ABNT, 2004), o valor máximo estabelecido da quantidade de resíduo insolúvel presente no cimento deve ser de  $\leq 1,5$  (% em massa). A grande maioria dos ensaios realizados nos cimentos com adições de resíduo do processo de corte e polimento apresentaram não conformidades, isto é, uma quantidade elevada de cinzas e impurezas, salvo pelo ensaio com adição de 1,5%, que apresentou um valor de 1,43% (em massa) com adição de resíduo de corte e 1,31% (em massa) com adição de resíduos de polimento.

Pode-se notar que a quantidade de cinzas e impurezas presentes no cimento produzido com adição de resíduo de corte é muito superior à do branco; mesmo o resíduo possuindo uma elevada quantidade, não caracterizou uma não conformidade, sendo o resultado satisfatório por estar dentro dos parâmetros de utilização.

#### PERDA AO FOGO (PF)

O ensaio de determinação de perda ao fogo exprime a diminuição de massa do cimento após aquecimento em mufla a 950°C. A maior parte desse valor é referente ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e, a outra parte, à água evaporada do gesso. A determinação da perda ao fogo do cimento, com adições de resíduos do processo de corte e polimento, é apresentada no Gráfico 2.



**GRÁFICO 2** - Perda ao fogo do cimento com adição de resíduo de corte e polimento.  
Fonte: Acervo do autor.

Na medida que se acrescentou o resíduo à mistura, houve uma diminuição gradativa no peso do cimento, ocasionando, assim, uma diminuição na determinação da perda ao fogo. De acordo com a norma NBR 18 (ABNT, 2004), o valor máximo permitido da quantidade de perda ao fogo de material presente no cimento Portland CP III – 40 é de  $\leq 4,5\%$  (em massa). Os ensaios realizados com todos os cimentos com adições de resíduos do processo de corte e polimento apresentaram-se totalmente eficientes, sem nenhuma não conformidade, isto atesta que a adição não proporcionou aumento na perda de peso do cimento quando exposto a elevadas temperaturas.

#### COMPOSTOS QUÍMICOS – (ANIDRIDO SULFÚRICO $SO_3$ )

A determinação da composição, quantidade de compostos químicos e, principalmente, da quantidade de Anidrido Sulfúrico ( $SO_3$ ), presentes no cimento fabricado com adição de resíduos do processo de corte e polimento, é apresentada na Tabela 3.

**TABELA 3** - Ensaio químico realizado por Fluorescência de Raios-X (FRX) no cimento modificado com adição de resíduos de rochas ornamentais.

Resíduo	Proporção (%)	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)
CORTE	1,50	48,99	31,66	10,97	2,09	<b>1,16</b>
	3,00	48,98	30,65	10,98	2,01	<b>1,02</b>
	5,00	48,90	30,44	10,95	1,96	<b>1,01</b>
	6,50	47,70	30,22	10,84	1,83	<b>0,86</b>
POLIMENTO	1,50	48,79	31,10	11,61	2,11	<b>1,08</b>
	3,00	48,61	31,70	11,46	1,91	<b>0,97</b>
	5,00	47,90	30,02	11,33	1,85	<b>0,85</b>
	6,50	47,82	29,90	11,02	1,81	<b>0,82</b>
<b>NBR 5735/1991</b>	--	--	--	--	--	<b>8,00</b>

De acordo com a NBR 5735 (ABNT, 1991) o valor máximo permitido de

anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) presente no cimento Portland CP III – 40 deve ser de 8% (em massa). Os ensaios realizados com todos os cimentos com adições de resíduos do processo de corte e polimento apresentaram-se totalmente eficientes, sem nenhuma não conformidade.

