



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DANILO MARCIANO DA SILVA SANTOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DO PÓ DE DESPOEIRAMENTO
SIDERÚRGICO EM CERÂMICA VERMELHA**

MARABÁ
2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DANILO MARCIANO DA SILVA SANTOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DO PÓ DE DESPOEIRAMENTO
SIDERÚRGICO EM CERÂMICA VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais, Campus de Marabá,
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Elias Fagury Neto

**MARABÁ
2016**

DANILO MARCIANO DA SILVA SANTOS

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DO PÓ DE DESPOEIRAMENTO
SIDERÚRGICO EM CERÂMICA VERMELHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal Do Sul e Sudeste do Pará
em cumprimento às exigências para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia de
Materiais

DATA DA AVALIAÇÃO: 30 de setembro de 2016

CONCEITO: _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elias Fagury Neto

(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientador)

Prof. Dr. Fábio Gonçalves da Silva

(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

Prof. Eng. Márcio Paulo de Araújo Mafra

(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

Aos meus pais, Verônica Maria da Silva Santos e Dalmo Marciano dos Santos

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me proporcionado saúde, forças e sabedoria para poder superar essa árdua jornada.

A minha mãe, Verônica Maria da Silva Santos e ao meu pai, Dalmo Marciano dos Santos, que nos momentos mais complicados do curso, souberam transmitir paz, paciência e fé, para que eu continuasse sempre em frente e de cabeça erguida.

Aos meus grandes amigos Elias Bruno Braga Mocbel e Sorato de Souza Gonçalves, verdadeiros parceiros no desenvolvimento do presente trabalho.

Aos meus amigos do “chuta que é macumba!” da FEMAT 2012, Antônio Charles, Priscila Albuquerque, Gleisson Santos, Julliene Portela, Pedro Henrique, Gabriela Miranda, Ana Paula, Lázaro Noleto, Bruno Mocbel, Sorato Gonçalves e Kaline Silva, pelos ótimos momentos juntos e até pelos desentendimentos, me mostrando desde o início que a “união faz a força” e que não existe discente que se forma sozinho.

Aos demais amigos da FEMAT 2012, sobretudo Samara Lopes, pela grande ajuda na conclusão da etapa de laboratório do meu trabalho.

Aos amigos das outras turmas da FEMAT, sobretudo Amanda Machado, Renan Aranha e Lucas Athaydes, pelo companheirismo e diversão.

Ao meu orientador, professor Dr. Elias Fagury Neto, pela paciência e grande apoio no desenvolvimento deste trabalho.

A técnica do laboratório de cerâmica Tatiane Silva, pelo apoio técnico.

Ao Eng. Metalúrgico Sérgio Castro Borges, pelo apoio e fornecimento do rejeito da unidade de sinterização da Sinobras.

A Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará pela minha formação em Engenharia de Materiais.

“Opiniões existem para serem quebradas e isto só se torna possível através de ações”.

Autor

RESUMO

Visando-se sempre a economia e menor geração de impactos ambientais, a utilização de materiais alternativos e o aproveitamento de rejeitos industriais para a produção de cerâmicas estruturais têm sido bastante estudados nos últimos tempos. O objetivo do presente trabalho foi o estudo da variação das propriedades físico-mecânicas de cerâmicas feitas a partir duas argilas (gorda e magra) com adição do pó de despoeiramento da unidade de sinterização de uma usina siderúrgica local (PDS), sob duas condições: in natura e após ter sido submetido a um processo de separação magnética. Em ambas as situações o rejeito foi adicionado em proporções de 3%, 5%, 7% e 10%. Os corpos de prova foram conformados por prensagem uniaxial de dois estágios, calcinados por 2 horas a 300 °C e sinterizados por 2h nas temperaturas de 900°C, 1000°C e 1100°C. As propriedades analisadas foram: densidade aparente, absorção de água, porosidade aparente, retração linear de queima, módulo de ruptura à flexão e índice de plasticidade. As matérias primas foram caracterizadas por fluorescência e difração de raios-X com o intuito de se avaliar tais propriedades. Tal metodologia apresentou bons resultados, sob perspectivas de desenvolvimento de futuros trabalhos relacionadas à área.

Palavras-chave: Cerâmica, argila, pó de despoeiramento, propriedades, caracterização.

ABSTRACT

Aiming always the economy and generate less environmental impacts, the use of alternative materials and the use of industrial waste for the production of structural ceramics have been extensively studied in recent times. The objective of this work was to study the variation of physical and mechanical properties of ceramics made from two clays (fat and lean) with the addition of dusting powder of a local steel mill sintering unit (SDP), under two conditions: fresh and after being subjected to a magnetic separation process. In both cases the waste was added in proportions of 3%, 5%, 7% and 10%. The test-bodies were shaped by uniaxial two-stage pressing, calcined for 2 hours at 300 °C and sintered at temperatures of 900 °C, 1000 °C and 1100 °C. The analyzed properties were density, water absorption, porosity, linear firing shrinkage, modulus of rupture in bending and plasticity index. The raw materials were characterized by fluorescence and diffraction X-rays in order to evaluate such properties. This methodology showed good results in the development of future work related to the area.

Keywords: pottery clay, dusting powder, properties, characterization

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aumento da área superficial com a diminuição das dimensões de um cubo	17
Figura 2 – Distribuição granulométrica ideal para uma boa compactação	19
Figura 3 – Estágios da sinterização: (1) Formação da área de contato; (2) diminuição do volume de poros; (3) Formação da porosidade fechada	21
Figura 4 – Produção nacional de cerâmicas, mostrando uma maior parcela para a classe de cerâmicas vermelhas (a); produção regional de cerâmica vermelha no ano de 2011 (b)	23
Figura 5 – Representação esquemática da mistura de materiais que precede a sinterização (a); Esquema simplificado do processo de sinterização de uma planta de operação contínua (b)..	27
Figura 6 – Representação detalhada da sinterização	28
Figura 7 – Sistema de despoeiramento da planta de sinterização da Siderúrgica Norte Brasil S.A., apresentando um par de ciclones (mais afrente) e um sistema de filtros de manga (mais ao fundo).....	30
Figura 8 – Esquema de um precipitador eletrostático (a); fotografia do equipamento instalado (b)	31
Figura 9 – Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.....	35
Figura 10 – Difratometria de raios-X do pó de sinterização	42
Figura 11 – Difratometria de raios-X da argila com a adição do pó de sinterização (10%), sinterizados a 1100 °C	42
Figura 12 – Densidade aparente das formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS.....	43
Figura 13 – Retração linear de queima das formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS.....	44
Figura 14 – Absorção de água das formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS	46
Figura 15 – Porosidade aparente das formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS.....	47
Figura 16 – Módulo de ruptura à flexão das formulações antes (a) e depois (b) do processo separação magnética do PDS.....	49
Figura 17 – Curva de gresificação para a formulação inicial (apenas argila)	51
Figura 18 – Curva de gresificação para a formulação 2 antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética.....	51

