

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o século passado, houve uma contribuição muito vasta, por parte dos processos industriais, para a contaminação do meio ambiente. Os resíduos tóxicos resultantes de tais atividades, muitas vezes enriquecidos em metais pesados, eram depositados ou despejados diretamente nos solos e cursos d'água, sem qualquer tipo de tratamento prévio (GUIMARÃES, 2007).

A indústria é um dos meios pelos quais os metais pesados entram nos diferentes sistemas (solo, águas e atmosfera), pois tal atividade retira do seu equilíbrio geoquímico massas de material ricos nestes elementos. Fora do seu equilíbrio, estes materiais tendem a reagir com os demais compartimentos (hidrosfera, atmosfera e biosfera) e a serem transportados ou transformados, persistindo neste meio e causando danos por muito tempo, mesmo após o controle das fontes de emissão (SALOMONS, 1995 apud GUMARÃES, 2007).

Os rejeitos e pilhas de estéril, oriundos das atividades de mineração, são fontes de contaminação em decorrência da presença de metais pesados, principalmente quando estes resíduos apresentam altos teores nestes metais e em minerais sulfetados. Estes metais, geralmente, estão associados a problemas de poluição e contaminação do meio ambiente, devido à sua toxicidade, propriedade de acumulação em organismos e persistência no ambiente.

No município de Marabá existe um parque siderúrgico com a presença de 10 empresas, são elas: COSIPAR, SINOBRÁS (antiga SIMARA), IBÉRICA, USIMAR, TERRA NORTE, SIDEPAR, SIDENORTE, DA TERRA, MARAGUSA E FERROGUSA CARAJÁS. E o principal resíduo proveniente desta atividade siderúrgica é a escória (COSTA e SILVA, p. 8, 2008).

A escória é um sub-produto inevitável nos processos siderúrgicos, sendo constituída em sua maior parte de aluminossilicatos de cálcio sob a forma vítrea. Ela resulta da combinação dos minerais da ganga do minério de ferro, das cinzas do coque e do calcário ou dolomito utilizados como fundentes. Sendo que os principais elementos contaminantes que a constituem são: Cobre-Cr, Zinco-Zn, Níquel-Ni, Cromo-Cr, Arsênio-As, Ferro-Fe, Chumbo-Pb (CASCUDO; HELENE, 2000).

Segundo Costa e Silva (2008) é gerado em torno de 450.000 toneladas de escória por ano. Isso se constitui em um problema sério para estas empresas, que devem se preocupar com o estoque e manejo desse resíduo, que ocupa cada vez mais área física para descarte, além dos custos e dos inconvenientes ecológicos.

Diante da problemática ambiental criada pela geração de escória nas siderúrgicas da região de Marabá, se faz necessário o desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a reciclagem desse material a fim de reduzir, ou até mesmo eliminar, o impacto ambiental causado.

Com isto, aqui neste trabalho será descrito um estudo realizado: “APROVEITAMENTO DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO, DO MUNICÍPIO DE MARABÁ, COMO MATÉRIA-PRIMA PARA FABRICAÇÃO DE MATERIAL CERÂMICO”. Este estudo vem como uma alternativa científica e tecnológica para aproveitamento de um material que até então, em alguns lugares, ainda é visto como rejeito.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 OBJETIVOS

#### Geral

Este trabalho tem por objetivo principal pontuar os impactos ambientais causados pela escória, e demonstrar, através de um estudo experimental, a possibilidade de se transformar esse material em um subproduto.

#### Específicos

- Analisar experimentalmente o processo de fabricação de material cerâmico utilizando escória de alto-forno e argila como matérias-primas;
- Desenvolver tecnologias alternativas que possibilitem reciclar escória;
- Planejar os experimentos e analisar os resultados, estatisticamente.

### 2.2 REVISÃO DA LITERATURA

### **2.2.1 Caracterização municipal**

Para realização da caracterização do município de Marabá, utilizamos como fonte de dados a Estatística Municipal de 2007. A seguir são abordados os aspectos fisiográficos (localização, demografia, clima, solos, hidrografia, vegetação) e uma retrospectiva econômica do município.

#### Localização

Com uma altitude média de 84 metros em relação ao nível do mar, Marabá está situada à margem esquerda do rio Tocantins, centralizada pelas coordenadas geográficas 05º 21' 54"Latitude Sul e 04º 07' 24"Longitude WGr. O município possui uma área de 15.092.3 km<sup>2</sup>. Ver figura 1.

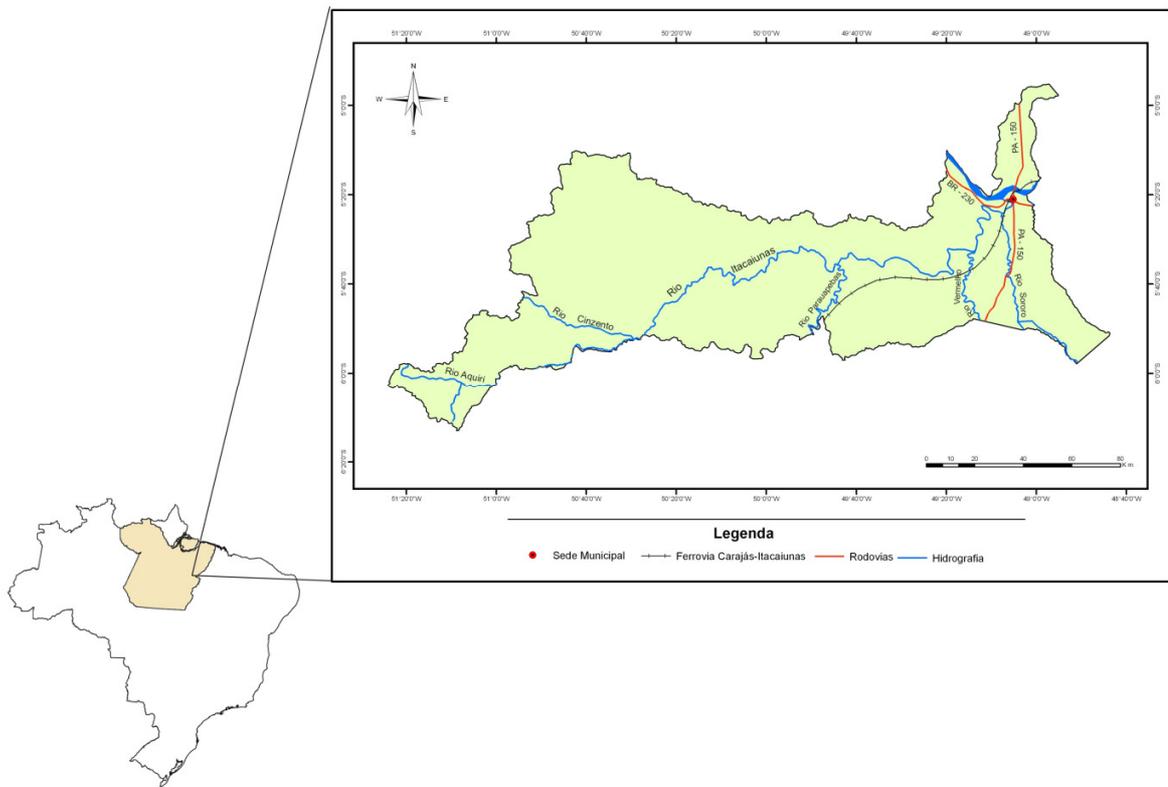


Figura 1 - Localização de Marabá.  
Fonte: Ana Carla de Melo Moreira Campêlo.

Os limites do município de Marabá são: ao Norte - Municípios de Itupiranga, Rondon do Pará, Nova Ipixuna e Novo Repartimento; a Leste - Municípios de Bom Jesus do Tocantins, São João do Araguaia, São Domingos do Araguaia e São Geraldo do Araguaia; ao Sul - Municípios de Curionópolis, Parauapebas, Eldorado do Carajás, Parauapebas e São Félix do Xingu; e a Oeste - Município de São Félix do Xingu.

## Demografia

O Município de Marabá tem uma população residente de 205.753 habitantes, apresentando uma densidade demográfica de aproximadamente 13,63 hab/ km<sup>2</sup>. A população da sede municipal, compreendida nas aglomerações da

Marabá Pioneira, Cidade Nova, Nova Marabá, Morada Nova e São Felix. A evolução da população do município de Marabá de 2000 à 2007 pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Evolução da população de Marabá – 2000 à 2007

Ano	População
2000	168.020
2001	173.301
2002	177.352
2003	181.683
2004	191.508
2005	195.807
2006	200.801
2007	205.753

Fonte: Estatística Municipal 2007 (Adaptado).

## Clima

O clima do município é o Tropical Úmido. A temperatura média anual é de 26,5°C, com máxima em torno de 31°C e mínima de 22°C.

O período chuvoso é notório. De dezembro a maio é o mais seco, de junho a novembro, estando o índice pluviométrico em torno de 2.000 mm/ano. A umidade relativa do ar é elevada, oscilando entre as estações mais chuvosas a mais seca.

## Hidrografia

O principal acidente hidrográfico é a bacia do Rio Itacaiúnas, afluente pela margem esquerda do Rio Tocantins, em cuja foz encontra-se a sede municipal.

Cortando o seu território com direção geral oeste/leste, apresenta como principais tributários, pela margem direita os Rios: Madeira, Parauapebas, (com seus afluentes, Rio Sapucaia, Caracol e Castanheira), da Onça, Vermelho (com seu afluente Rio Sereno, que limita ao Sul com o Município de Curionópolis, e o Rio Sororó, cujo afluente o Sororozinho, faz limite, também, ao Sul com o Município de Curionópolis). Pela margem esquerda, destacam-se os Rios Aquiri, Tapirapé (com seus tributários, Rios Salobro, Salobrinho e Bernardino), Preto e os igarapés Cinzeiro e Grota do Café.

Importante, ainda, é a presença do Rio Tocantins, em um pequeno trecho do seu médio curso, com seus afluentes Rio Tauazinho, limite natural Leste, com o município de São João do Araguaia, a Flecheira, que limita ainda a leste, com o município de Bom Jesus do Tocantins.

## Solos

A microrregião a que pertence o Município de Marabá é bastante rica no que se refere a tipos de solos, sendo encontrada aqui a maior parte dos diferentes tipos de solos identificados nos poucos levantamentos já realizados até agora na Região. Em recente levantamento Edafo-Climático, realizado na área de abrangência do Município de Marabá, foram prospectados e identificados física e quimicamente quatro classes de solo: Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho Escuro, Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico e Terra Roxa Estruturada Eutrófica.

Os solos que constituem as classes Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho-Escuro caracterizam-se por apresentar boas propriedades físicas, porém são quimicamente pobres, necessitando por isso, de práticas agrícolas

de calagem e fertilização para que se possa esperar um bom desenvolvimento e produção de culturas rentáveis que neles sejam implantadas.

Os solos que compõem as classes Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico e Terra Roxa Estruturada Eutrófica ocorrem em relevo ondulado e forte ondulado. Estes solos, dada suas boas características físicas e excelente fertilidade natural, apresentam potencial agrícola favorável a sua utilização com culturas perenes de alto valor econômico e que sejam adaptadas às condições da região.

## Vegetação

O revestimento florístico do Município de Marabá apresenta forte influência da pecuária e de cultivos de subsistência, pela transformação da floresta densa em pastagens que ocupam em torno de 45% da área, e em segundo lugar com cultivos itinerantes.

A vegetação original encontra-se em quase sua totalidade descaracterizada, com substituição da floresta equatorial densa nativa por florestas secundárias, pastagens ou áreas agricultáveis. Um dos componentes florestais de maior expressividade da cobertura vegetal da região, a Castanha-do-Pará (*Bertholletia Excelsa*) está em fase de extinção, em função das transformações dos ciclos econômicos, privilegiando formação das pastagens para a produção de gado de corte.

A cobertura vegetal original do Município de Marabá é bastante diversificada, porém enquadra-se genericamente na zona de floresta equatorial úmida da hiléia amazônica. Predomina a Floresta Densa, que pode ser chamada Floresta Ombrófila Tropical, Pluvissilva ou Floresta Tropical Chuvosa. Encontra-se

também como classe de formação vegetativa a Floresta Aberta Mista (cocal) e em menor escala a Floresta Aberta Latifoliada (cipoal).

Além dessas unidades fisionômicas típicas das terras firmes, encontra-se a Floresta Densa dos Terraços, em trechos que margeiam o rio Tocantins, Florestas Ciliares e Matas de Galeria, acompanhando os cursos d'água de menor porte.

### Retrospectiva econômica

O município de Marabá é hoje o centro econômico e administrativo da região sudeste do estado do Pará.

Durante sua história passou por vários ciclos econômicos, tendo como base o extrativismo vegetal. O primeiro grande ciclo foi o látex do caucho (árvore nativa do gênero *cartilloa ulei* da família morácea), que além de provocar um avanço populacional, foi sem dúvida, um grande sustentáculo econômico e fator de desenvolvimento regional.

A extração do látex do caucho provocou a vinda de levas de migrantes crescendo assim a navegação e o comércio. O seu predomínio ocorreu entre 1913 e 1920. Apesar da abundância, na região do Rio Itacaiúnas, o caucho se extinguiu rapidamente, em função da forma de como era extraído o látex para atender a produção destinada à exportação.

A decadência da borracha foi um fato ligado tanto ao esgotamento da fonte (morte das árvores), como a conjuntura do mercado mundial, tendo em vista o final da guerra européia de 1914 a 1918, e com isso, uma nova demanda de produção foi se impondo, baseada agora na extração da castanha.

Quando a crise da borracha abalou Marabá, surgiu o ciclo da castanha, que por muitos anos liderou a economia do município.

Toda infra-estrutura e mão-de-obra empregada na produção da borracha, assim como as articulações, política, social e comercial, tanto interna como externa (Belém e exterior), foram de uma forma geral, a base, na qual a atividade castanheira se assentou.

A indústria extrativa da castanha do Pará foi a segunda atividade econômica a viabilizar a fixação do homem na zona fisiográfica do Itacaiúnas. A grande aceitação desta amêndoa no mercado externo determinou a expansão da fronteira econômica no vale desse rio e atraiu à região um grande contingente humano.

A exploração da castanha marcou essa microrregião a tal ponto que apesar da atividade pecuarista ter ganhado impulso a partir de 1940 e haver-se firmado a partir de 1950 num crescimento cada vez maior, a vida da cidade de Marabá, durante o período da safra apresentava grande movimentação social e econômica, tanto que a simples análise de dados econômicos do pólo regional de Marabá, mostrava que a atividade extrativa da castanha era o elemento central da atividade econômico e que todas as outras atividades estavam a ela ligadas.