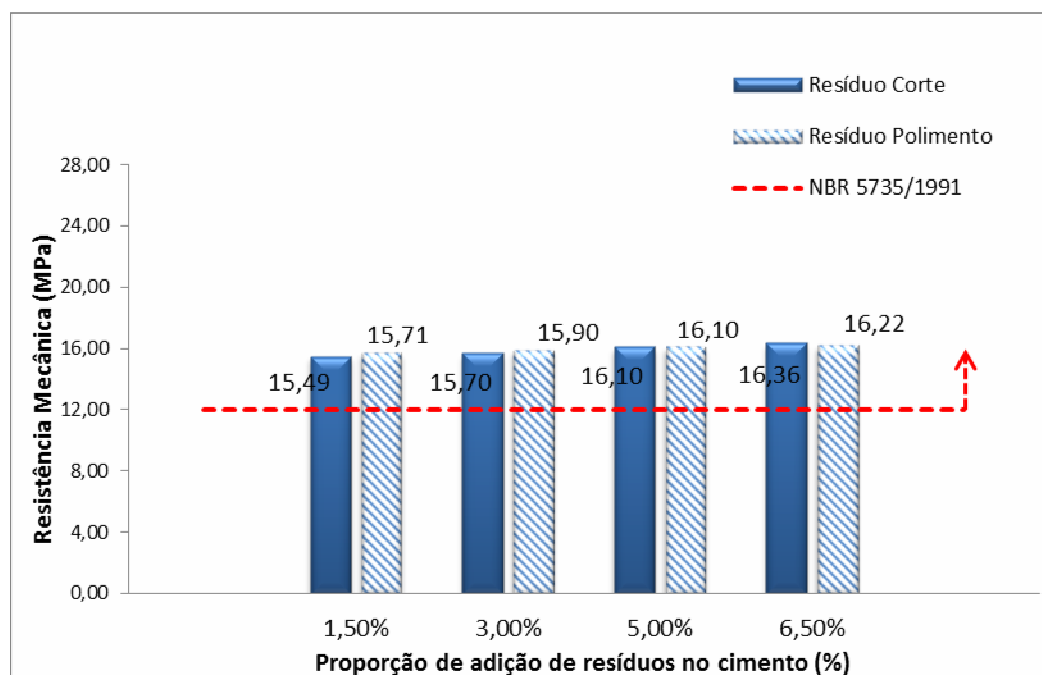
Os resultados se apresentaram satisfatórios, pois um elevado teor de anidrido sulfúrico, no cimento, proporciona uma diminuição do tempo de pega, ocasionando uma secagem prematura ao concreto que seja fabricado com esse tipo de cimento.

## RESISTÊNCIA MECÂNICA

Corpos de prova com 03 dias de idade

O cimento Portland preparado nas proporções de 1,5%, 3%, 5% e 6,5% de resíduos provenientes do corte e polimento de rochas ornamentais teve cada fração de resíduo utilizada na fabricação de cimento Portland CP III – 40. Para cada proporção, foi realizado o teste de resistência mecânica nas idades de 03, 07 e 28 dias, conforme descrito pela NBR 7215 (ABNT, 1996).

A média da determinação da resistência mecânica em MPa, realizada nos corpos de prova do resíduo proveniente do processo de corte e do polimento com três dias de idade, é apresentada no Gráfico 3.