Figura 19 – Curva de gresificação para a formulação 3 antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética.....	51
Figura 20 – Curva de gresificação para a formulação 4 antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética.....	52
Figura 21 – Curva de gresificação para a formulação 5 antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética.....	52
Figura 22 – Índice de plasticidade de todas as formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS.....	53
Figura 23 – Zonas de extrusão antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS, mostrando a localização de todas as formulações.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Dados estimados da geração de resíduos siderúrgicos	26
Tabela 3 – Formulações propostas para o desenvolvimento do trabalho	36
Tabela 4 – Composição química das matérias primas utilizadas	40
Tabela 5 – Comparação entre os resultados das curvas de gresificação de todas as formulações	52
Tabela 6 – Quadro geral comparativo entre os resultados dos ensaios tecnológicos realizados antes e depois do processo de separação magnética do rejeito utilizado.....	56

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Densidade Aparente	36
Equação 2 – Retração Linear de Queima	37
Equação 3 – Absorção de Água	37
Equação 4 – Porosidade Aparente	37
Equação 5 – Módulo de Ruptura à Flexão	38

LISTA DE ABREVIATURAS

- A1 – Amostra 1
- A2 – Amostra 2
- A3 – Amostra 3
- A4 – Amostra 4
- A5 – Amostra 5
- A6 – Amostra 6
- A7 – Amostra 7
- AA – Absorção de Água
- DA – Densidade Aparente
- DRX – Difractometria de Raios-X
- F1 – Formulação 1
- F2 – Formulação 2
- F3 – Formulação 3
- F4 – Formulação 4
- F5 – Formulação 5
- FRX – Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X
- IP – Índice de Plasticidade
- MRF – Módulo de Ruptura à Flexão
- NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
- PA – Porosidade Aparente
- PDS – Pó de Sinterização
- RLQ – Retração Linear de Queima
- ZE – Zona de Extrusão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. OBJETIVO GERAL.....	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1. ARGILA	13
3.1.1. Composição típica de uma argila.....	14
3.1.2. Principais aplicações das argilas.....	15
3.1.3. Argilas para cerâmica vermelha	15
3.1.4. Principais etapas do processo de fabricação de cerâmicas vermelhas.....	17
3.1.4.1. Seleção e preparação das matérias-primas	17
3.1.4.2. Secagem	18
3.1.4.3. Prensagem.....	18
3.1.4.4. Sinterização	19
3.1.4.5. Separação magnética	21
3.1.5. O setor de cerâmica vermelha no Brasil.....	22
3.1.6. Especificações.....	23
3.2. A GERAÇÃO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS	24
3.3. O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO SIDERÚRGICA.....	26
3.3.1. Sistemas de separação de particulados sólidos	28
3.3.1.1. Ciclone e filtros de manga	29
3.3.1.2. Precipitadores eletrostáticos	30
3.4. O EMPREGO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS EM CERÂMICA VERMELHA.....	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. MATERIAIS	34

4.2. METODOLOGIA.....	34
4.2.1. Ensaios tecnológicos	36
4.2.1.1. Densidade Aparente (DA)	36
4.2.1.2. Retração Linear de Queima (RLQ)	36
4.2.1.3. Absorção de Água (AA).....	37
4.2.1.4. Porosidade Aparente (PA)	37
4.2.1.5. Módulo de Ruptura à Flexão (MRF)	38
4.2.1.6. Índice de Plasticidade (IP) e zonas de extrusão (ZE)	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO.....	40
5.1.1. Caracterização química	40
5.1.2. Caracterização mineralógica	41
5.2. ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	43
5.2.1. Densidade aparente (DA)	43
5.2.2. Retração Linear de Queima (RLQ)	44
5.2.3. Absorção de água (AA)	45
5.2.4. Porosidade aparente (PA)	47
5.2.5. Módulo de ruptura à flexão (MRF)	48
5.2.6. Curvas de gresificação.....	50
5.2.7. Índice de plasticidade (IP)	53
5.2.8. Zonas de extrusão (ZE)	54
6. CONCLUSÕES.....	57
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

A incorporação de resíduos industriais em cerâmica vermelha vem se tornando uma prática muito difundida mundialmente e que tem como principal finalidade dar uma destinação final e ambientalmente correta aos resíduos. A variabilidade natural das características das argilas e o emprego de técnicas de processamento relativamente simples para fabricação de cerâmicas vermelhas, tais como blocos de vedação e telhas, facilitam a incorporação de outros tipos de materiais. Alguns destes materiais na forma de resíduos até facilitam o processamento e melhoram a qualidade do produto final (SOUZA, 2008).

A lavra, classificação, manuseio e transporte do minério de ferro geram uma quantidade elevada de partículas finas e ultrafinas cuja aplicação direta na indústria siderúrgica é impraticável. O desenvolvimento dos processos de aglomeração, através do aquecimento, possibilitou que os finos de minério de ferro, antes considerados rejeitos de lavra, passassem a ter valor econômico ao se agregarem essas partículas com tamanho e qualidade que possibilitassem sua aplicação direta nos fornos siderúrgicos na forma de sinter e pelotas (NAZARENO SILVA, 2011). A um desses processos, considerado cíclico, damos o nome de sinterização.

Os finos de retorno, gerados no processo, originam-se da sinterização incompleta do material, esboroando de forma a gerar esses finos. Quando a quantidade de finos produzidos na planta ultrapassa a quantidade exigida para seu retorno ao processo, faz-se necessário propor alternativas viáveis para sua reutilização, evitando-se o seu descarte e posteriores danos ao meio ambiente. A solução encontrada por siderúrgicas locais está na utilização de piscinas localizadas na própria unidade de sinterização para a estocagem desse pó e posterior recirculação do mesmo no processo. O seu direcionamento para o pátio de resíduos da siderúrgica também é uma saída utilizada pela empresa. Porém, alternativas vem sendo analisadas para se reutilizar este pó (SILVA SANTOS *et al*, 2015). De fato, trabalhos reportados na literatura têm mostrado que é perfeitamente possível a reciclagem de resíduos industriais como constituintes de massas cerâmicas para fabricação de produtos para construção civil.