Assentado na maior Província Mineral do mundo, o Município teria de viver o Ciclo dos Garimpos, onde predominou a extração do diamante, ametista, turmalina e outros minerais, despontando a Serra Pelada com destaque para a extração do ouro, que levou milhares de pessoas a trabalhar neste garimpo.

Com o Programa Grande Carajás - PGC do governo federal instalaram-se na Região empresas transformadoras de minério de ferro. Na década de 80 em Marabá se instalaram a Companhia Siderúrgica do Pará – COSIPAR e a Siderúrgica

Marabá S.A. – SIMARA, logo em seguida a IBÉRICA, a USIMAR e TERRA METAIS, dando início a um novo ciclo na economia local.

## **2.2.2 O complexo siderúrgico**

### **2.2.2.1 Complexo siderúrgico de Marabá**

O sudeste do Pará é um dos pólos mais dinâmicos do Estado, em seu Parque Siderúrgico tem-se a presença de 10 empresas do ramo, já citadas anteriormente. A Figura 02 mostra o Complexo Siderúrgico de Marabá.

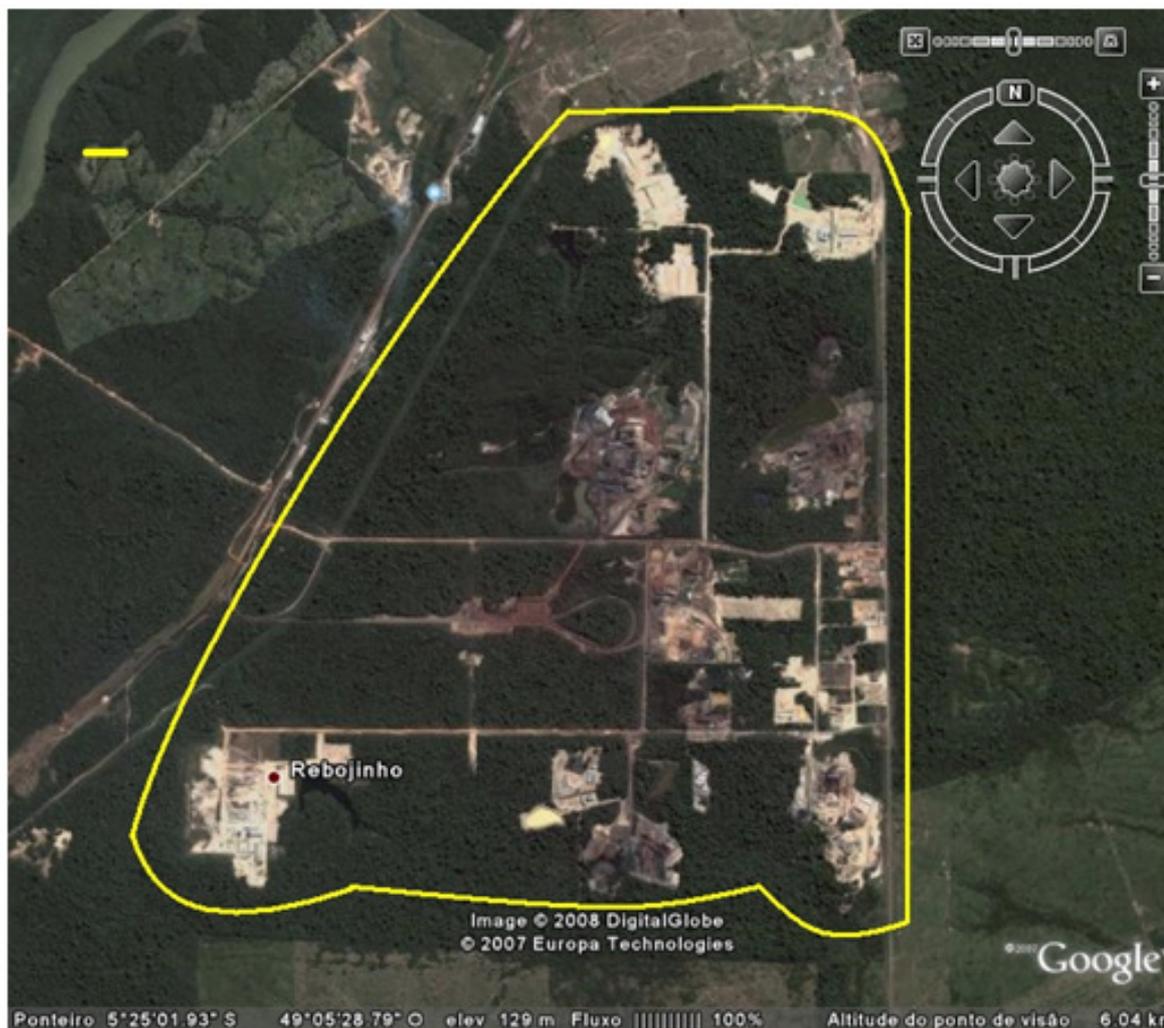


Figura 2 - Complexo Siderúrgico de Marabá.  
Fonte: Costa e Silva (2008).

Segundo o Sindicato das Indústrias de Ferro-Gusa do Estado do Pará - SINDIFERPA, Marabá conta hoje com mais de 200 indústrias, sendo a Siderurgia (ferro-gusa) a mais importante, com uma produção anual de 1.800.000 toneladas, correspondente a 25% do ferro-gusa exportado pelo Brasil e a 7% da Balança Comercial do Pará, totalizando o valor de US\$ 480.000.000 em exportações, gerando em torno de 8.300 empregos diretos.

Nas dez siderúrgicas instaladas em Marabá, o minério proveniente da Província Mineral de Carajás é fundido com o carvão vegetal a uma temperatura de cerca de 1.500° C para dar origem a um novo produto: o ferro-gusa, que é exportado

principalmente para os Estados Unidos e Europa e representa uma etapa importante na verticalização da cadeia produtiva mineral do Estado.

#### 2.2.2.2 Produção do ferro-gusa

A fabricação do ferro-gusa se dá através de redução direta do minério de ferro que introduzido ao alto-forno passa por diversas transformações químicas e metalúrgicas até chegar ao estado líquido (Fotografia 1), usando para isto o carvão vegetal como agente redutor, o calcário, quartzo e manganês como fundentes para a eliminação das impurezas do minério e cinzas do carvão, transformando-se no que chamamos de escória (COSTA e SILVA, 2008).

O tempo gasto para a produção de uma tonelada de ferro-gusa é de 6 à 8 horas (tempo de permanência de carga dentro do alto-forno).



Fotografia 1 - Produção de ferro-gusa.  
Fonte: Costa e Silva (2008).

#### 2.2.2.2.1 Descrição do processo produtivo

##### Alto forno

A metalurgia do ferro consiste, basicamente, na redução dos seus óxidos por meio de um redutor, o qual, em geral é um combustível carbonoso. Os materiais carregados no alto forno (minério, combustível e adições) durante o processo de

redução se transformam nos seguintes produtos: ferro gusa, escória, gás de alto forno e poeira.

Os óxidos ainda não reduzidos, ao atingirem a rampa do alto forno, a uma temperatura acima de 1200 °C, reagem entre si e posteriormente, com o aumento da temperatura, passam ao estado líquido, formando a escória. Os principais componentes são:

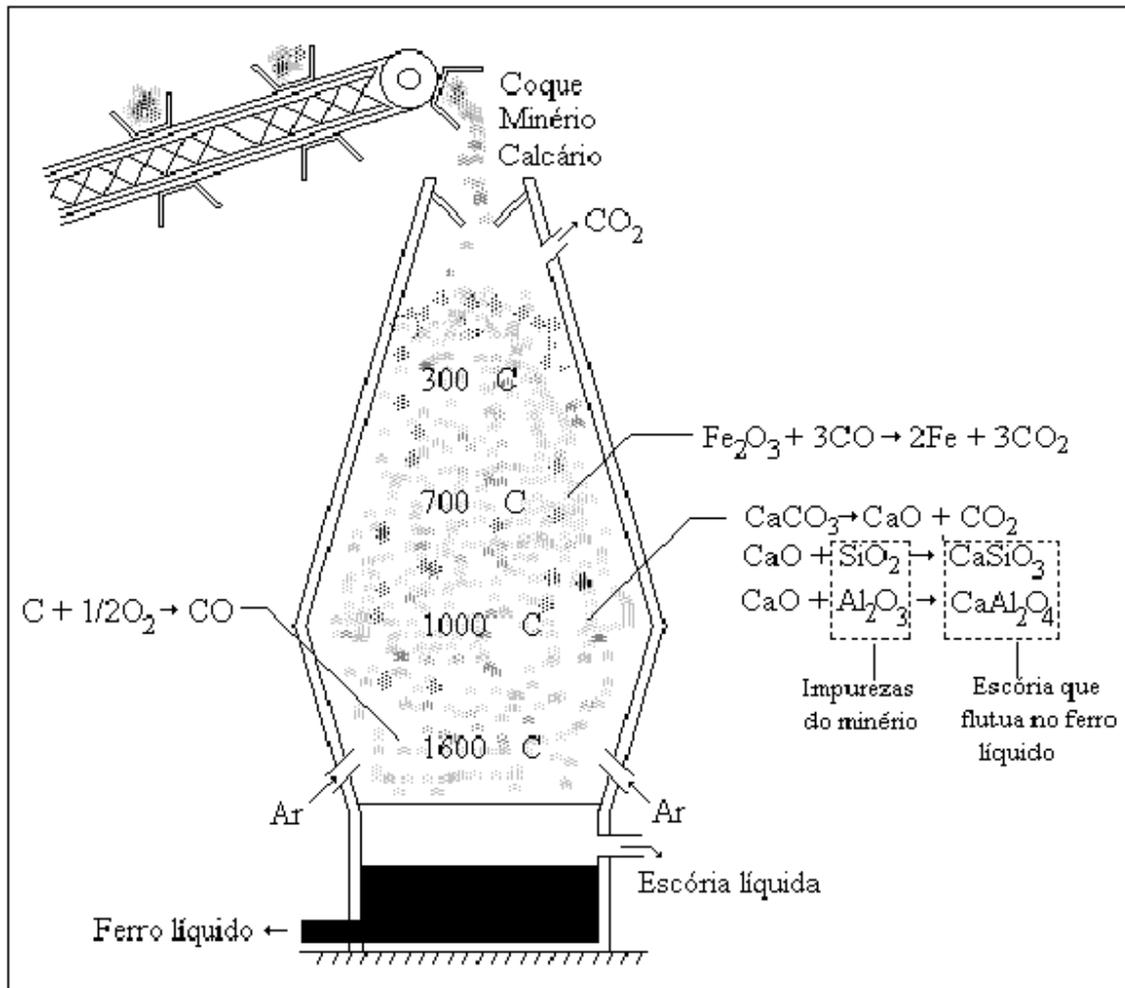
Provenientes do minério: Sílica ( $\text{SiO}_2$ ), Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Cal ( $\text{CaO}$ ), Magnésia ( $\text{MgO}$ ), Titânia ( $\text{TiO}_2$ ), Óxido de Manganês ( $\text{MnO}_2$ ), Sulfeto de Manganês ( $\text{MnS}$ ), Dissulfeto de cálcio ( $\text{CaS}$ ), Óxido de ferro ( $\text{FeO}$ ), Óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ) e Óxido de chumbo ( $\text{PbO}_2$ ).

Proveniente dos fundentes: Cal ( $\text{CaO}$ ), Magnésia ( $\text{MgO}$ ), Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e Sulfeto de cálcio ( $\text{CaS}$ ).

Proveniente do coque: Cinzas, contendo cerca de 40% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e enxofre (S).

Formação da escória: A escória resulta da fusão do material inerte (ganga) do minério, dos fundentes e das cinzas do coque, que, chegando às zonas mais quentes do forno (região das ventaneiras) sem serem reduzidos, reagem entre si e formam, principalmente silicatos ( $\text{CaO.SiO}_2$ ;  $2\text{Ca.SiO}_2$ ;  $\text{FeO.SiO}_2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$ ) ou aluminatos ( $\text{MgO.Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$ ; etc.) (ARAÚJO, 1967).

Na Figura 3, é mostrado um esquema de alto forno.



Fonte: Romeiro (1997) apud Costa e Filho (2004).  
 Figura 3 – Esquema de um alto forno siderúrgico a coque.

### Recepção e qualidade das matérias-primas

As matérias-primas e o carvão vegetal são recebidos na Usina e pesados em balança industrial, sendo que o carvão vegetal será medido também em metros cúbicos (COSTA e SILVA, 2008).

## Análises

- Minério de Ferro: análise para a determinação dos teores de Fe (ferro), S (enxofre), O<sub>2</sub> (oxigênio), AL<sub>3</sub> (alumínio), P (fósforo) e Mn (Manganês);
- Carvão Vegetal: análise para determinar carbono fixo, matérias voláteis e cinzas;
- Calcário: análise para determinar teor de CaO (cálcio);
- Quartzo: análise para determinar teor de S (enxofre), O (oxigênio).

## Minério de Ferro

Atualmente, o minério de ferro é proveniente da Minas da Vale (antiga CVRD), localizada na Serra de Carajás, Estado do Pará, que fornece a matéria-prima com granulométrica estimada de 1/4" x 3/4". Seu transporte até o pátio de estocagem da siderúrgica é realizado por terceiros. Após a descarga ele é analisado para certificação da composição química. Então a matéria-prima é transferida para silos de armazenagem através do sistema carregadeira-caminhões. Com o objetivo de controlar a umidade contida no minério, os silos são dotados de ar quente para secagem do material no momento de compor a carga. Posteriormente, o minério é classificado e pesado automaticamente com separação de finos abaixo de 1/4". É conduzido até uma moega de espera, através de uma correia transportadora, onde é misturado ao fundente e carvão vegetal, formando a carga para enforamento (COSTA e SILVA, 2008).

## Alto-forno

O alto-forno é uma cuba de grandes proporções. Sua operação é simples, mas exige uma cuidadosa supervisão permanente. O ar é insuflado na parte inferior do alto-forno através das ventaneiras.

O oxigênio contido no ar em contato com o carbono do carvão forma o  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) que imediatamente, em virtude do excesso de carbono, se transforma em CO (monóxido de carbono). O conjunto destas duas reações provoca uma temperatura em torno de  $2000\text{ C}^\circ$ . O gás ascendente provoca a redução do minério de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em ferro metálico e, devido às condições do alto-forno, há uma incorporação de carbono ao ferro, formando o carboreto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) que é o ferro-gusa (COSTA e SILVA, 2008).

## Escoamento da produção

O produto acabado, ferro-gusa, é transportado por caminhão até o pátio da Estação Ferroviária da Vale em Marabá, que depois de formado os lotes de ferro-gusa, de acordo com a ordem de pedidos, serão embarcados em vagões específicos com destino ao Porto de Itaqui, na Cidade de São Luiz (MA). No porto, o ferro-gusa é embarcado em grandes navios com destino aos mercados consumidores dos Estados Unidos, Europa e Ásia.