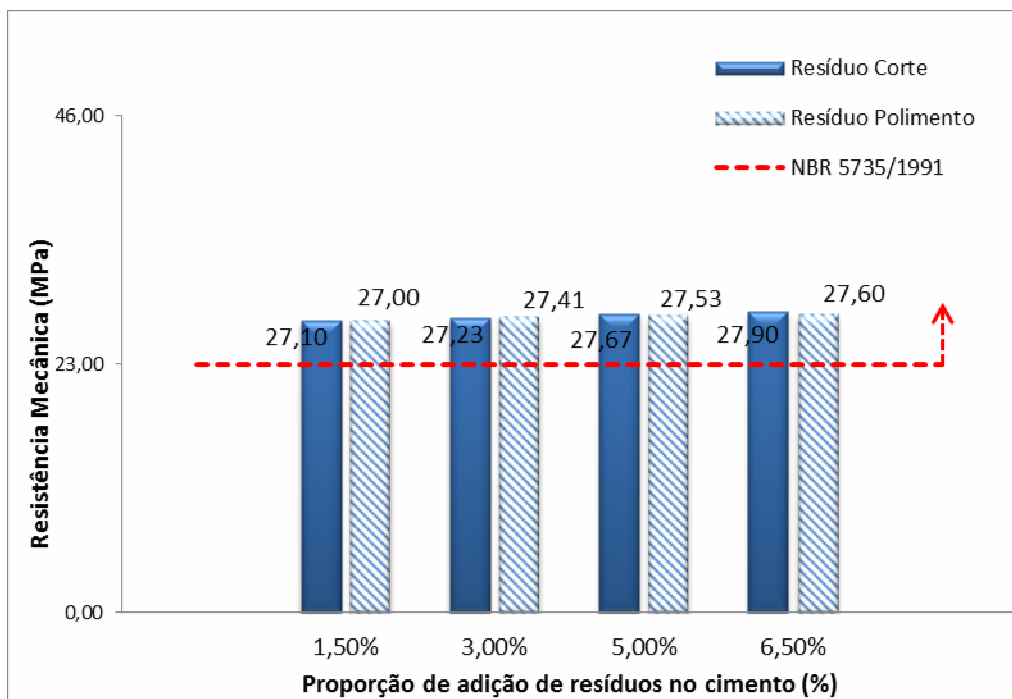


**GRÁFICO 3** - ensaio de resistência nos corpos de prova com três dias de idade – resíduo de corte e polimento.

A adição de resíduos na fabricação de corpos de prova proporcionou um aumento na resistência mecânica à medida que era adicionada nos corpos de prova com três dias de idade. O valor mínimo estabelecido por norma da quantidade de carga suportada por corpos de provas confeccionados, por meio do uso de cimento Portland CP III – 40 e ensaiados em teste de resistência à compressão com três dias de idade, é de 12 MPa. Os ensaios realizados com todas as adições de resíduos apresentaram-se totalmente satisfatórios, sem nenhuma não conformidade, isso atesta que a adição não proporcionou deficiências à resistência mecânica dos cimentos.

Corpos de prova com 07 dias de idade

A determinação da resistência mecânica em MPa, realizada nos corpos de prova do resíduo proveniente do processo de corte e do polimento com sete dias de idade, é apresentada no Gráfico 4.