Um problema que pode surgir com a adição do rejeito da planta de sinterização está no aumento do teor de hematita, podendo influenciar negativamente na resistência mecânica dos corpos cerâmicos, sendo este um dos parâmetros fundamentais, na avaliação da viabilidade da

massa cerâmica para a produção de tijolos e telhas, devendo-se estudar criteriosamente a incorporação de rejeitos para manter o padrão exigido pelas normas técnicas.

Devido ao fato deste resíduo possuir grandes quantidades de óxidos de ferro em sua composição, a separação destes do restante do material utilizando suas propriedades magnéticas torna-se uma alternativa bastante viável, devido à simplicidade do processo. Portanto, neste trabalho propôs-se a incorporação do rejeito oriundo da unidade de sinterização de uma usina siderúrgica local em formulações de cerâmica vermelha, para se avaliar as propriedades dos materiais produzidos e se determinar a viabilidade de reutilização deste co-produto industrial.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Incorporação do pó produzido na unidade de sinterização em formulações de cerâmica argilosa, como uma nova alternativa de reutilização do mesmo fora do ambiente siderúrgico, avaliando-se as propriedades tecnológicas e suas características antes e depois do processo de separação magnética.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as propriedades tecnológicas e as características dos corpos de prova confeccionados com adição do pó de sinterização para a produção de cerâmica estrutural, em diferentes temperaturas e porcentagens dos materiais nas formulações.
- Realizar o processo de separação magnética do rejeito.
- Confeccionar novos corpos de prova com a adição do rejeito após separação magnética, e avaliar suas propriedades.
- Fazer um comparativo entre os resultados das propriedades e características, antes e depois do processo de separação magnética.
- Avaliar os resultados dos ensaios dos corpos de prova com base nos valores limites recomendados pela literatura para a fabricação de materiais cerâmicos e verificar se as diferentes temperaturas e teores de matérias primas teriam influência significativa no produto final.
- Avaliar o efeito da adição do rejeito de sinterização, antes e depois da separação magnética, sobre a plasticidade das massas cerâmicas produzidas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ARGILA

Segundo Leggerini (2008), argilas são materiais terrosos naturais, que misturados com a água adquirem a propriedade de apresentar alta plasticidade. São compostas de partículas coloidais de diâmetro inferior a 0,005 mm, com alta plasticidade quando úmidos e que formam torrões de difícil desagregação quando sob pressão. Durante muito tempo se conceituou argila como derivada da caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), porém hoje se sabe que podem ter outras origens. Sua constituição envolve partículas cristalinas extremamente pequenas chamadas de argilominerais, das quais a caulinita é a mais abundante e importante. É encontrada abundantemente na natureza, nas margens dos rios e manguezais, sendo barata e fácil de manipular. É reciclável e se conserva ao longo dos anos somente exigindo um pouco de cuidado e umidade.

A argila se origina da desagregação de rochas que comumente contém feldspato, por intemperismo, que é a ação físico-química do ambiente sobre as rochas. A ação química caracteriza-se pelo ataque do ácido carbônico presente na atmosfera e outros elementos agressivos de chuvas e águas. A ação física se refere à erosão, vulcanismos, pressão, descompressão e etc.

Normalmente, as jazidas são formadas pelo processo de depósito aluvial, ou seja, as partículas menores (e, portanto, mais leves) são levadas por corrente de água e depositadas no lugar onde a força hidrodinâmica já não é suficiente para mantê-las em suspensão.

As argilas constituídas essencialmente pela caulinita são as mais refratárias, pois são constituídas essencialmente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), enquanto que as outras, devido à presença de potássio, ferro e outros elementos, têm a refratariedade sensivelmente reduzida. A presença de outros minerais, muitas vezes considerados como impurezas, pode afetar substancialmente as características de uma argila para uma dada aplicação; daí a razão, para muitas aplicações, de se eliminar por processos físicos os minerais indesejáveis. A estes processos denominamos beneficiamento (LEGGERINI, 2008).

3.1.1. Composição típica de uma argila

A análise química consiste em determinar a composição de uma matéria-prima, fornecendo os percentuais de óxidos presentes e também os valores de perda ao fogo (GRUN, 2005). De uma maneira simplificada, a interpretação de uma análise química de uma matéria-prima argilosa, segundo Más (2002), pode ser descrita abaixo:

- *Óxido de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O):* presentes geralmente na forma de feldspatos são fundentes e conferem resistência mecânica quando sinterizados entre 950 e 1000°C.
- *Óxido de cálcio (CaO) e magnésio (MgO):* são agentes fundentes e tendem a diminuir a refratariedade das peças, indicando a presença de calcita, dolomita e massas calcárias que requerem moagem e temperaturas de sinterização de aproximadamente a 1100°C.
- *Sílica ou óxido de silício (SiO_2):* indica a presença de silicatos e sílica livre. Os silicatos são os argilominerais, as micas e os feldspatos. A sílica livre corresponde ao quartzo;
- *Alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3):* está em sua maior parte combinada, formando os argilominerais. Sua presença, junto com a sílica (aluminossilicatos) conferem refratariedade às cerâmicas.
- *Hematita ou óxido de ferro (Fe_2O_3):* responsável pela coloração vermelha ou amarelada na maioria das argilas, reduz a plasticidade (dependendo de sua estrutura), mas também diminui a retração e facilita a secagem. Também diminui a resistência mecânica, mas o pouco que funde na sinterização proporciona dureza ao vidrado (BITENCOURT, 2004).
- *Óxido de titânio (TiO_2):* desvia a cor para um tom alaranjado.
- *Óxido de enxofre (SO_3):* pode indicar a presença de gesso.
- *Óxido de manganês (MnO_2):* altera a cor para marrom.
- *Carbonatos:* ajudam no branqueamento das peças, diminuem a expansão e aumentam a porosidade.
- *Perda ao fogo:* é a diminuição de peso, até um valor constante, que indica uma perda de material devido ao aumento de temperatura. Basicamente indica o teor de matéria orgânica presente na argila e a quantidade de gás e vapor que são formados durante o aquecimento, resultantes da decomposição dos carbonatos.

3.1.2. Principais aplicações das argilas

Segundo a ABCERAM (2011), as argilas apresentam uma enorme gama de aplicações, tanto na área de cerâmica como em outras áreas tecnológicas. Pode-se dizer que em quase todos os segmentos de cerâmica tradicional a argila constitui total ou parcialmente a composição das massas.