### 2.2.2.3 Escória: um resíduo sólido industrial

Segundo a definição na Norma Brasileira de Classificação de Resíduos Sólidos - NBR 10004 - da Associação brasileira de Normas Técnicas (ABNT), resíduos sólidos são “resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”.

A indústria de produção de ferro-gusa gera uma grande quantidade de escória na sua etapa de fundição. Essa escória é um resíduo industrial e necessita ter uma gestão adequada, a qual precisa possuir um planejamento, com a adoção e implementação de medidas que tenham como objetivo a incorporação de soluções de geração e redução de volume, bem como a escolha e uso de matérias-primas e processos de fabricação que proporcionem resíduos os menos danosos possíveis ao meio ambiente, juntamente com um correto plano de gerenciamento.

#### 2.2.2.3.1 Escória

Ao longo da etapa de fundição de um metal, é gerada uma fase fundida que, quando resfriada, solidifica. Essa fase é chamada de escória.

Bodsworth (1994 apud GOMES, 2006) afirma que as escórias podem exercer uma série de funções. Nas operações de fundição, elas servem primeiramente como um meio de remoção das impurezas não desejáveis, de óxidos não reduzidos e de cinzas geradas na combustão do combustível sólido. Uma vez que um óxido fundido tem a sua condutividade térmica muito menor do que o metal líquido, a escória age como uma barreira térmica que diminui a perda de calor na superfície do metal.

Ainda segundo Bodsworth, as escórias são constituídas, normalmente, de uma solução formada por diferentes óxidos e silicatos e são geradas por meio de

reações endotérmicas. Sendo assim, quanto maior o volume de escória, maior a quantidade de calor adicionado e maior o custo em relação aos combustíveis.

#### 2.2.2.3.2 Metais pesados como resíduos sólidos da indústria

Várias definições são encontradas na literatura para o termo “metal pesado”, sendo que algumas destas baseiam-se na densidade atômica, outras no peso ou número atômico. Entretanto, a definição empregada com frequência está relacionada com a saúde pública, onde os metais pesados são classificados como sendo elementos que apresentam efeitos adversos à saúde humana. Neste contexto, enquadram-se metais ou metalóides que estão associados com poluição e toxicidade, incluindo também, alguns elementos que são essenciais aos seres vivos, quando em baixas concentrações (GUIMARÃES, 2007).

O termo “metal pesado” é empregado com frequência para elementos como Pb (Chumbo), Cr (Cromo), Cu (Cobre), Hg (Mercúrio), As (Arsênio), Ni (Níquel), Zn (Zinco) entre outros. A toxicidade destes metais depende muito de sua concentração e biodisponibilidade, sendo esta última fortemente ligada à forma química deste composto no ambiente investigado.

Os metais pesados diferenciam-se dos demais elementos, devido a sua tendência em formar ligações reversíveis com grande número de compostos e por não serem biodegradáveis, participando do ciclo ecobiológico global no qual a água tem papel principal. Deste modo, estes elementos podem gerar alterações nas interações entre os parâmetros físicos, químicos e biológicos de um determinado ecossistema, devido as suas propriedades de persistência no ambiente, bioacumulação e biomagnificação na cadeia trófica, causando sérios problemas toxicológicos para os organismos vivos (GUIMARÃES, 2007).

Os metais pesados são introduzidos no sistema aquático através da deposição atmosférica, intemperismo e erosão naturais das rochas ou acelerados por fontes antropogênicas (efluentes e resíduos industriais, dentre outros), segundo Nurberg (1984 apud GUIMARÃES 2007).

Deve-se ter atenção especial com a disposição de escória nos solos, pois os metais pesados podem ser liberados naturalmente dos minérios contidos nas rochas por processos intempéricos ou erosivos. Contudo, as atividades de mineração e metalurgia potencializam muito esta liberação, por retirar massas de material rico em tais elementos, alterando o equilíbrio geoquímico natural.

Guimarães (2007) diz que as atividades metalúrgicas causam problemas nos sistemas terrestres e aquáticos. Os efeitos mais sérios decorrentes de tais práticas são: 1) mudanças em sistemas hidrológicos; 2) transformações ocorrentes nos solos e corpos d'água superficiais; 3) contaminação dos solos e reservatórios de água superficiais e 4) poluição atmosférica. Os impactos ambientais gerados pela metalurgia podem ser, tanto de escala regional como local.

A dispersão dos metais pesados das áreas de disposição até seu destino final como poluente segue a seguinte rota, de acordo com Salomons (1995 apud GUIMARÃES, 2007): Crosta Terrestre (área mineralizada) → Mineração → Refino → Uso na sociedade moderna → Resíduos (superfície terrestre: locais de disposição de rejeitos, etc). Os depósitos de rejeitos e pilhas de estéril são os principais responsáveis pela dispersão dos metais pesados para o meio ambiente, por conterem tais elementos e por ficarem expostos à ação de agentes intempéricos.

A recuperação das áreas fontes de contaminação exige um entendimento do comportamento específico dos metais com relação às condições locais (clima, mineralogia, geologia, pedologia, geoquímica, topografia e atividades biológicas) que influenciam nos parâmetros físico-químicos (pH, Eh, temperatura e condutividade)

reinantes e, conseqüentemente, nos processos de interação existentes onde estes elementos se encontram (LAROCQUE, 1998 apud GUIMARÃES, 2007).

Muitas vezes, nos depósitos de rejeitos podem ocorrer a denominada “drenagem ácida”. Esta drenagem ocorre em depósitos minerais com predomínio de sulfetos de ferro (pirita, marcassita, pirrotita, calcopirita, etc) os quais em contato com oxigênio e água, liberam após diferentes reações químicas, ácido sulfúrico. Para a formação de drenagem ácida, as rochas residuais não devem ser portadoras de minerais primários carbonatados os quais atuam na neutralização da drenagem ácida, quando presentes.

## 2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.3.1 Matérias-primas

#### Escória

A escória utilizada neste trabalho foi cedida pela empresa siderúrgica COSIPAR, localizada no Município de Marabá-PA. Esta foi fragmentada em britador e posteriormente moída em moinho de bolas, visando à redução do tamanho das partículas.

#### Argila

A argila utilizada foi procedente do Município de Itupiranga-PA. Posteriormente esse material foi levado à estufa com circulação forçada de ar, a 100<sup>o</sup> C por 24 horas para a retirada de umidade livre. Com o material seco, realizou-se a redução do tamanho das partículas em moinho de discos. Segundo Amaral (1999) a granulometria é uma das características mais importantes dos materiais argilosos e que governa muitas de suas propriedades.

### **2.3.2 Conformação dos corpos de prova**

Separaram-se as frações de argila e escória por peneiramento na granulometria desejada, misturando-as em proporções definidas de acordo com o planejamento do item 2.3.3. Adicionou-se água, lentamente, até a obtenção de uma massa homogênea com plasticidade que, a olho nu, pareceu mais apropriada para a confecção das peças cerâmicas.

Após o preparo da massa, os corpos de prova foram conformados em uma prensa hidráulica, que possui uma superfície móvel (punção) e outra fixa (estampo). A operação consiste em comprimir a massa entre as superfícies do equipamento. A pressão promove o rearranjo e a deformação parcial dos grãos, de modo a permitir uma elevada compactação do corpo cerâmico.

### **2.3.3 Planejamento experimental**

As principais Variáveis de entrada (fatores) que podem influenciar nas propriedades do material cerâmico acabado são: Granulometria, Proporção de Escória e Temperatura de Secagem.

As Variáveis de resposta analisada foram a Tensão de Ruptura à Flexão (TRF), Absorção de Água (AA) e Massa específica Aparente (MEA), sobre as quais foram avaliadas as influências isoladas e/ou combinadas das Variáveis de entrada que mostram significância estatística para estas respostas. Para verificar esta influência foi utilizado um Projeto Fatorial Completo em dois níveis, com repetições no ponto central. O nível de significância ( $\alpha$ ) utilizado foi de 0,05.

Na Tabela 2 apresentam-se as Variáveis de entrada e seus respectivos níveis utilizados no Projeto Fatorial.

Tabela 2 – Variáveis de entrada e respectivos níveis.

Variáveis	Níveis		
	- 1	0	+ 1
X <sub>1</sub> – Granulometria ( $\mu\text{m}$ )	63,5	89,5	127
X <sub>2</sub> – Proporção de Escória (%)	20	35	50
X <sub>3</sub> – Temperatura de Secagem ( $^{\circ}\text{C}$ )	80	100	120

Este Projeto Fatorial Completo  $2^3$  gerou 8 experimentos. No entanto, para verificar a reprodutibilidade das corridas bem como o efeito de curvatura, realizaram-se mais quatro repetições no ponto central – conforme previsto, totalizando-se 12 experimentos, os quais estão mostrados na Tabela 3 na forma de matriz de planejamento com as Variáveis de entrada e os valores da variável de resposta codificados. Os experimentos foram sorteados (aleatorizados) com o objetivo de minimizar os erros experimentais.

Tabela 3 - Matriz de planejamento para o projeto fatorial.

Corridas	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	TRF	AA	MEA
1	-1	-1	-1	TRF <sub>1</sub>	AA <sub>1</sub>	MEA <sub>1</sub>
2	+1	-1	-1	TRF <sub>2</sub>	AA <sub>2</sub>	MEA <sub>2</sub>
3	-1	+1	-1	TRF <sub>3</sub>	AA <sub>3</sub>	MEA <sub>3</sub>
4	+1	+1	-1	TRF <sub>4</sub>	AA <sub>4</sub>	MEA <sub>4</sub>
5	-1	-1	+1	TRF <sub>5</sub>	AA <sub>5</sub>	MEA <sub>5</sub>
6	+1	-1	+1	TRF <sub>6</sub>	AA <sub>6</sub>	MEA <sub>6</sub>

Corridas	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	TRF	AA	MEA
7	-1	+1	+1	TRF <sub>7</sub>	AA <sub>7</sub>	MEA <sub>7</sub>
8	+1	+1	+1	TRF <sub>8</sub>	AA <sub>8</sub>	MEA <sub>8</sub>
9	0	0	0	TRF <sub>9</sub>	AA <sub>9</sub>	MEA <sub>9</sub>
10	0	0	0	TRF <sub>10</sub>	AA <sub>10</sub>	MEA <sub>10</sub>
11	0	0	0	TRF <sub>11</sub>	AA <sub>11</sub>	MEA <sub>11</sub>
12	0	0	0	TRF <sub>12</sub>	AA <sub>12</sub>	MEA <sub>12</sub>

Analisou-se os resultados dos experimentos, com o auxílio do aplicativo Statística 7.0.

### 2.3.4 Curva de secagem

A curva de secagem foi feita com o objetivo de definir o tempo de secagem para os experimentos. Os corpos de prova conformados (Variáveis de entrada no ponto central) foram colocados em estufa, sendo monitoradas medidas de perda de massa em tempos pré-determinados até que as mesmas não sofressem mais variações, definindo, assim, o tempo de secagem adequado. Posteriormente estes corpos retornaram à estufa na mesma temperatura por período integral de 24 horas, para obtenção da massa de sólido seco, necessária para a determinação do teor de umidade em base seca.

### 2.3.5 Determinação do teor de umidade

Para determinar os valores dos teores de umidade em base seca dos corpos de prova ao final da secagem, foi utilizada a equação:

$$X_{(%bs)} = \left( \frac{M_c - M_{ss}}{M_{ss}} \right) 100$$

Em que  $X_{(%bs)}$  é o percentual de umidade em base seca,  $M_c$  é a massa do corpo de prova e  $M_{ss}$  é a massa do sólido seco.

### 2.3.6 Secagem dos corpos de prova

Os corpos de prova, conformados com todas as combinações previstas de níveis, foram colocados em estufa com circulação forçada de ar por 120 minutos, onde a temperatura desejada foi controlada por termostato. O tempo de 120 minutos utilizado como parâmetro, foi definido através da curva de secagem. A velocidade do ar na estufa foi de 1 m/s medida em um anemômetro.

### 2.3.7 Queima dos corpos de prova

Logo após a secagem, os corpos de prova foram levados a um forno Tipo Mufla a uma temperatura de 1050° C (graus Celsius) por 3 horas para realização da queima.

### 2.3.8 Determinação das propriedades cerâmicas

Após a queima dos corpos de prova, determinou-se as propriedades cerâmicas do produto acabado, segundo a metodologia adotada por Santos (1989) e sugeridas pelo IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica): Tensão de Ruptura à Flexão (TRF), Absorção de Água (AA) e Massa Específica Aparente (MEA).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA ARGILA

A Tabela 4 nos mostra os dados da análise granulométrica efetuada na argila utilizada para os testes.

Tabela 4 - Dados da análise granulométrica da argila.

Malha # (Tyler)	Abertura (µm)	Material Retido (g)	Material Retido (%)	Material Acumulado (%)	Material Passante (%)
65	210	260,2	44,57	44,57	55,43
100	149	134,2	22,99	67,56	77,01
150	105	91,9	15,74	83,30	84,26
200	74	71,2	12,20	95,50	87,80
270	53	23,9	4,09	99,59	95,91
325	44	2,4	0,41	100,00	99,59
400	37	0,0	0,00	100,00	100,00
-400	<37	0,0	0,00	100,00	100,00

#### 3.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA

Os resultados das análises granulométricas da escória estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados das análises granulométricas da escória.

Malha # (Tyler)	Abertura (µm)	Material Retido (g)	Material Retido (%)	Material Acumulado (%)	Material Passante (%)
65	210	4,4	0,88	0,88	99,12
100	149	13,5	2,69	3,57	97,31
150	105	56,0	11,20	14,78	88,71
200	74	235,9	47,17	61,9	52,83

Malha # (Tyler)	Abertura (µm)	Material Retido (g)	Material Retido (%)	Material Acumulado (%)	Material Passante (%)
270	53	117,9	23,59	85,54	76,41
325	44	67,1	13,59	99,13	86,41
400	37	3,2	0,64	99,77	99,36
-400	<37	0,1	0,02	99,79	99,98

Observando-se os resultados da análise granulométrica mostrados nas Tabelas 4 e 5, verifica-se que a maior parte da argila (44,57%) ficou acima da malha de 65# Tyler, valendo ressaltar que a escória apresenta distribuição granulométrica mais fina do que a argila. A escória apresentou maior percentual de massa retida (47,17%) na malha de 200# Tyler. Pela impossibilidade de utilizar uma faixa mais ampla de granulometria, adotou-se o Diâmetro Médio das Partículas para o nível mais baixo (-1) de 63,5µm (-200 +270) e para o nível mais alto (+1) de 127µm (-100 +150), tendo como ponto central (0) o diâmetro médio de 89,5µm (-150 +200). O fato do valor do ponto central desta variável não ser a média dos níveis alto e baixo é resultado da indisponibilidade de outras telas na série Tyler.