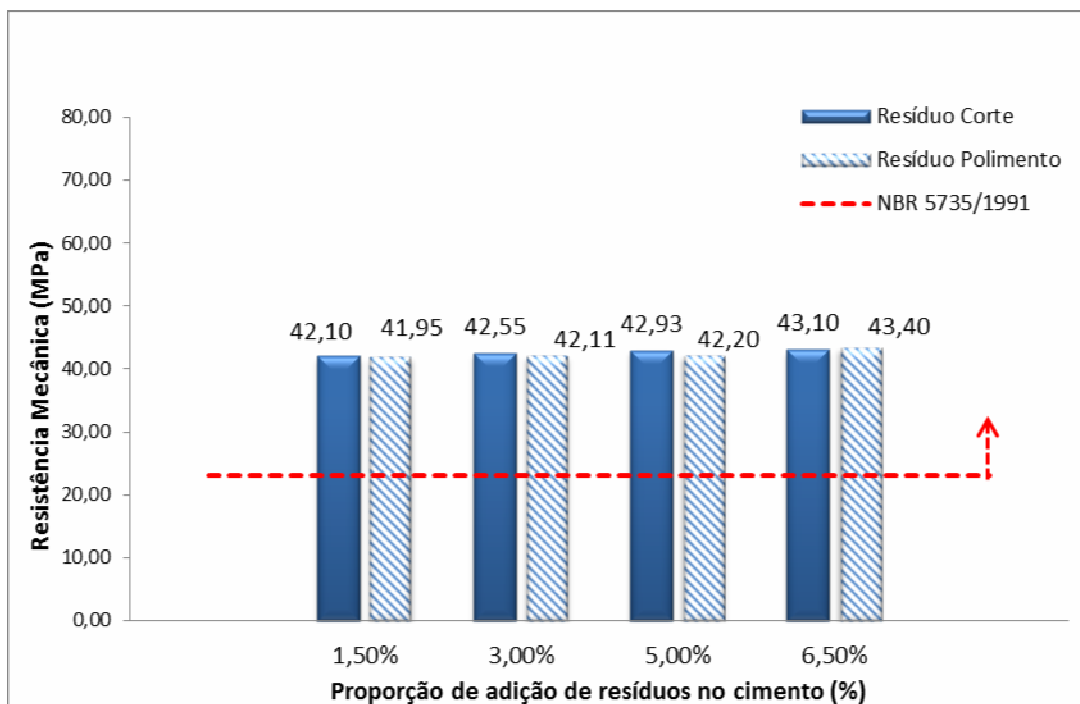


**GRÁFICO 4** - Ensaio de resistência nos corpos de prova com sete dias de idade – resíduo de corte e polimento.

A adição de resíduos na fabricação de corpos de prova proporcionou um aumento na resistência mecânica à medida que era adicionado nos corpos de prova com sete dias de idade. O valor mínimo estabelecido por norma da quantidade de carga suportada por corpos de provas confeccionados, por meio do uso de cimento Portland CP III – 40 e ensaiados em teste de resistência à compressão com sete dias de idade, é de 23 MPa. Os ensaios realizados com todas as adições de resíduos na idade de sete dias apresentaram-se totalmente satisfatórios, sem nenhuma não conformidade, isso atesta que a adição não proporcionou deficiências a resistência dos cimentos.

#### Corpos de prova com 28 dias de idade

A determinação da resistência mecânica em MPa, realizada nos corpos de prova do resíduo proveniente do processo de corte e do polimento com 28 dias de idade, é apresentada no Gráfico 5.



**GRÁFICO 5** - Ensaio de resistência nos corpos de prova com 28 dias de idade – resíduo de corte e polimento.

A adição de resíduos na fabricação de corpos de prova proporcionou um aumento na resistência mecânica à medida que era adicionado nos corpos de prova com 28 dias de idade. O valor mínimo estabelecido por norma da quantidade de carga suportada por corpos de provas confeccionados, por meio do uso de cimento Portland CP III – 40 e ensaiados em teste de resistência a compressão com 28 dias de idade, é de 40 MPa. Os ensaios realizados com todas as adições de resíduos nas idades de 28 dias apresentaram-se totalmente eficientes, sem nenhuma não conformidade, isso atesta que a adição não proporcionou deficiências a resistência dos cimentos.

Na realização de ensaios destrutivos em corpos de provas cilíndricos com três, sete e 28 dias de cura, realizada imersão em água com cal e posterior capeamento, os cimentos modificados não apresentaram deficiências e nem queda da sua resistência mecânica, pelo contrário, com a adição, houve um aumento da resistência em corpos de prova com maiores adições de resíduos. Em corpos de prova confeccionados com valores de adição de resíduos acima de 1,5%, esperava-se, de acordo com a literatura (KIATTIKOMOL et al., 2000), uma queda na resistência mecânica, pois quanto maior a quantidade de resíduo insolúvel presente no cimento maior seria a sua perda de resistência, fato que não foi comprovado na realização dos ensaios experimentais, que pode ser facilmente explicado pelo alto teor de Sílica ( $\text{SiO}_2$ ).

Um elevado valor de resistência mecânica é um grande indício de que a quantidade de água utilizada nos ensaios foi ideal para a quantidade de cimento utilizado, pois a relação água/resistência é muito importante para a qualidade do cimento produzido, pois, além de garantir a integridade de suas características nas análises físicas e químicas, suporta as mais diferentes aplicações na área da construção civil, sem que haja perda de estabilidade e dureza.

## CONCLUSÕES

Em primeiro lugar, para a caracterização dos resíduos de corte e polimento, foram realizados ensaios físicos para verificação dos seus índices de qualidade. O material para ser adicionado ao cimento precisa ser resistente, durável e inerte, não contendo impurezas que prejudicassem o endurecimento prematuro e, além disso, apresentou uma excelente distribuição granulométrica. Além da semelhança granulométrica visual entre o cimento e o resíduo, o ensaio de granulometria realizado com o auxílio de peneiras com diferentes diâmetros demonstrou que o resíduo possui uma granulometria mais elevada do que o cimento convencional, sendo necessária a realização de ensaios mecânicos para redução do tamanho médio das suas partículas.