- De um modo geral, as argilas que são mais adequadas à fabricação dos produtos de cerâmica vermelha apresentam em sua constituição os argilominerais illita, de camadas mistas illita-montmorilonita e clorita-montmorilonita, além de caulinita, pequenos teores de montmorilonita e compostos de ferro.
- As argilas para materiais refratários são essencialmente caulínicas, devendo apresentar baixos teores de compostos alcalinos, alcalinos-terrosos e de ferro; podendo conter ainda em alguns tipos a gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).
- As argilas para cerâmica branca são semelhantes às empregadas na indústria de refratários; sendo que para algumas aplicações a maior restrição é a presença de ferro e para outras, dependendo do tipo de massa, além do ferro a gibbsita.
- No caso de materiais de revestimento são empregadas argilas semelhantes às utilizadas para a produção de cerâmica vermelha ou as empregadas para cerâmica branca e materiais refratários.

3.1.3. Argilas para cerâmica vermelha

As argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha ou, como também conhecidas na literatura técnica, argilas comuns (*common clays*) abrangem uma grande variedade de substâncias minerais de natureza argilosa. Compreendem, basicamente, sedimentos pelíticos consolidados e inconsolidados, como argilas aluvionares quaternárias, argilitos, siltitos, folhelhos e ritmitos, que queimam em cores avermelhadas, a temperaturas variáveis entre 800 e 1.250 °C. Essas argilas possuem geralmente granulometria muito fina, característica que lhes conferem, com a matéria orgânica incorporada, diferentes graus de plasticidade, quando adicionada de determinadas porcentagens de água; além da trabalhabilidade e resistência a verde, a seco e após o processo de queima, aspectos importantes para fabricação de uma grande variedade de produtos cerâmicos (ARAÚJO *et al*, 2015).

Na indústria de cerâmica vermelha ou estrutural as argilas são empregadas como matéria-prima na fabricação de blocos de vedação e estruturais, telhas, tijolos maciços, tubos e ladrilhos.

As argilas comuns, para cerâmica vermelha ou estrutural, têm como principal característica a cor de queima avermelhada. Essa propriedade deve-se à presença de óxido de ferro, geralmente superior a 4% (FACINCANI, 1992), valor que foi corroborado pelos estudos efetuados em depósitos brasileiros na região do Recôncavo Baiano (CONCEIÇÃO FILHO & MOREIRA, 2001).

O setor de cerâmica vermelha utiliza a chamada massa monocomponente, composta, basicamente, só por argilas, isto é, não envolve a mistura de outras substâncias minerais (caulim, filito, rochas feldspáticas, talco e rochas calcárias), como em outros segmentos da indústria cerâmica, casos das louças de mesa e sanitários (ROCHA, 2012).

A formulação da massa é feita geralmente de forma empírica pelo ceramista, envolvendo a mistura de uma argila “gorda”, caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina e composição essencialmente de argilominerais, com uma argila “magra”, rica em quartzo e menos plástica, que pode ser caracterizada como um material redutor de plasticidade e que permite a drenagem adequada das peças nos processos de secagem e queima (MOTTA *et al*, 2005).

Busca-se por meio da composição dessa mistura, a composição de uma massa que tenha algumas funções tecnológicas essenciais, tais como:

- *Plasticidade*: propiciar a moldagem das peças;
- *Resistência mecânica à massa verde e crua*: conferir coesão e solidez às peças moldadas, permitindo a sua trabalhabilidade na fase pré-queima;
- *Fusibilidade*: favorecer a sinterização e, conseqüentemente, a resistência mecânica e a diminuição da porosidade;
- *Drenagem*: facilitar a retirada de água e a passagem de gases durante a secagem e queima, evitando trincas e dando rapidez ao processo;
- *Coloração das peças*: atribuir cores às cerâmicas por meio da presença de corantes naturais (óxidos de ferro e manganês).

3.1.4. Principais etapas do processo de fabricação de cerâmicas vermelhas

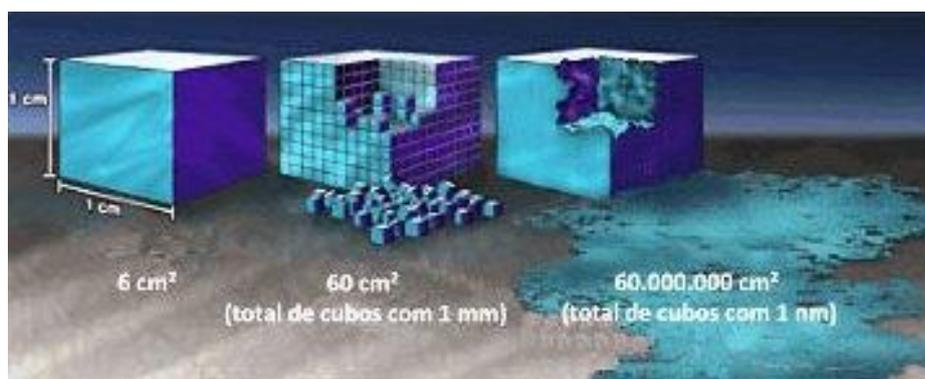
3.1.4.1. Seleção e preparação das matérias-primas

Grande parte das matérias-primas utilizadas na indústria cerâmica tradicional é natural, encontrando-se em depósitos espalhados na crosta terrestre. Após a mineração, os materiais devem ser beneficiados, isto é, desagregados ou moídos, classificados de acordo com a granulometria e muitas vezes também purificados. O processo de fabricação, propriamente dito, tem início somente após essas operações. As matérias-primas sintéticas geralmente são fornecidas prontas para uso, necessitando apenas, em alguns casos, de um ajuste de granulometria (ABCERAM, 2015).

O objetivo da moagem é diminuir, o máximo possível, o tamanho das partículas das matérias-primas envolvidas no processo e garantir a homogeneização da massa cerâmica dentro de uma distribuição granulométrica definida. Um alto grau de moagem pode influenciar na reatividade entre os vários componentes durante a queima devido à maior área de contato superficial entre as partículas (Figura 1), e com isso contribuir na melhoria da resistência mecânica do material queimado (OLIVEIRA, 2000).

Na moagem das matérias-primas, devem ser distinguidas diferentes etapas de redução, todas em função do seu tamanho médio de partículas e pode ser feito a partir de britadores, cujo objetivo básico é a ruptura de material em tamanhos compreendidos entre 5 cm e 1 cm; os trituradores ou desagregadores, para tamanhos próximos ao milímetro, e os moinhos até a distribuição granulométrica desejada. A dureza das matérias-primas a moer passa a ser fator determinante na seleção do equipamento. Um dos equipamentos mais utilizados no processo de moagem é o moinho de bolas (HECK, 1996).