Para as outras Variáveis de entrada (Proporção de Escória e Temperatura de Secagem), os níveis escolhidos foram de acordo com o sugerido por Filho (1997).

### 3.3 CURVA DE SECAGEM

A curva de secagem obtida para corpos cerâmicos fabricados à temperatura de 100° C, proporção de escória de 35% e partículas com diâmetro médio de 89,5 µm, está mostrada na Figura 3, na qual  $M/M_0$  representa a relação adimensional entre a massa atual e a massa inicial ( $M/M_0$ ) de material e o tempo (t) de secagem.

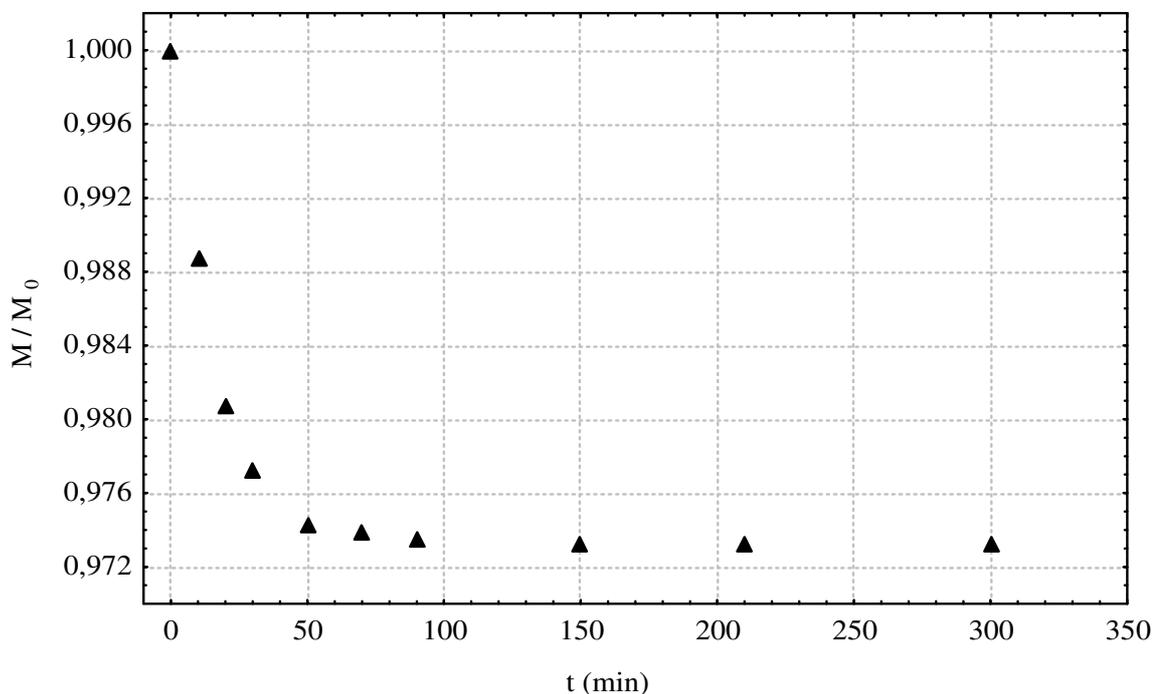


Gráfico 1 - Perda de massa em função do tempo na temperatura de 100 graus Celsius.

Pelo Gráfico 1, observa-se que no tempo de 120 minutos não há mais variação na perda de massa do corpo de prova. Portanto, na temperatura de 100° C não há necessidade de maior gasto de tempo e energia, visto que nestas condições o equilíbrio é alcançado. Isto é confirmado pelo teor de umidade do material após a secagem (0,09%). Por este motivo assumiu-se o tempo fixo de 120 minutos para as corridas experimentais.

### 3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS ATRAVÉS DO PROJETO FATORIAL COMPLETO (2<sup>3</sup>)

A Tabela 6 mostra a matriz de experimentos gerada pelo Projeto Fatorial Completo em dois níveis, com quatro repetições no ponto central, contendo as Variáveis de entrada codificadas e o resultado da variável de resposta TRF (em MPa), Absorção de Água (AA) e Massa Específica Aparente (MEA). Realizou-se a

aleatorização das corridas, procurando, desta forma, minimizar os erros de procedimentos. A ordem de execução das corridas experimentais também está apresentada na Tabela 06.

Tabela 6 – Matriz de experimentos com os resultados das Variáveis de resposta.

Corrida	Ordem	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	TRF	AA	MEA
1	9	-1	-1	-1	57,00	22,13	1,63
2	3	+1	-1	-1	43,58	20,97	1,66
3	2	-1	+1	-1	85,05	18,86	1,71
4	8	+1	+1	-1	79,60	18,52	1,72
5	10	-1	-1	+1	44,10	21,32	1,65
6	7	+1	-1	+1	40,62	20,82	1,66
7	12	-1	+1	+1	88,26	18,36	1,71
8	1	+1	+1	+1	73,17	18,31	1,75
9	6	0	0	0	67,22	20,00	1,68
10	4	0	0	0	73,80	20,33	1,67
11	11	0	0	0	57,31	20,45	1,67
12	5	0	0	0	69,50	20,14	1,68

### 3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA TRF

Constata-se, na Tabela 6, que para a resposta TRF não houve boa reprodutibilidade nas corridas realizadas no ponto central (corridas 9 a 12), em decorrência da falta de instrumentação apropriada no equipamento de medida desta variável.

#### 3.5.1 Efeitos estimados

Os efeitos estimados e seus respectivos erros podem ser avaliados na Tabela 7. Os efeitos de interação de três ou mais fatores foram desprezados, pois

raramente a interação de mais de dois fatores é estatisticamente significativa para a resposta.

Tabela 7 - Estimativa dos efeitos para a variável de resposta TRF.

Efeitos	Valores Estimados	Erro
<b>Efeitos principais:</b>		
Diâmetro das Partículas ( $X_1$ )	-9,3600	$\pm 4,6788$
Proporção de Escória ( $X_2$ )	35,1950	$\pm 4,6788$
Temperatura de Secagem ( $X_3$ )	-4,7700	$\pm 4,6788$
<b>Interações de 2 fatores:</b>		
$X_1X_2$	-0,9100	$\pm 4,6788$
$X_1X_3$	0,0750	$\pm 4,6788$
$X_2X_3$	3,1600	$\pm 4,6788$
Grande Média	64,9341	$\pm 1,9101$

Observa-se que as Variáveis de entrada, Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ) e Proporção de Escória ( $X_2$ ), a princípio, possuem significância estatística para TRF, uma vez que os valores numéricos dos efeitos são maiores do que o erro.

Também se percebe que a Proporção de Escória ( $X_2$ ) foi a mais influente das Variáveis de Entrada nos resultados da TRF, seguida do Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ). Uma mudança desta Variável de um nível mais baixo (-1) para o mais alto (+1), resulta num decaimento de, aproximadamente, 9,36 Kg/cm<sup>2</sup> na TRF da peça cerâmica. Por outro lado, uma mudança na variável  $X_2$  do nível mais baixo para o mais alto, ocasiona um aumento médio de 35,195. Observa-se também, que não houve efeito de interações binárias entre as Variáveis de entrada.

Todavia, tais efeitos não podem ser interpretados somente com relação ao erro padrão, já que o mesmo é calculado com apenas três graus de liberdade, havendo, portanto, a necessidade de análises posteriores em função de outros parâmetros estatísticos.

### 3.5.2 Gráfico de barras (Diagrama de Pareto)

O Gráfico 2 ilustra a representação gráfica dos efeitos individuais e/ou combinados através do Diagrama de Pareto (forma de barras).

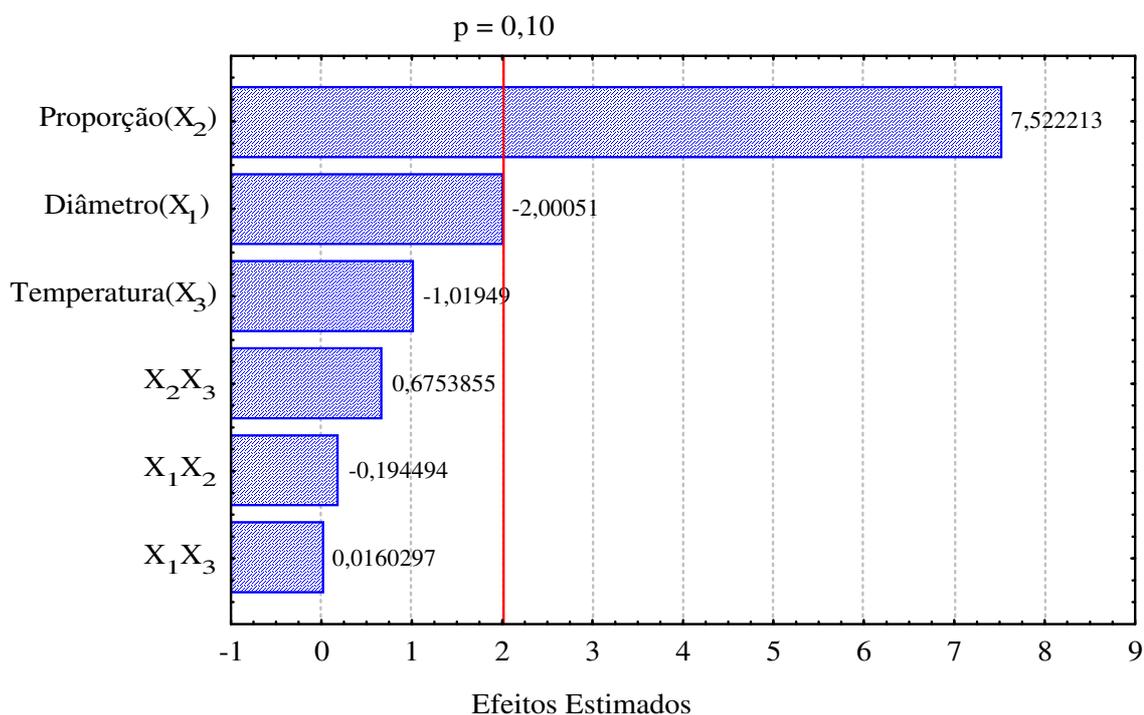


Gráfico 2 - Gráfico de barras dos efeitos individuais e combinados para TRF.

Neste diagrama (Gráfico 2), quantificado em função dos efeitos padronizados, pode-se confirmar a maior influência estatística sofrida pela resposta TRF pela variável  $X_2$ , visto que a barra indicativa é interceptada pela reta vertical que indica o limite de rejeição do teste de hipótese nula para 90% de confiança. As barras do diagrama localizadas à esquerda desta reta são consideradas estatisticamente sem importância para a resposta. Verifica-se também, que esta análise não confirma a influencia da variável  $X_1$ .

### 3.5.3 Análise de variância (ANOVA)

A análise da variância (ANOVA) é uma avaliação da significância dos efeitos das Variáveis de entrada na resposta TRF. Na Tabela 8, as estatísticas F (Fisher) e P (Probabilidade) são as ferramentas utilizadas na análise dos efeitos.

Tabela 8 – Análise da variância (ANOVA) para a variável de resposta TRF.

Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Teste (F)	Probab. (P)
X <sub>1</sub>	175,2192	1	175,2192	4,0020	0,1018
X <sub>2</sub>	2477,3760	1	2477,3760	56,5837	0,0006
X <sub>3</sub>	45,5058	1	45,5058	1,0394	0,3547
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	1,6562	1	1,6562	0,0378	0,8534
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0,0112	1	0,0112	0,0003	0,9878
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	19,9712	1	19,9712	0,4561	0,5294
Erro total	218,9126	5	43,7825	-	-

Pode-se assim certificar que a Variável de Entrada X<sub>2</sub> é a que apresenta menor probabilidade de estar dentro da região de hipótese nula (sem significância estatística para a resposta), quando comparadas às outras Variáveis. Isto é evidenciado pela ordem de grandeza dos valores numéricos da coluna de probabilidade (P). Nesta variável, o teste de hipótese nula é rejeitado, pois o valor estimado para o teste (P) é menor que 10%, ou seja, existe uma probabilidade maior que 90% desta variável estar na região de hipótese alternativa (efeitos estatisticamente significativos).

Já a variável X<sub>1</sub> encontra-se no limite de rejeição do teste de hipótese nula, como já havia sido evidenciado pelo Diagrama de Pareto. Portanto esta variável não pode ser considerada influente na resposta TRF, sendo seu efeito considerado apenas ruído.

### 3.5.4 Gráfico em papel de probabilidade normal

Apresenta-se a representação (probabilidade normal) de efeitos estimados.

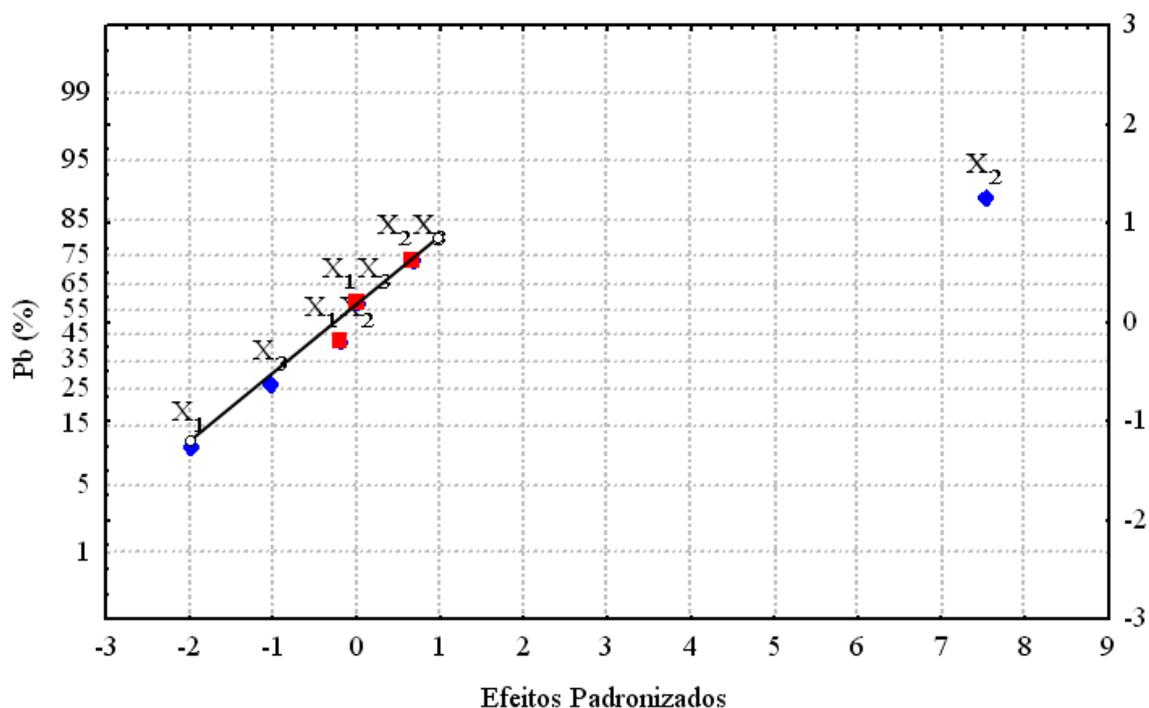


Gráfico 3 – Gráfico dos efeitos em papel de probabilidade normal para a resposta TRF.