A determinação da melhor proporção de adição de resíduo ao cimento foi determinada, variando as concentrações mássicas em 1,5%, 3%, 5% e 6,5% em substituição total do material carbonático (calcário) no cimento. Os ensaios físicos e químicos foram importantes para a verificação de todas as adições e parâmetros fundamentais para a escolha da melhor adição perante a norma técnica de fabricação do cimento Portland CP III – 40, a NBR 5735 (ABNT, 1991).

Na realização de ensaios destrutivos em corpos de prova cilíndricos com 03, 07 e 28 dias de cura, em imersão de água e cal, e posterior capeamento, os cimentos não apresentaram nenhuma não conformidade, pelo contrário, com a adição do resíduo, houve um aumento da resistência mecânica em corpos de prova com maiores adições de resíduo.

Com o intuito de caracterizar, quimicamente, o cimento modificado, foi realizado o teste de perda ao fogo que determina a quantidade de massa perdida pelo cimento quando exposto a elevadas temperaturas. As amostras de cimento se apresentaram confortáveis à exposição a elevadas temperaturas em mufla a 950°C, apresentando insignificativa perda de peso, fato diretamente proporcional ao grande aumento da resistência mecânica, já que cimentos com elevada perda ao fogo, possuem baixa resistência mecânica.

Uma característica muito importante no cimento é a quantidade de cinzas nele presente, quando realizado o ataque com ácido clorídrico e expostos a elevadas temperaturas. O teor de impurezas, no cimento, prejudica as reações e o endurecimento prematuro. Quando realizado nas amostras de cimento, houve uma grande ocorrência de não conformidades; a adição do menor valor de resíduo de corte e polimento ao cimento resultou em quantidade de resíduo insolúvel abaixo dos limites estabelecidos pela NBR 5735 (ABNT, 1991), que estipula um valor máximo em massa de 1,5%. Assim, à medida que a quantidade de resíduo foi adicionada, houve um aumento gradativo e proporcional na quantidade de resíduo insolúvel, sendo ele o agente limitador que impossibilitou adições em concentrações maiores.

Os melhores resultados comparando todos os parâmetros são os de aplicação de percentuais de resíduos maiores que 6,50% inviabilizando assim a conformidade com a norma. Todos os ensaios físicos e químicos se apresentam satisfatórios em todas as faixas de aplicação, mas adições acima de 1,5% não foram viáveis devido à presença de elevada quantidade de resíduos insolúveis nos ensaios químicos realizados, não enquadrando o cimento produzido às normas de fabricação.

Este trabalho buscou cumprir o importante papel de estimular a incorporação de forma mais sustentável de materiais minerais ao cimento, visando à diminuição

do passivo ambiental causado por sua disposição inadequada. Destarte, o trabalho produziu dados e informações que podem subsidiar novas pesquisas e experimentos na busca de novos materiais a serem empregados como aditivos no processo de fabricação do cimento Portland.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao CNPq pelo auxílio financeiro e concessão da bolsa.

## **REFERÊNCIAS**

CARPIO, R. C. **Otimização no Co-processamento de resíduos na indústria do cimento envolvendo custo, qualidade e impactos ambientais**. 2005. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, Geraldo. (Org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. V. 1.

KIATTIKOMOL, K.; JATURAPITAKKUL, C.; TANGPAGASIT, J. **Effect of insoluble residue on properties of Portland cement**. Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tungkru, Bangkok 10140, Thailand. Received 13 July 1998; accepted 17 May 2000.

JACKSON, P. J. Portland cement: classification and manufacture. In: HEWLETT, Peter C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. London: Ed. Arnold, 1998.

NEVES, G. de A. **Reciclagem de resíduos da serragem de granitos para uso como matéria-prima cerâmica**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Press Kit 2011**: relatório parcial. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 11 jun. 2012.

NORMAS ABNT - **NBR 15/2004**: cimento Portland – Análise Química – Determinação de Resíduo Insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

NORMAS ABNT - **NBR NM 18/2004**: cimento Portland – Análise Química – Determinação de Perda ao Fogo. Rio de Janeiro, 2004.

NORMAS ABNT - **NBR 5735/1991**: cimento Portland de alto forno. Rio de Janeiro, 1991.

NORMAS ABNT - **NBR NM 7215/1996**: cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, 1996.

NORMAS ABNT - **NBR 10007/2004**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.