Figura 1 – Aumento da área superficial com a diminuição das dimensões de um cubo



Fonte: TRINDADE *et al* (2012)

3.1.4.2. *Secagem*

Após a etapa de moagem e de conformação, as peças em geral continuam a conter água, proveniente da etapa de cominuição e preparação da massa (se no caso forem a úmido). Para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminar essa água, de forma lenta e gradual, em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas variáveis entre 50 °C e 150 °C (ABCERAM, 2015).

A operação de secagem é considerada aparentemente simples, uma vez que os fenômenos físicos que são verificados durante a evaporação de umidade residual das massas cerâmicas são evidentes e controláveis. O único problema neste caso é exclusivamente do equipamento a ser utilizado nesta etapa. Com a evaporação da água residual, nota-se um aumento na resistência mecânica da peça cerâmica crua, e que é atribuída pela densificação provocada pelo empacotamento e atração de partículas que aumentam as forças de ligação entre elas (BRISTOT, 1996).

É um processo térmico que realiza a eliminação de grande parte da água de constituição e de adição, e depende de alguns fatores: estado do ar (temperatura e umidade), a quantidade de ar em contato com o material a secar, a superfície específica do material (relação superfície/volume) e a natureza do material (NAVARRO *et al*, 1997).

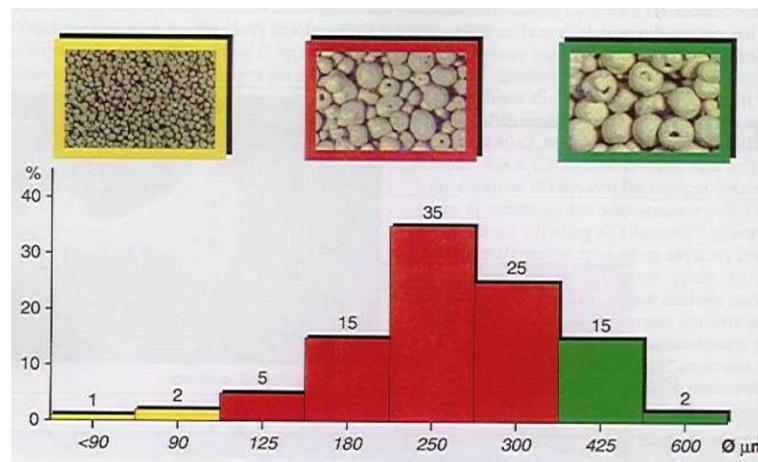
3.1.4.3. *Prensagem*

As partículas das matérias-primas (aglomerados) são comprimidas até um menor volume possível, por meio de uma pressão exercida, obtendo-se um empacotamento e agregação destas partículas. O empacotamento vem a ser o preenchimento total ou parcial dos espaços, com o uso de partículas que podem ser de formatos irregulares ou arredondados. Sendo assim, pode-se obter alta densidade aparente a cru, mas que seja compatível com os problemas de “coração negro” ou desgaseificação, que podem ocorrer durante a etapa de queima (sinterização) (OLIVEIRA, 2000). Na Figura 2 é mostrado teoricamente, como deve se comportar a distribuição granulométrica do pó para uma boa compactação.

Para a fabricação de peças de revestimentos cerâmicos são utilizadas prensas hidráulicas para a compactação dos aglomerados, conferindo-lhes além da resistência mecânica a cru, a forma geométrica desejada. Tais prensas são equipamentos onde a ação da prensagem se dá mediante a transformação de energia hidráulica em força de deformação. Um pistão de duplo efeito que se move no interior de um êmbolo é o órgão principal do movimento da máquina.

Estas prensas têm como características principais a *constância na força de prensagem*, que influencia diretamente na retração das peças cerâmicas após a queima pela pressão de compactação, ou seja, quanto maior a pressão de prensagem, menor será a retração do produto acabado e vice-versa; a granulometria; a umidade e a distribuição de pó nos estampos, que são condições que afetam o pó a prensar e, a *constância no tempo do ciclo de prensagem* que dá condição à alta produtividade (RIBEIRO *et al*, 2001).

Figura 2 – Distribuição granulométrica ideal para uma boa compactação



Fonte: (RIBEIRO *et al*, 2001)

Pode-se dizer ainda que em peças com alta densidade aparente a cru, são encontrados valores de umidade do pó elevados ou uma maior pressão de compactação. Estas três variáveis são importantes, pois determinam as características do módulo de ruptura das peças cruas e queimadas, a absorção de água e a retração linear após a queima (MOTTA *et al*, 2002).

3.1.4.4. Sinterização

A queima dos materiais cerâmicos é uma etapa do processo onde se manifestam todas as operações realizadas durante a fabricação, aparecendo frequentemente defeitos nas peças acabadas ocasionados em etapas anteriores, mas que até então não haviam sido detectados. Pode-se definir como sinterização o processo de tratamento térmico a temperaturas elevadas, onde um sistema de partículas individuais ou um corpo poroso sofrem modificações em algumas de suas propriedades no sentido de chegar num estado de máxima densificação possível, reduzindo conseqüentemente, a porosidade do material. Devido à densificação, o material sofre uma retração (que se pode chamar de *retração de queima* do material),

influenciando na estabilidade dimensional e na resistência mecânica final do produto cerâmico (VAN VLACK, 1973).

Na sinterização as partículas se aglomeram formando uma massa coerente que trazem mudanças significativas ao produto cerâmico, sugerido por Van Vlack como: (1) redução na área específica total; (2) redução no volume aparente total (diminuição da porosidade); (3) aumento na resistência mecânica.

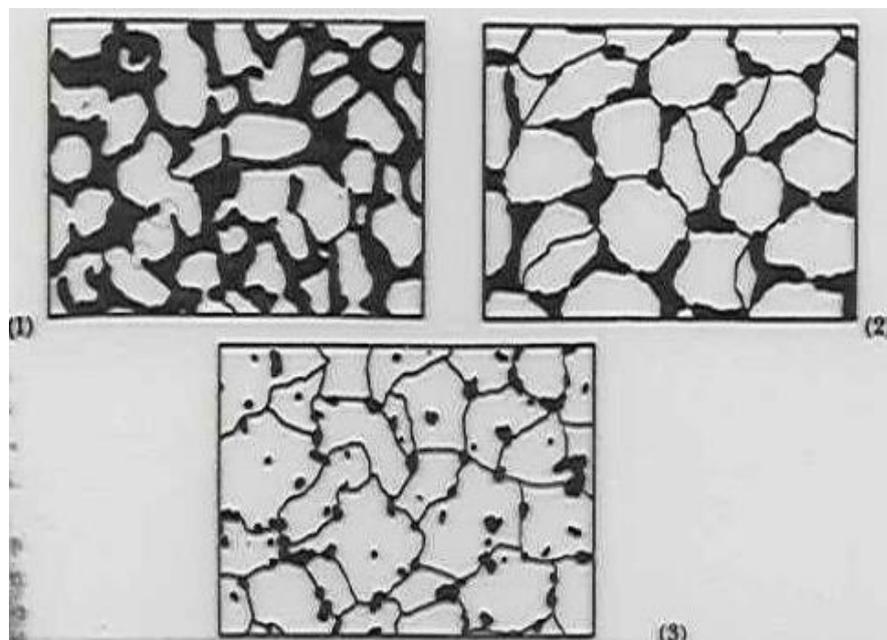
Quando as partículas se unem em um contato mais íntimo, o que reduz a porosidade, iniciam-se os mecanismos de sinterização (Figura 3), que podem ser divididos em três estágios, conhecidos também como teoria da sinterização.