Pelo Gráfico 3, verifica-se que os pontos das Variáveis Individuais  $X_1$  e  $X_3$  e das interações  $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$  e  $X_2X_3$ , se ajustam a uma reta cuja a interseção com a probabilidade acumulada de 50% acontece praticamente sobre o ponto zero do eixo das abscissas, permitindo considerar esses pontos pertencentes a uma população normal de média zero, o que demonstra hipótese nula para os mesmos.

Quanto à Variável  $X_2$  observa-se que o ponto está localizado fora da reta. Portanto, ela deve ser interpretada como efeito significativo, uma vez que esse ponto não provém da mesma distribuição que vieram os outros.

### 3.5.5 Obtenção e análise do modelo estatístico

Os coeficientes das Variáveis de Entrada e suas respectivas combinações, de acordo com a análise de regressão múltipla, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Coeficientes de regressão para TRF.

Parâmetros	Coeficientes
Constante	64,9341
$X_1$	-4,6800
$X_2$	17,5975
$X_3$	-2,3850
$X_1X_2$	-0,4550
$X_1X_3$	0,0375
$X_2X_3$	1,5800
$R^2 = 0,9255$	

Dispondo-se do único termo influente na resposta TRF, propôs-se um Modelo Estatístico, o qual será analisado utilizando-se apenas o coeficiente e a variável codificada estatisticamente significativa para a resposta ( $X_2$ ).

A excelência do modelo estatístico para a variável de resposta pode ser avaliada com base na estatística  $R^2$ , no gráfico relativo aos valores preditos e observados e na análise dos resíduos.

O modelo linear obtido descreve satisfatoriamente os dados experimentais dentro da região estudada neste trabalho.

O Gráfico 4 evidencia a comparação entre os valores experimentais e os calculados por meio do modelo proposto para a resposta TRF. Verifica-se um bom ajuste entre estes valores, pois os pontos se aglomeram próximos à reta representativa.

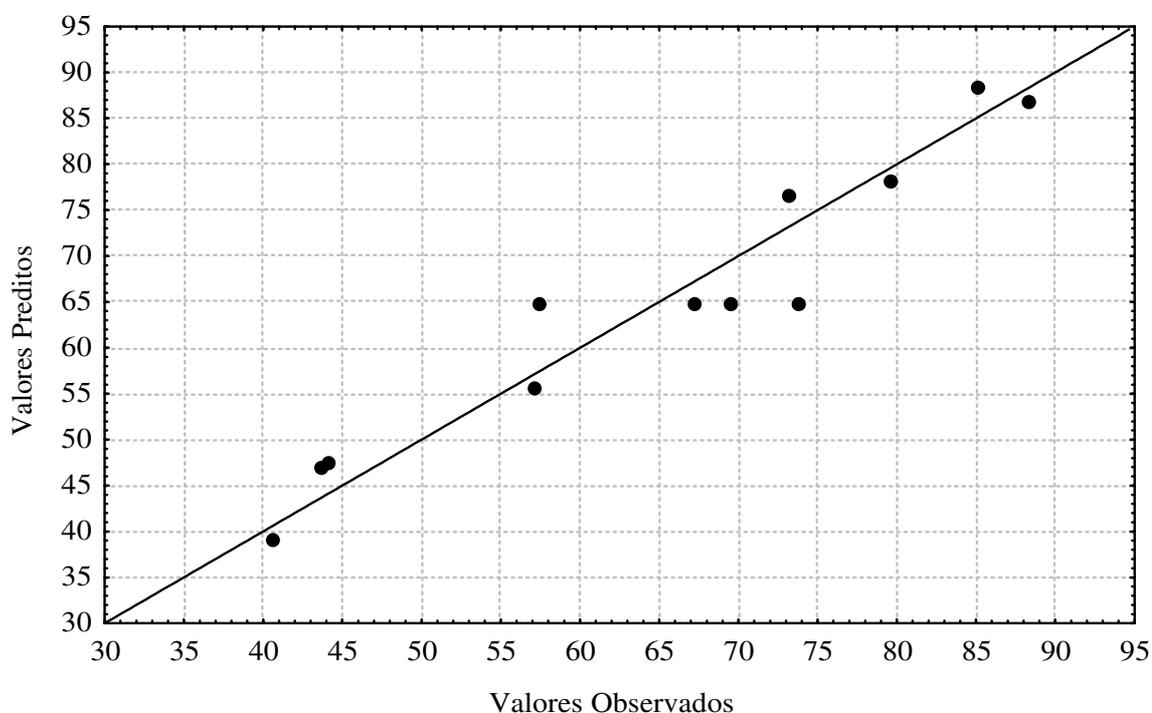


Gráfico 4 – Comparação entre os valores preditos pelo modelo e os valores experimentais para a resposta TRF.

No Gráfico 5 observa-se que, apesar dos resíduos não apresentarem valores muito baixos, a distribuição dos pontos não demonstra comportamento característico, o que torna o modelo linear adequado para descrever o comportamento da variável de resposta TRF em função de  $X_2$ .

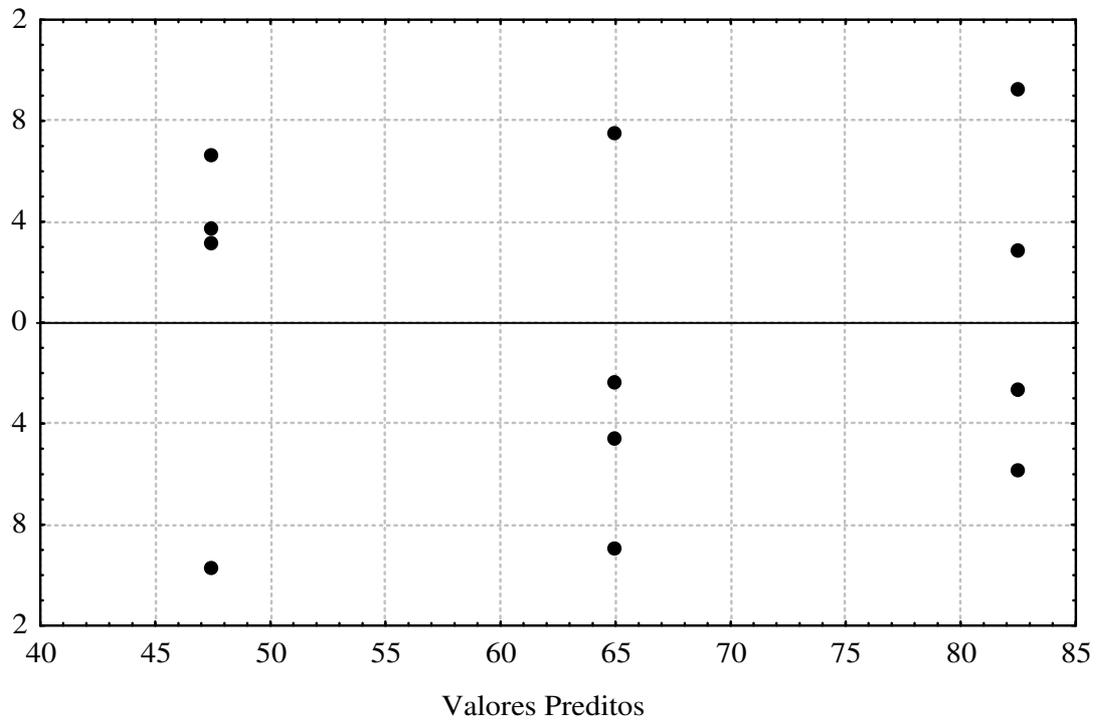


Gráfico 5 – Distribuição dos resíduos para a resposta TRF.

Os Gráficos 6 e 7, representam as superfícies de respostas para a variável TRF descritas pelo modelo. O eixo Z representa a resposta (TRF) e os eixos X e Y as Variáveis codificadas a serem avaliadas, mantendo-se a terceira no ponto central, ou seja, no ponto codificado 0.

“Aproveitamento da escória de alto-forno, do município de Marabá, como matéria-prima para fabricação de material cerâmico.”

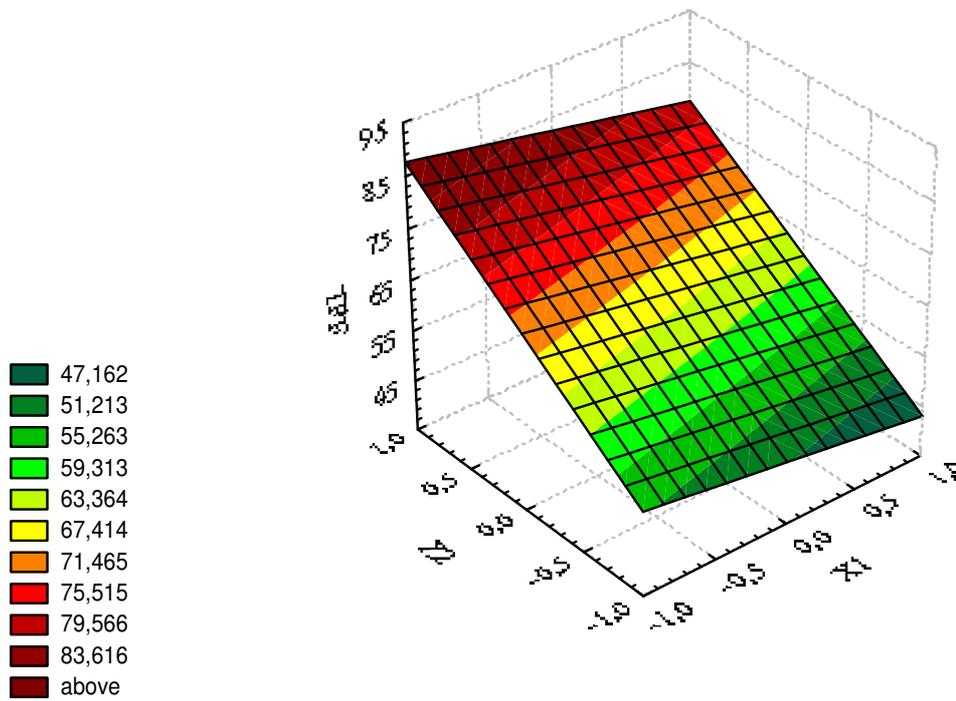


Gráfico 6 – Superfície de resposta para TRF em função do Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ) e da Proporção de Escória ( $X_2$ ).

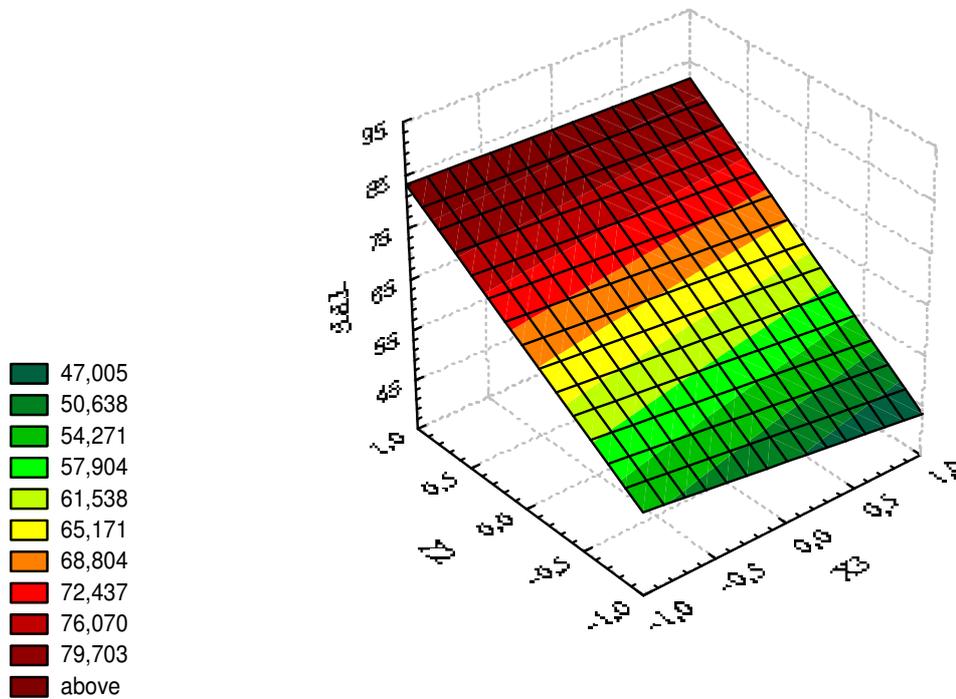


Gráfico 7 – Superfície de resposta para TRF em função da temperatura de secagem ( $X_3$ ) e da Proporção de Escória ( $X_2$ ).

A partir dos Gráficos 6 e 7, pode-se constatar que somente a variável Proporção de Escória ( $X_2$ ) influencia de forma significativa a resposta Tensão de Ruptura à Flexão (TRF). Elevando-se o valor desta variável do nível mais baixo para o mais alto há um aumento na TRF. Isto pode ser devido à composição química da escória que tem um alto teor de fundentes, que durante a queima fazem com que o corpo de prova adquira uma maior resistência (CASCUDO; HELENE, 2000).

### 3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA AA

#### 3.6.1 Efeitos estimados

Apresenta-se também os efeitos estimados e seus respectivos erros. Na Tabela 10 estão os dados da estimativa dos efeitos para a variável de resposta AA.

Tabela 10 - Estimativa dos efeitos para a variável de resposta AA.