(1) *Etapa inicial ou formação da área de contato (necking stage)*: as partículas começam a unir-se entre si. Nesta etapa da sinterização não há um crescimento visível das partículas e a retração macroscópica é praticamente imperceptível.

(2) *Diminuição do volume dos poros*: com o tempo de sinterização, os poros (fases vazias) diminuem, e se tem um sistema formado por um material maciço e poros. Os poros são na realidade um reservatório de vazios, que se difundem dentro da matriz e são aniquilados nos poros maiores no estágio intermediário, do qual os poros ainda são maiores e ao mesmo tempo ainda há bastante contornos de grão. Neste estágio a retração e a diminuição da porosidade apresentam uma velocidade maior que no estágio final.

(3) *Formação da porosidade fechada*: neste estágio, os poros tendem a conseguir uma forma esférica. A velocidade de sinterização diminui e o aumento da retração da peça cerâmica é muito menor do que na etapa anterior, sendo difícil determinar o término do processo de sinterização.

Figura 3 – Estágios da sinterização: (1) Formação da área de contato; (2) diminuição do volume de poros; (3) Formação da porosidade fechada



Fonte: (VAN VLACK, 1973)

3.1.4.5. Separação magnética

O uso da separação magnética no beneficiamento de minérios consiste, não só na remoção dos minerais de ferro considerados contaminantes, como também na concentração de minérios, como exemplo, na concentração de hematita contida em itabirito. A aplicação da separação magnética ao processamento mineral depende da susceptibilidade magnética dos minerais a serem processados, enquanto o método eletrostático de beneficiamento de minérios considera a condutividade elétrica dos minerais, como a propriedade básica de separação (SAMPAIO & LUZ, 2004).

Segundo França *et al* (2011), a atração magnética de um mineral, quando submetido a um campo magnético, varia com a sua composição química, isto é, com o seu índice de impurezas, as quais dependem da sua forma de ocorrência nos jazimentos minerais. A propriedade de um material que determina a sua resposta a um campo magnético é a *susceptibilidade magnética*. De acordo com esta propriedade, os materiais podem ser:

- a) *Ferromagnéticos*: compreendem aqueles que são fortemente atraídos pelo ímã comum. O exemplo mais conhecido é a magnetita (Fe_3O_4).
- b) *Paramagnéticos*: são fracamente atraídos pelo ímã comum e o exemplo clássico é a hematita (Fe_2O_3). Esses minerais possuem permeabilidade magnética mais elevada que a do

meio circundante, usualmente, água ou ar. Além disso, concentram um elevado número de linhas de indução provenientes do campo externo.

c) *Diamagnéticos*: possuem susceptibilidade magnética negativa e, portanto, são repelidos quando submetidos a um campo magnético. Nesse caso, além do quartzo, destacam-se: a cerussita, magnesita, calcita, barita, fluorita, esfarelita, dentre outros. Esses minerais possuem permeabilidade magnética mais baixa que a do meio circundante (usualmente água ou ar). Esse efeito diamagnético é geralmente menor que o correspondente efeito de atração dos minerais paramagnéticos.

3.1.5. O setor de cerâmica vermelha no Brasil

O desenvolvimento do setor de cerâmica vermelha no Brasil foi vigorosamente impulsionado, a partir de meados da década de 1960, pela implementação de políticas públicas habitacionais, por meio da criação do Sistema Financeiro da Habitação e do Banco Nacional da Habitação. Durante a década de 1970, sustentada por uma demanda continuada, ocorre o *boom* da construção civil no País, provocando a modernização e expansão da indústria cerâmica nacional. Na esteira dessa ampliação do setor, houve a incorporação de processos inovativos e o lançamento de novas linhas de produtos, tendo-se por extensão também, o crescimento e a diversificação da produção de minerais industriais para a indústria cerâmica brasileira (CABRAL JÚNIOR *et al*, 2002).

Dados da Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2011) indicam que o setor de cerâmica vermelha conta, atualmente, com aproximadamente 7.000 estabelecimentos fabris, considerando apenas as empresas que dispõem de equipamentos de extrusão, distribuídos amplamente por todo território nacional, mais notadamente nas regiões Sudeste e Sul, perfazendo um faturamento da ordem de R\$ 4,2 bilhões. Para este parque industrial são estimados um consumo anual de cerca de 82 milhões de toneladas de argilas.

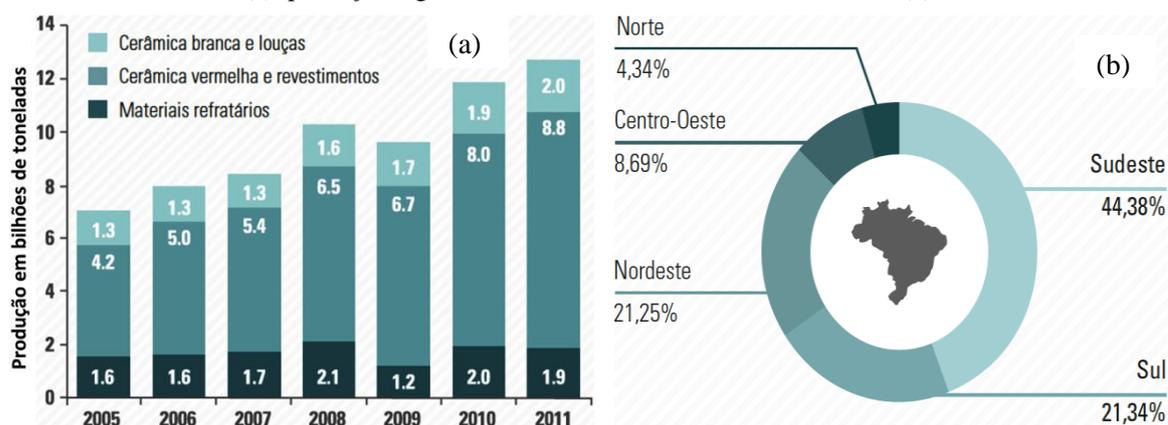
Recentemente o setor empresarial vem tomando iniciativas para aprimoramento tecnológico e competitivo do setor, como a adesão em programas de qualidade, implantação de laboratórios de caracterização tecnológica de matérias-primas e produtos, qualificação de mão-de-obra, desenvolvimento do uso de novos combustíveis, em especial do gás natural, estudos de incorporação de resíduos na massa cerâmica e diversificação da produção (TANNO *et al*, 2005).

A argila para cerâmica vermelha caracteriza-se como um produto de baixo valor unitário, fazendo com que sua mineração opere de maneira cativa (trabalhando apenas para a

sua própria cerâmica) ou abasteça mercados locais. Os preços praticados estão na faixa de R\$ 3,00 a R\$ 5,00 (FOB) para a tonelada de argila comercializada *in natura* (CABRAL JÚNIOR *et al*, 2005).

O mercado de tijolos, nos últimos anos, tem apresentado um crescimento bastante considerável. Pela recente expansão do setor de construção civil, o mercado para este segmento tem se mostrado promissor. O sudeste paraense apresenta uma produção expressiva de cerâmica vermelha ou estrutural devido à qualidade e abundância das matérias-primas utilizadas, argilas plásticas que são extraídas em áreas de várzea para a produção de blocos de alvenaria, blocos de vedação e telhas, utilizando para este processo de produção a conformação de massas cerâmicas através de extrusão em marombas (PAES SANTOS *et al*, 2012). A Figura 4 apresenta tanto a produção nacional de cerâmica quanto a produção regional de cerâmica vermelha.

Figura 4 – Produção nacional de cerâmicas, mostrando uma maior parcela para a classe de cerâmicas vermelhas (a); produção regional de cerâmica vermelha no ano de 2011 (b)



Fonte: (SEBRAE, 2015)

3.1.6. Especificações

A composição mineralógica, química e física das argilas é importante para a confecção de peças cerâmicas, pois, isoladamente ou combinada, essas propriedades conferem as características de trabalhabilidade no preparo e conformação das peças e a sinterização no processamento térmico, dando a resistência mecânica necessária. No entanto, para a caracterização e indicação de uma argila para um determinado uso cerâmico, utilizam-se ensaios experimentais padronizados, ou composição das massas feitas de forma empírica, com base na experiência do técnico ou do oficial prático cerâmico. Neste último caso, o processo pode ser variável de local para local e dificulta a padronização de formulações e,

consequentemente, de especificações de matérias-primas para os diferentes usos industriais (ALMEIDA *et al*, 2005).

Segundo Souza Santos (1989), para determinar os usos potenciais de uma argila plástica para cerâmica vermelha (tijolos de alvenaria, telhas, ladrilhos de piso e manilhas), deve-se seguir os seguintes passos:

- 1) A argila deve ser submetida a uma caracterização tecnológica, que consiste, basicamente, na realização de ensaios de laboratório: análise granulométrica, umidade, limite de plasticidade e ensaios cerâmicos em corpos de prova (7,0 x 2,0 x 1,0 cm) moldados manualmente.
- 2) Esses a seguir são levados ao forno para queima em temperaturas que variam de 950 a 1250°C. Após a queima os corpos de prova são submetidos a ensaios físicos (Normas ABNT) de: retração linear (%), tensão de ruptura à flexão (kgf/cm² ou MPa), absorção de água (%), porosidade aparente (%), massa específica aparente (g/cm³) e cor após a queima.
- 3) A partir das características das cerâmicas no estado cru e após a queima nas diferentes temperaturas, comparam-se os valores medidos com os valores-limites requeridos para cada uso na fabricação de tijolos, telhas, ladrilhos de piso etc.

Para a fabricação de tijolos, as argilas devem ser moldadas facilmente, apresentar valores de tensão de ruptura de médio a elevados, cor vermelha após a queima, poucas trincas e empenamentos. Deve ainda apresentar teores elevados de ferro divalente e baixos teores de elementos alcalinos e alcalino-terrosos.

Para fabricação de telhas, as argilas devem ter plasticidade adequada para a moldagem, tensão de ruptura à flexão elevada quando secas, de forma a permitir o manuseio durante o processo de fabricação. Após a queima deve apresentar baixa porosidade aparente e baixa absorção de água e não apresentar trincas e empenamentos após secagem e queima. A cor, após a queima, dever ser vermelha, visto que a tradição do mercado brasileiro é pelas cores vivas, variando de alaranjado ao vermelho. Por outro lado, argilas com baixo teor de ferro resultam em telhas de cores claras, com características cerâmicas também adequadas para fabricação de telhas e tijolos. Ressalta-se que, em relação à cor, atualmente há uma aceitação crescente, sobretudo nas regiões costeiras, com destaque no Nordeste, de telhas brancas ou claras. Este fato é atribuído, provavelmente, às melhores características de resistências às intempéries locais – atmosfera salina – propiciado por essas telhas brancas por apresentar um menor conteúdo de sais solúveis (ainda em estudo).

3.2. A GERAÇÃO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS

O setor siderúrgico gera uma diversidade de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas nas suas diversas etapas de processamento. Os resíduos podem ser classificados em três grupos: resíduos recicláveis, contendo ferro em quantidades de 25 a 85% em peso, resíduos carboquímicos e escórias. Em uma usina integrada brasileira, cada tonelada de aço gera cerca de 200 kg de resíduos sólidos ricos em ferro (SOBRINHO & TENÓRIO, 2000).

No ano 2000, a produção anual de aço bruto no mundo foi de 780 milhões de toneladas. Tal volume de produção foi responsável pela geração de aproximadamente 30 milhões de toneladas de resíduos recicláveis. No Brasil, onde a produção de aço anual foi de 25 milhões de toneladas, foram gerados cerca de 1,2 milhões (CUNHA *et al*, 2006). A Tabela 1 mostra a produção média dos principais resíduos siderúrgicos, tanto no Brasil quanto no mundo.

Os principais resíduos recicláveis numa usina siderúrgica integrada são: pós da sinterização, pós e lamas de alto-forno, lamas de aciaria, carepas de lingotamento contínuo, carepas de escarfagem, lamas de laminação e os finos de coque. A recuperação dos teores metálicos contidos nestes resíduos passou a ser muito importante tanto quanto aos limites impostos pelas legislações ambientais, como do ponto de vista econômico, visto que substituem, em parte, matérias primas geralmente empregadas no processo (TAKANO *et al*, 2000). Assim, encontrar alternativas tecnológicas para destinação desses resíduos vem sendo uma das prioridades das empresas. A meta é aumentar a média de reciclagem de resíduos do setor.