Efeitos	Valores Estimados	Erro
<b>Efeitos principais:</b>		
Diâmetro das Partículas ( $X_1$ )	-0,5125	$\pm 0,2018$
Proporção de Escória ( $X_2$ )	-2,7975	$\pm 0,2018$
Temperatura de Secagem ( $X_3$ )	-0,4175	$\pm 0,2018$
<b>Interações de 2 fatores:</b>		
$X_1X_2$	0,3175	$\pm 0,2018$
$X_1X_3$	0,2375	$\pm 0,2018$
$X_2X_3$	0,0625	$\pm 0,2018$
Grande Média	20,0175	$\pm 0,0824$

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 10, observa-se que, a priori, com exceção das interações  $X_1X_3$  e  $X_2X_3$ , todas as Variáveis de entrada possuem significância estatística para a resposta AA, uma vez que os valores numéricos dos efeitos são maiores do que o erro.

Certifica-se também que a variável de entrada Proporção de Escória ( $X_2$ ) foi a mais influente na resposta AA, seguido da variável diâmetro das partículas ( $X_1$ ).

### 3.6.2 Gráfico de barras (Diagrama de Pareto)

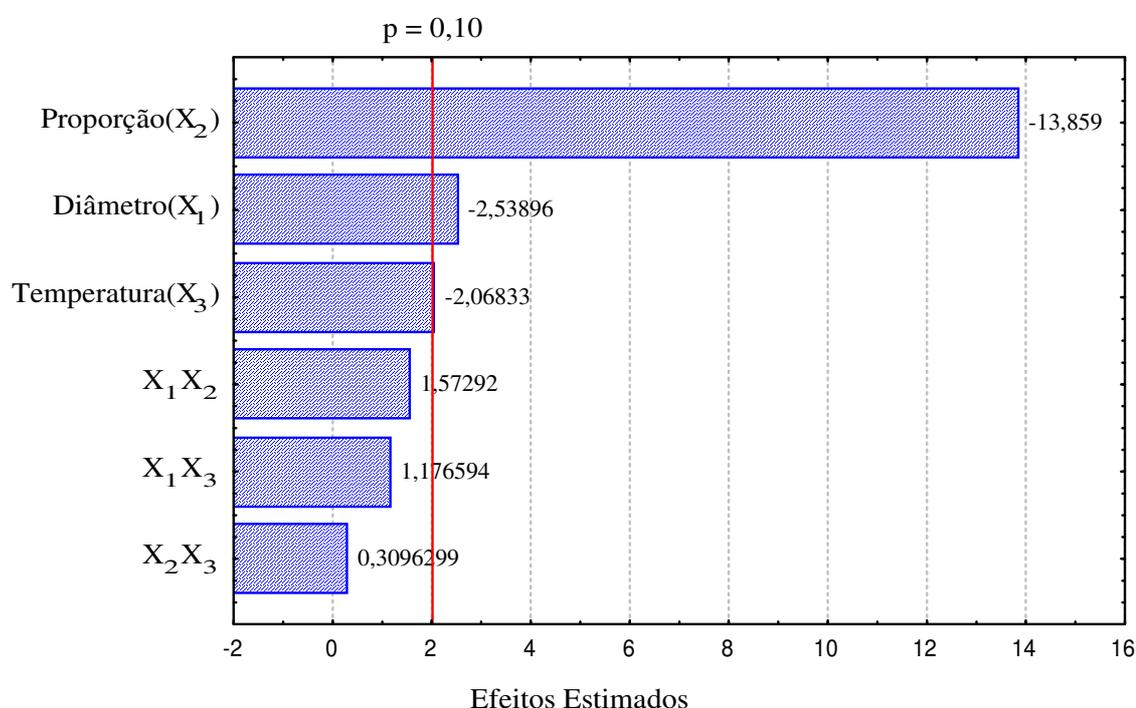


Gráfico 8 – Gráfico de barras dos efeitos individuais e combinados para AA.

No Gráfico 8 pode-se confirmar a maior influência estatística sofrida pela resposta AA devido as Variáveis  $X_1$  e  $X_2$ , para uma confiança de 90%. Verifica-se também, que não se confirma a influencia da interação  $X_1 X_2$ , conforme foi concluído na análise dos efeitos estimados. Por outro lado, pelo gráfico, a Variável  $X_3$  encontra-se muito próxima do limite de rejeição do teste da hipótese nula e necessita de análise posterior para se definir se ela é ou não uma variável estatisticamente influente na resposta AA.

### 3.6.3 Análise de variância (ANOVA)

A estatística P representa a probabilidade que cada variável possui de estar na região de hipótese nula e não influenciar estatisticamente a resposta. Nesta situação o efeito não é confundido com erros aleatórios ou perturbações no processo (ruídos). Na tabela 11 está apresentada a ANOVA para a variável AA.

Tabela 11 - Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta AA.

Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste (F)	Probabilidade (P)
X <sub>1</sub>	0,5253	1	0,5253	6,4463	0,0519
X <sub>2</sub>	15,6520	1	15,6520	192,0728	0,0000
X <sub>3</sub>	0,3486	1	0,3486	4,2780	0,0934
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	0,2016	1	0,2016	2,4741	0,1765
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0,1128	1	0,1128	1,3844	0,2923
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0,0078	1	0,0078	0,0959	0,7693
Erro total	0,4074	5	0,0814	-	-

$$R^2 = 0,9764$$

Assim, pode-se observar que as Variáveis de entrada X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> e X<sub>3</sub> são as que apresentam menor probabilidade de estarem dentro da região de hipótese nula.

### 3.6.4 Gráfico em papel de probabilidade normal

No Gráfico 9 está exibido em papel de probabilidade normal os efeitos estimados para a resposta AA.

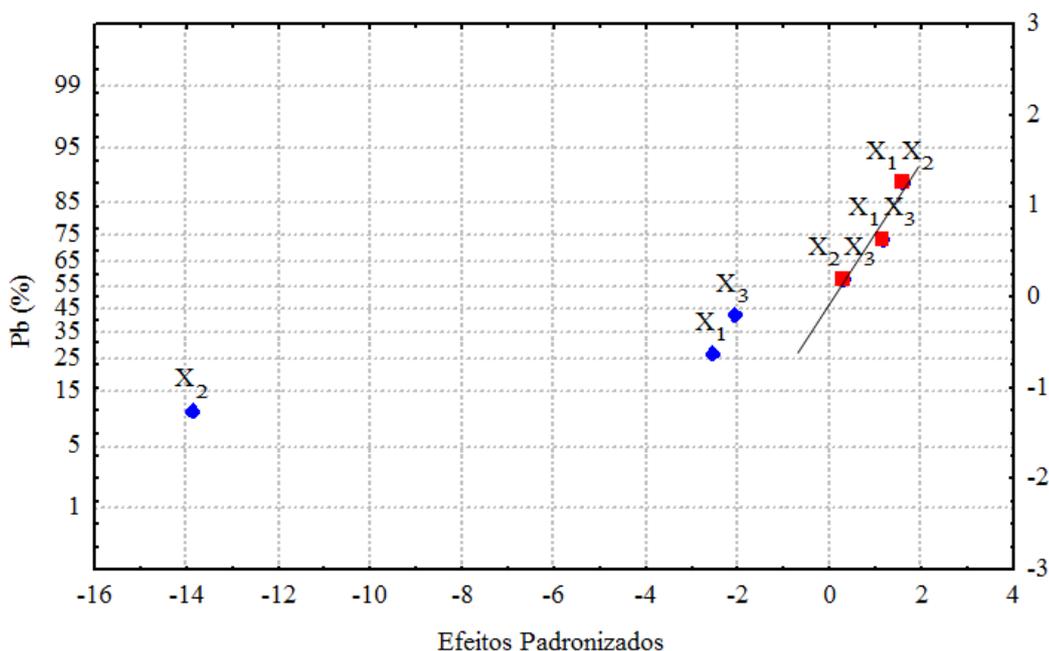


Gráfico 9 – Gráfico dos efeitos em papel de probabilidade normal para a resposta AA.

No Gráfico 9 verifica-se que os pontos das interações  $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$  e  $X_2X_3$  se ajustam a uma reta, indicando que podemos considerar esses pontos como pontos representam efeitos sem qualquer significado físico para a resposta.

Já os pontos das Variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  estão localizados fora da reta e devem ser interpretados como tendo efeitos significativos, conforme já definidos na ANOVA.

Portanto, para a resposta Absorção de Água (AA), as Variáveis Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ), Proporção de Escória ( $X_2$ ) e Temperatura de Secagem ( $X_3$ ) devem ser considerados na construção do modelo representativo.

### 3.6.5 Modelo estatístico

Os coeficientes das Variáveis de entrada e suas respectivas combinações, de acordo com a análise de regressão múltipla, estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Coeficientes de regressão para AA.

Parâmetros	Coeficientes
Constante	20,0175
X <sub>1</sub>	-0,2562
X <sub>2</sub>	-1,3987
X <sub>3</sub>	-0,2085
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	0,1587
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0,1187
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0,0312
$R^2 = 0,9764$	

O Gráfico 10 mostra a distribuição dos resíduos de maneira aleatória, indicando que o modelo é adequado, não havendo inconsistência entre os valores estimados e os experimentais.

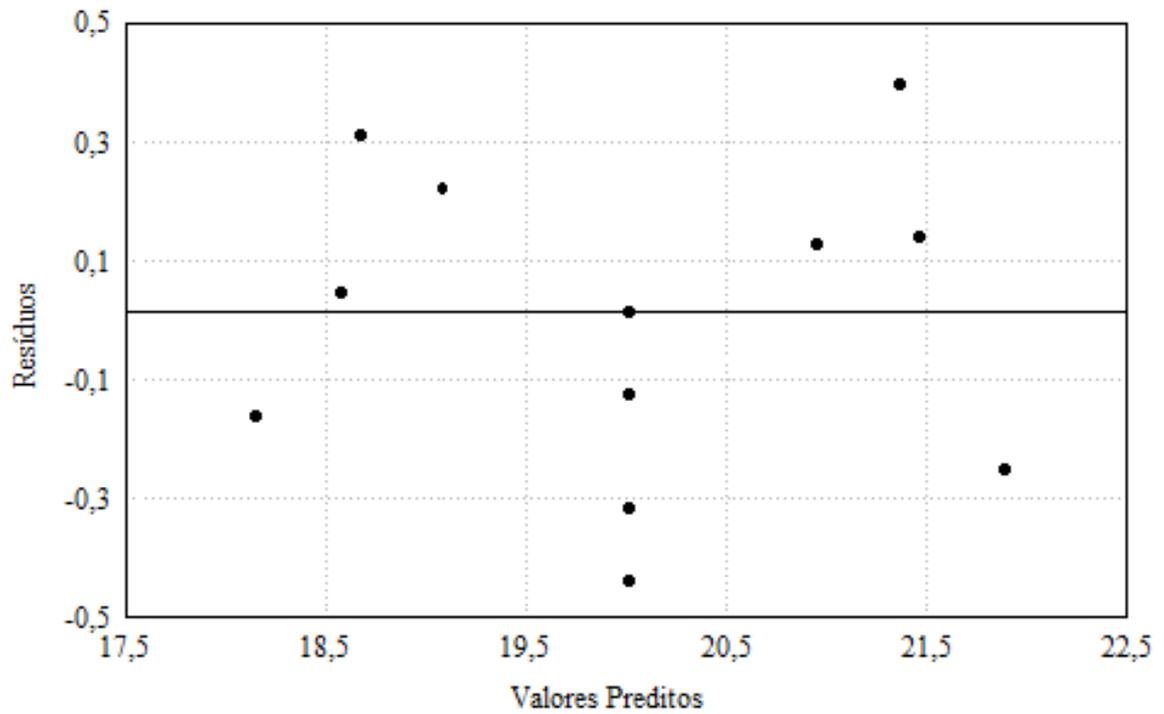


Gráfico 10 – Distribuição dos resíduos para a resposta AA.

Os Gráficos 11, 12 e 13, representam as superfícies de respostas para a Variável AA. O eixo Z representa a Resposta (AA) e nos eixos X e Y as Variáveis codificadas a serem avaliadas, mantendo-se sempre a terceira no ponto central.

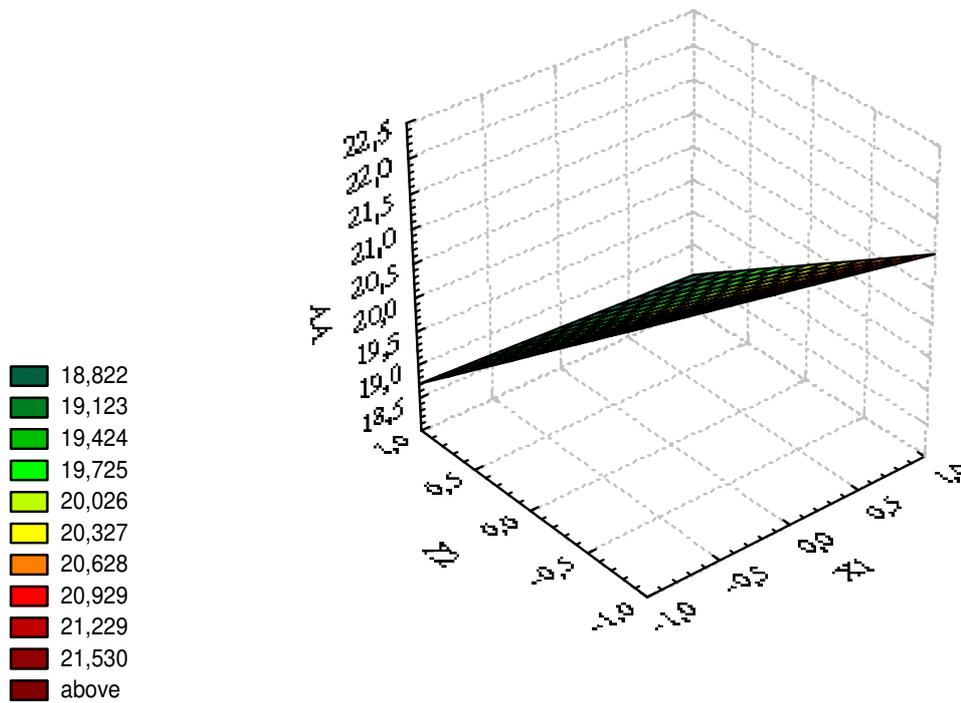


Gráfico 11 – Superfície de resposta para AA em função do Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ) e da Proporção de Escória ( $X_2$ ).

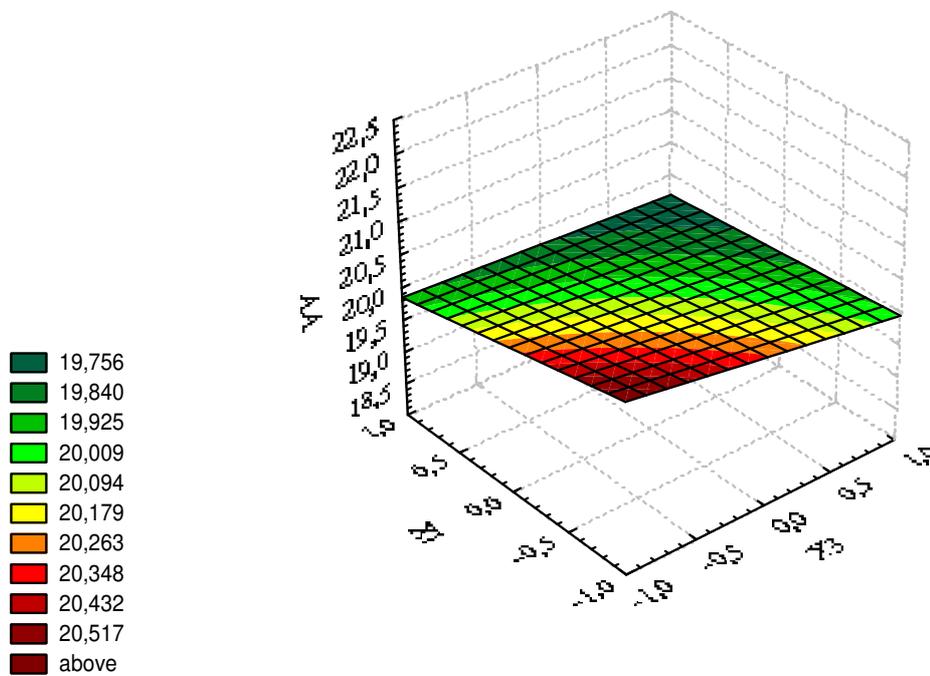


Gráfico 12 – Superfície de resposta para AA em função da temperatura de secagem ( $X_3$ ) e do Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ).

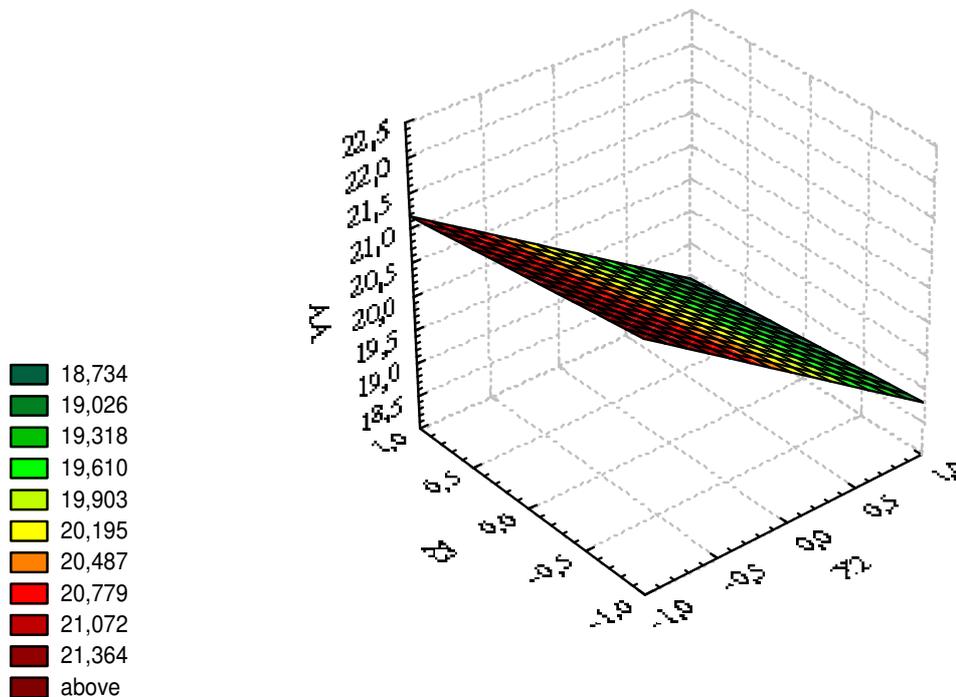


Gráfico 13 – Superfície de resposta para AA em função da Proporção de Escória ( $X_2$ ) e da temperatura de secagem ( $X_3$ ).

Os Gráficos 12 e 13 mostram claramente que a Proporção de Escória ( $X_2$ ) tem influência importante na Resposta AA: uma mudança na Variável  $X_1$ , do nível mais baixo (-1) para o mais alto (+1), ou seja, aumentando o Diâmetro Médio das Partículas, observa-se uma diminuição de Absorção de Água (AA) da peça cerâmica. Isto se deve ao fato de que, quando se aumenta o diâmetro médio de todas as partículas, conseqüentemente aumenta-se a quantidade de areia presente no corpo de prova, e esta preenche os espaços vazios entre as partículas de escória e argila da peça cerâmica, fazendo com que diminua a absorção de água (AMARAL, 1999). Verifica-se também que aumentando a Proporção de Escória diminui a Absorção de Água (AA) e pode ser devido ao elevado teor de fundente e/ou à elevada massa específica da escória que faz com que as partículas se tornem mais agregadas dificultando, assim, com esta maior compactação, a penetração da água no material.

O gráfico 12 mostra que, apesar do Diâmetro Médio das Partículas ser estatisticamente significativo, não houve uma diminuição acentuada na Absorção de Água (AA). No entanto, deve-se levar em consideração que a faixa de diâmetro utilizada neste trabalho foi relativamente pequena. Pelas conclusões das análises anteriores, tem-se que o Diâmetro Médio das Partículas, assim como a Proporção de Escória e a Temperatura de Secagem influenciam de forma significativa a Absorção de Água (AA).

### 3.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A VARIÁVEL DE RESPOSTA MEA

A seguir é mostrado a tabela dos Efeitos Estimados (Tabela 13), o Diagrama de Pareto (Gráfico 14) e a tabela da Análise de Variância (Tabela 14) para a resposta Massa Específica Aparente (MEA).

Tabela 13 - Estimativa dos efeitos para a variável de resposta MEA.

Efeitos	Valores Estimados	Erro
<b>Efeitos principais:</b>		
Granulometria ( $X_1$ )	0,0225	$\pm 0,0086$
Proporção ( $X_2$ )	0,0725	$\pm 0,0086$
Temperatura de Secagem ( $X_3$ )	0,0125	$\pm 0,0086$
<b>Interações de 2 fatores:</b>		
$X_1X_2$	0,0025	$\pm 0,0086$
$X_1X_3$	0,0025	$\pm 0,0086$
$X_2X_3$	0,0025	$\pm 0,0086$
Grande Média	1,6825	$\pm 0,0035$

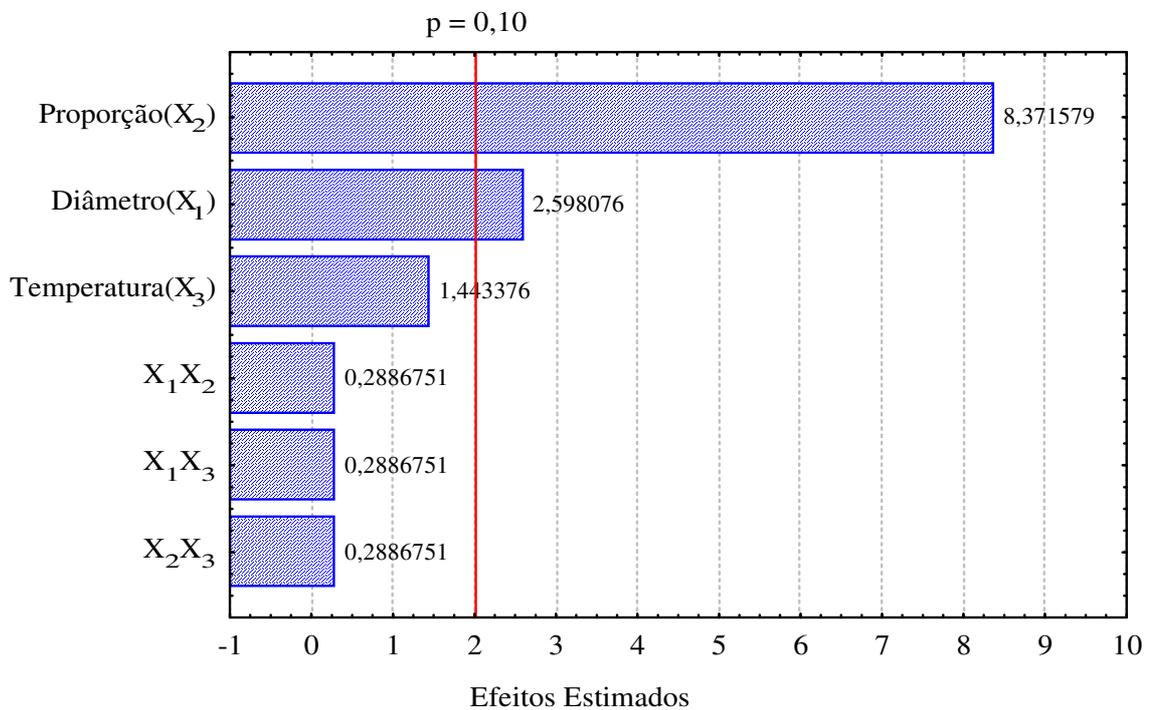


Gráfico 14 – Gráfico de barras dos efeitos individuais e combinados para MEA.

Tabela 14 - Análise de variância (ANOVA) para a variável de resposta MEA.

Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Teste (F)	Probabilidade (P)
$X_1$	0,0010	1	0,0010	6,7500	0,0484
$X_2$	0,0105	1	0,0105	70,0833	0,0004
$X_3$	0,0003	1	0,0003	2,0833	0,2085
$X_1 X_2$	0,0000	1	0,0000	0,0833	0,7844
$X_1 X_3$	0,0000	1	0,0000	0,0833	0,7844
$X_2 X_3$	0,0000	1	0,0000	0,0833	0,7844
Erro total	0,0007	5	0,0001	-	-

$$R^2 = 0,9406$$

A partir dos resultados apresentados na Tabela 13, 14 e Gráfico 1, pode ser visto que as Variáveis de Entrada Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ) e Proporção de Escória ( $X_2$ ) são as que influenciam a resposta Massa Específica Aparente (MEA). Esta conclusão pode ser confirmada no Gráfico 15, já que os

pontos das Variáveis  $X_1$  e  $X_2$  estão fora da reta representativa de uma distribuição normal.

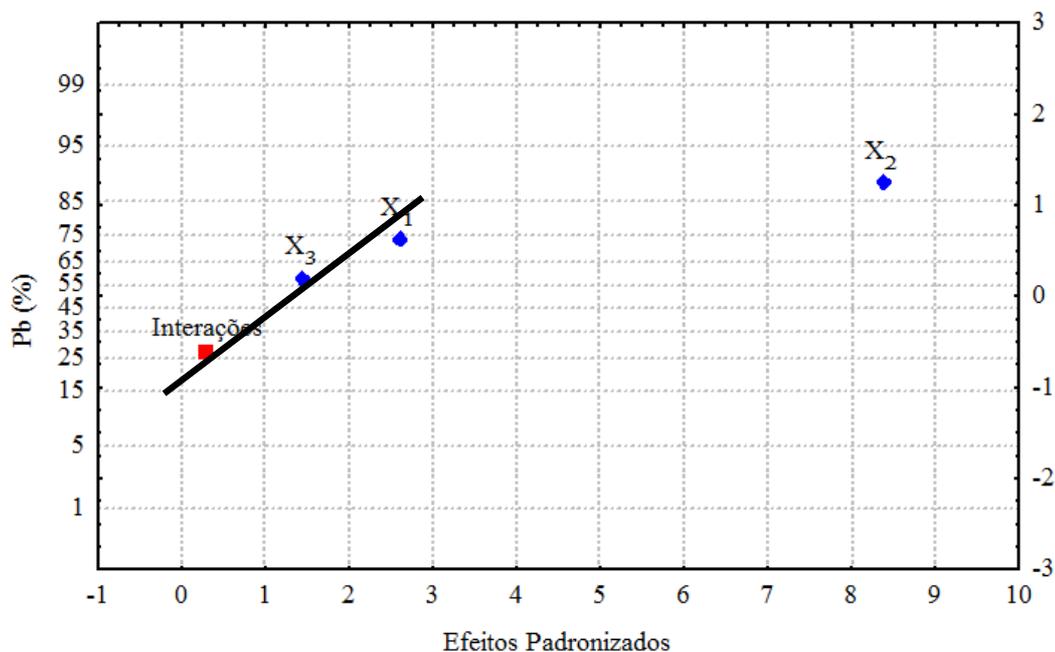


Gráfico 15 – Gráfico dos efeitos em papel de probabilidade normal para a resposta MEA.

Os coeficientes das Variáveis de entrada e suas respectivas combinações, de acordo com a análise de regressão múltipla, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Coeficientes de regressão para MEA

Parâmetros	Coeficientes
Constante	1,6825
$X_1$	0,0112
$X_2$	0,0362
$X_3$	0,0062
$X_1X_2$	0,0012
$X_1X_3$	0,0012
$X_2X_3$	0,0012
$R^2 = 0,9406$	

O Gráfico 16 mostra a existência de um ajuste adequado entre os valores experimentais e os preditos pelo modelo estatístico.

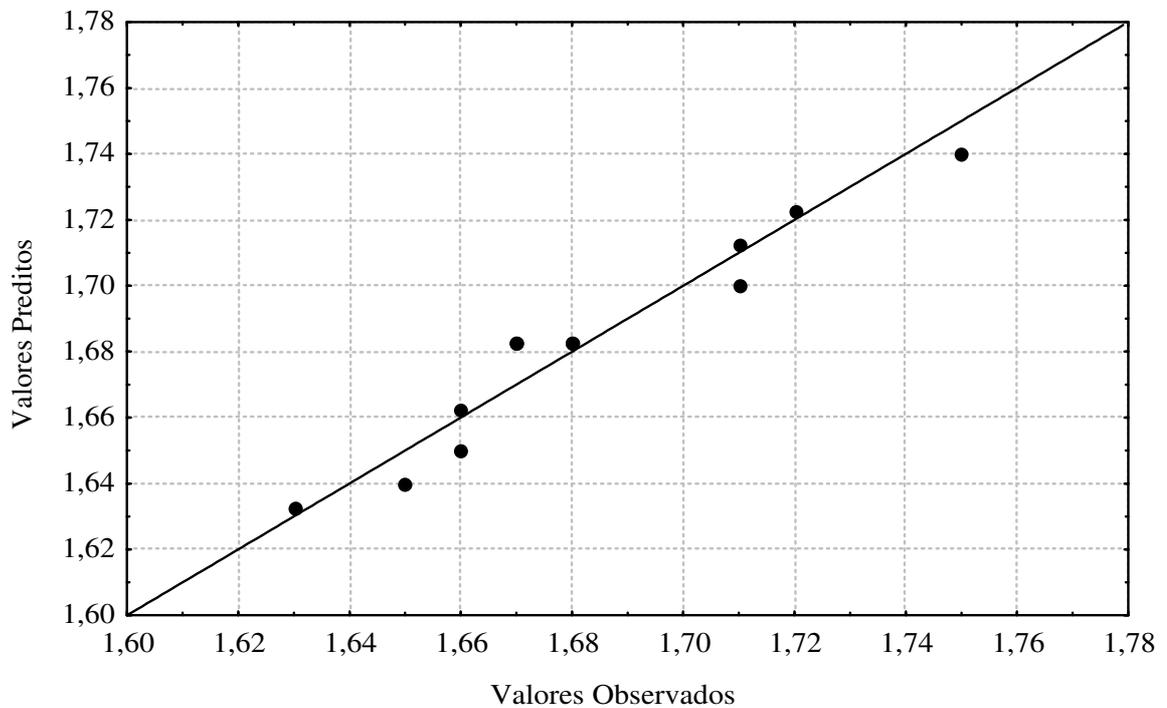


Gráfico 16 – Comparação entre os valores preditos pelo modelo e os valores experimentais para a resposta MEA.

O Gráfico 17 representa a distribuição aleatória dos resíduos e mostra a ausência de um comportamento tendencioso, indicando que o modelo matemático é adequado para descrever os dados experimentais.

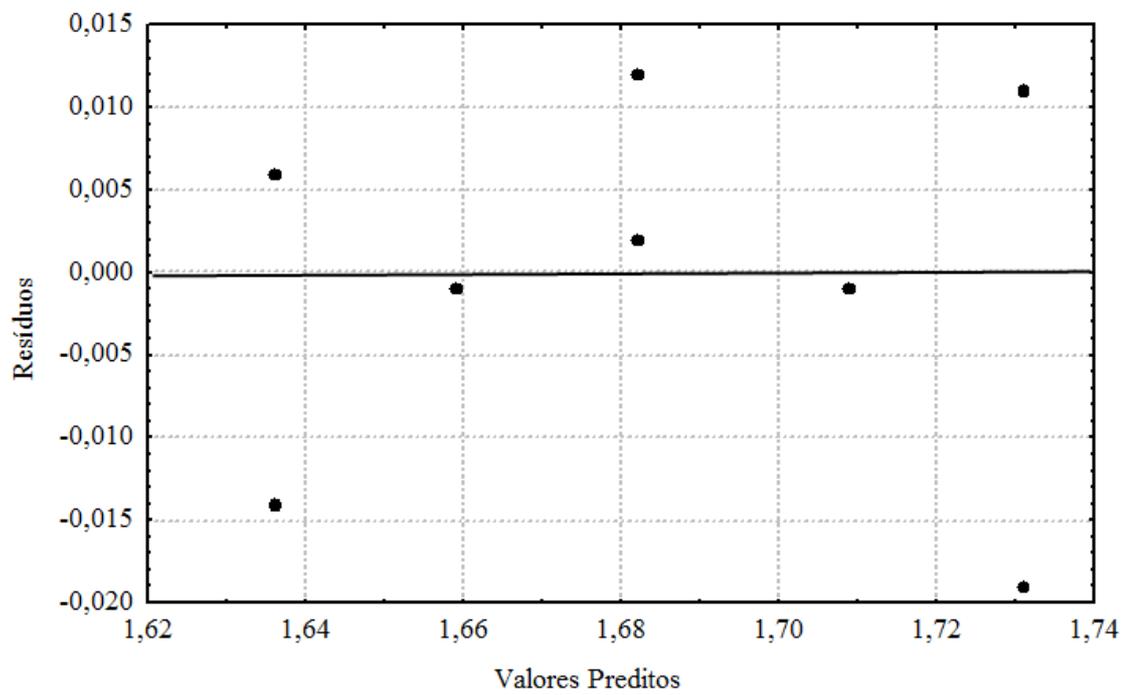


Gráfico 17 – Distribuição dos resíduos para a variável de resposta MEA.

Os Gráficos 18, 19 e 10, representam as superfícies de respostas para a Variável MEA.

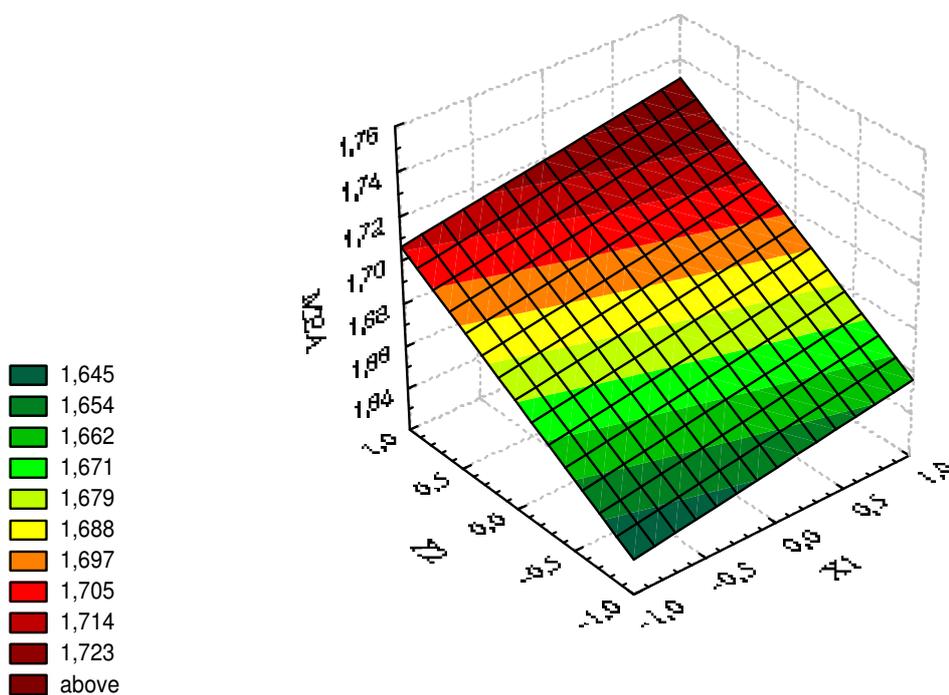


Gráfico 18 – Superfície de resposta para MEA em função do Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ) e da Proporção de Escória ( $X_2$ ).

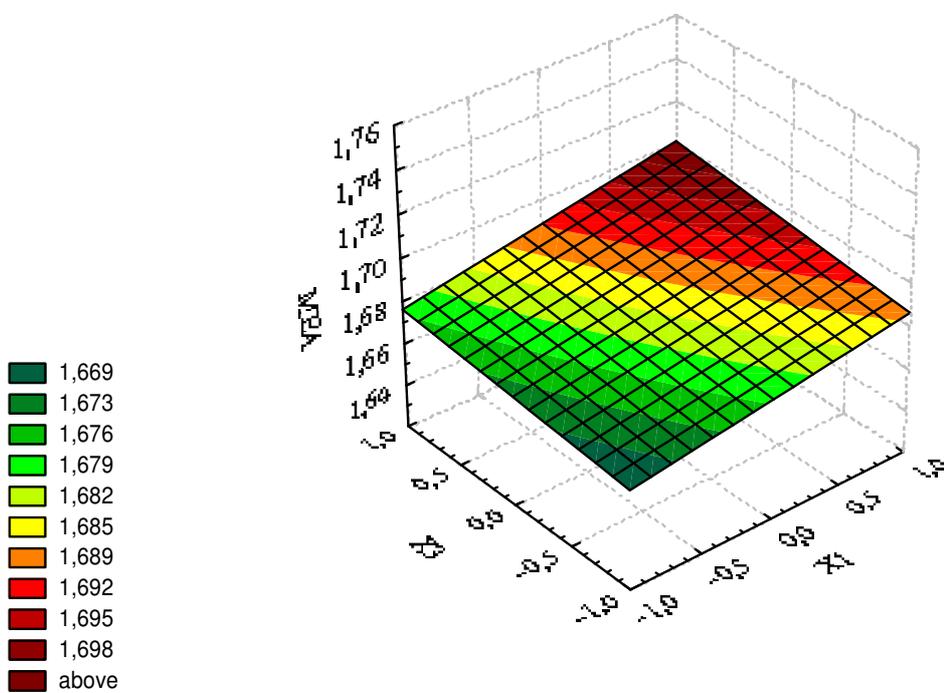


Gráfico 19 – Superfície de resposta para MEA em função do Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ) e da temperatura de secagem ( $X_3$ ).

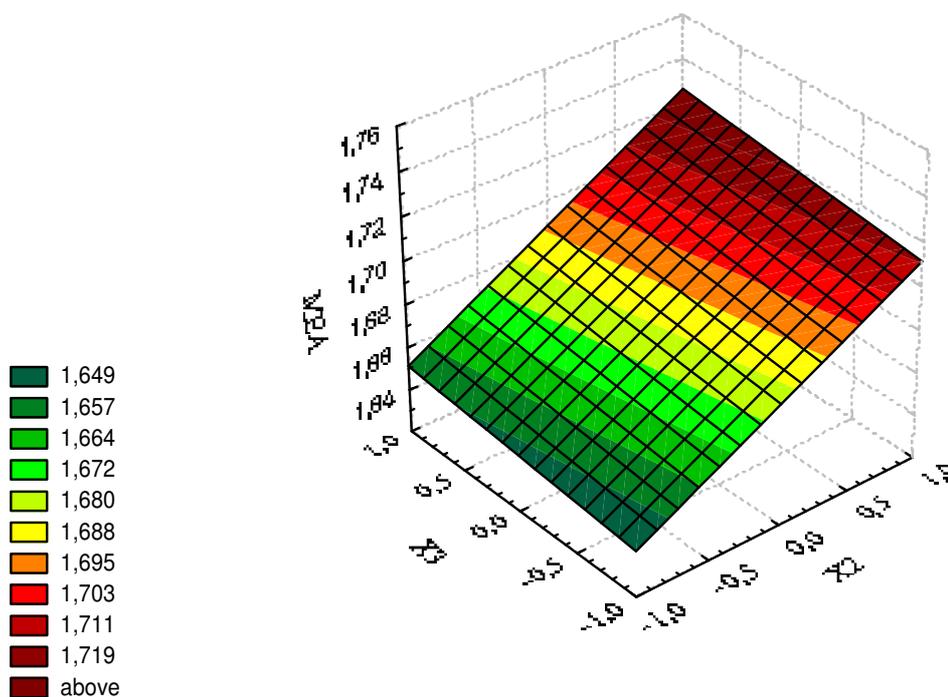


Gráfico 20 – Superfície de resposta para MEA em função da Proporção de Escória ( $X_2$ ) e da temperatura de secagem ( $X_3$ ).

Analisando-se os Gráficos 18, 19 e 20, percebe-se que a Variável de entrada Proporção de Escória ( $X_2$ ) foi a mais influente na resposta MEA, seguido da Variável Diâmetro Médio das Partículas ( $X_1$ ). Uma mudança nestas Variáveis do nível mais baixo (-1) para o mais alto (+1), gera um aumento na MEA do corpo cerâmico. Verifica-se também que não houve efeito significativo nesta resposta para a Variável de entrada Temperatura de Secagem ( $X_3$ ).

Esta influência se deve ao fato da Massa Específica da escória ser o fator preponderante para a elevação da Massa Específica Aparente (MEA) do material, visto que, seu valor é bem maior, em torno de  $1,26 \text{ g/cm}^3$ , que a Massa Específica da argila, que é aproximadamente  $0,67 \text{ g/cm}^3$ , e, uma maior Proporção de Escória ou um aumento no Diâmetro Médio das Partículas, contribuem para uma elevação na MEA do corpo de prova.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados, no trabalho, conduz às seguintes conclusões:

- Na temperatura de secagem de 100 graus Celsius, Diâmetro Médio das Partículas de 89,5  $\mu\text{m}$  e 35% de escória, o tempo de 120 minutos é suficiente para alcançar o equilíbrio, pois a umidade foi inferior a 0,1%;
- Na característica Tensão de Ruptura à Flexão (TRF), observou-se um aumento crescente com o teor de escória;
- Observou-se uma diminuição da resposta Absorção de Água (AA), com o aumento do Diâmetro Médio das Partículas, teor de escória e temperatura de secagem;
- O aumento do Diâmetro Médio das Partículas e teor de escória proporcionam aumento da Massa Específica Aparente (MEA) do material cerâmico;
- Os modelos preditivos obtidos podem ser, satisfatoriamente, usados para estimar os valores das respostas para as faixas utilizadas neste trabalho;
- O uso controlado de escória misturado à argila para fabricação de produtos cerâmicos é tecnicamente viável, demonstrando também viabilidade para ser uma alternativa eficiente na transformação de estéril de risco em subproduto.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, A. S. M. **Secagem de Materiais Estudados em um Secador de Convecção Forçada Utilizando Argila do Estado do Pará.** Dissertação (Mestrado). Belém : DEQ – UFPA, 1999.

ANUÁRIO Estatístico 2007, Belo Horizonte: Associação Mineira de Silvicultura, 2007.

CASCUDO, O.; HELENE, P. **Produção e Obtenção de Barras e Fios de Aço para Concreto armado.** São Paulo – SP, 2000.

CONDURÚ, M. T.; PEREIRA, J. A. R. **Elaboração de Trabalhos Acadêmicos.** 2. ed. Belém: NUMA.UFPA, EDUFPA,2006. 238 p.

COSTA, D. S.; FILHO, B. M. M.; **Análise Experimental do Processo de Fabricação de Material Cerâmico Utilizando Escória de Alto-Forno e Argila.** Monografia (Especialização). Belém: UFPA, 2004.

COSTA, J. B.; SILVA, R. S. **Avaliação da perda de cobertura vegetal relacionada à produção de carvão para empresas siderúrgicas do complexo industrial de Marabá.** Universidade do Estado do Pará. (Monografia). Marabá, 2008.

FARIA, L. J. G.; COSTA, C. M. L. & COLABORADORES. **Tópicos especiais em tecnologia de produtos naturais.** Série POEMA; nº 7, Belém: NUMA.UFPA, POEMA, 1998.

FILHO, F. R. A. **Utilização do Rejeito Industrial Cerâmico – Chamote – como Fator de Qualidade na Fabricação de Elementos Cerâmicos: Um Estudo Experimental.** Cerâmica, v. 43, 1997.

GOMES, G. M. F. **Redução do Impacto Ambiental da Escória de Obtenção de Chumbo por vias Secundárias.** Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: UFRGS, 2006.

GUIMARÃES, V. **Resíduos de Mineração e Metalurgia: Efeitos Poluidores em Sedimentos e em Espécie Biomonitora** – Rio Ribeira de Iguapé-SP. São Paulo-SP, 2007.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2.ed. v. 1. São Paulo: Edgar Blücher, 1989.