Muitos resíduos da produção de ferro e aço têm destinação direta no próprio processo siderúrgico, enquanto outros como a lama de alto-forno e o material particulado da planta de sinterização de uma indústria siderúrgica não podem ser tão simplesmente empregados. A dificuldade de destinação deste último em alguma das plantas do processo siderúrgico está no fato dele conter sódio e potássio, prejudiciais à redução dos óxidos de ferro (RIBEIRO, 2010).

Tabela 1 - Dados estimados da geração de resíduos siderúrgicos

RESÍDUO	MUNDO		BRASIL
	Kg/t gusa ou aço	Milhões de t/ano	Milhões de t/ano
Recicláveis	43	30	1,2
Poeira de alto-forno	1 a 2 (***)	0,5 a 1,0	0,2 a 0,04
Lama de alto-forno	< 1 (***)	~ 0,2	~ 0,001
Poeira de sinterização	15	7	0,3
Finos de coque	-----	-----	-----
Lama grossa do conversor	5 a 6	2,5	0,1
Lama fina do conversor	17	8	0,34
Carepas	10 a 20	7	0,3
Poeira de aciaria elétrica	15	4,6	0,07
Escória de alto-forno	150 a 350	140	6,0
Escória do conversor	100	47 (*)	2,0 (**)
Escória do lingotamento contínuo	30 a 35	17 (*)	0,7 (**)
Escória da aciaria elétrica	15	5 (*)	0,075

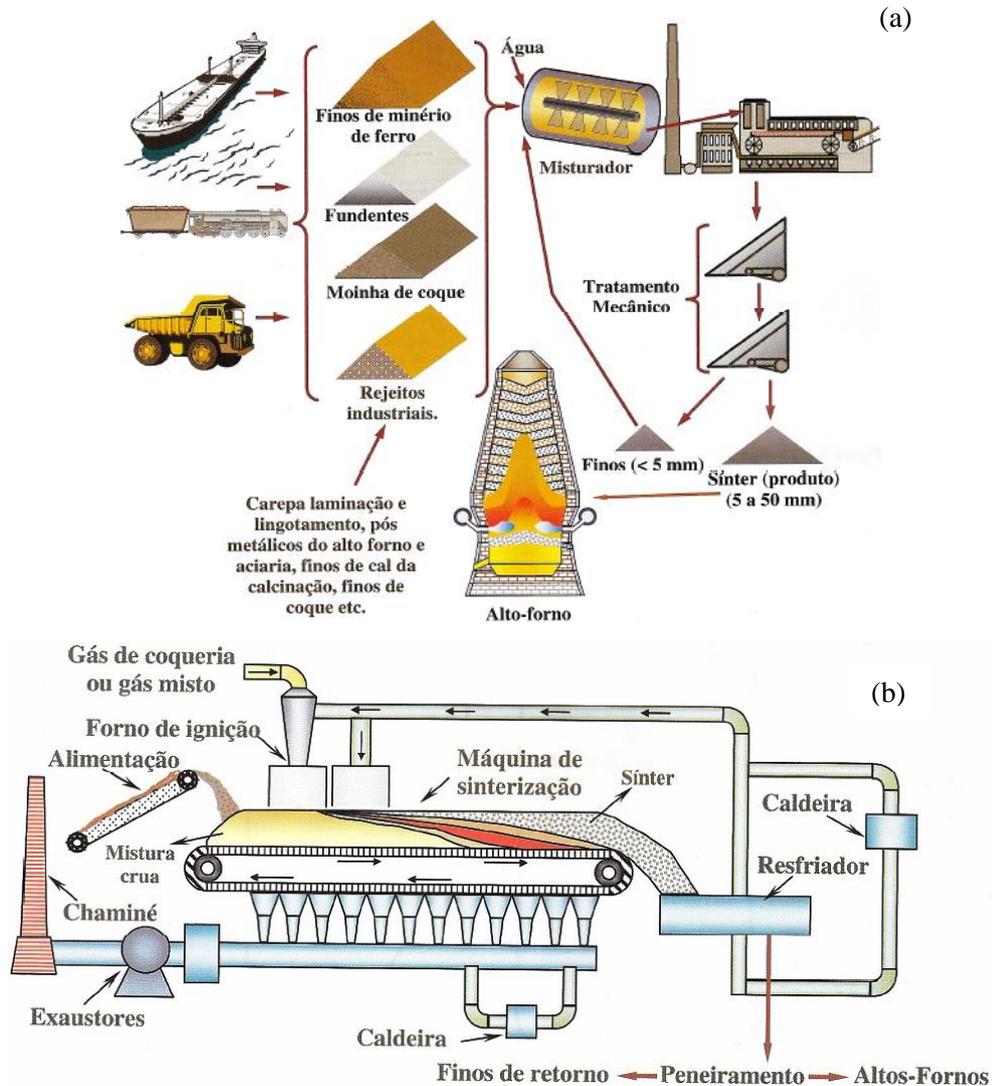
Fonte: (TAKANO *et al*, 2000)

3.3. O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO SIDERÚRGICA

Segundo Mourão (2007), a sinterização visa transformar os finos de matéria prima em aglomerados que possibilitem maior aproveitamento, além de permitir o manuseio do material com menor produção de poeira. Tais finos podem ser gerados naturalmente durante a extração do minério da jazida, por cominuição para que possa ser posteriormente aglomerado ou por processos envolvendo a produção do aço nas usinas integradas, como é o caso dos que contém o ferro e são recicláveis (poeiras e lamas de alto-forno e de aciaria, lama de tratamento de água de laminação, poeiras de sinterização e outros), os finos de coque e as escórias.

O processo de sinterização de minério objetiva, além de boa redutibilidade do material, também boa resistência mecânica. Tal processo consiste em aglomerar por fusão incipiente (início de fusão) uma mistura de finos de minério, coque ou carvão vegetal, fundentes, sínter de retorno e água. Os finos de minério devem apresentar tamanho entre 0,5 e 7 mm ou até 10 mm, porém com 25% de fração de tamanho inferior a 0,1 mm. Já o coque ou carvão vegetal deve apresentar entre 0,3 e 3 mm uma vez que partículas de maior tamanho alargam o pico de temperatura que deve ocorrer durante o processo de sinterização. A adição de água tem como objetivo evitar obstrução do meio reacional mantendo as partículas finas aderentes às nucleantes, e assim garantindo a permeabilidade do meio (MOURÃO, 2007). A Figura 5 apresenta um fluxograma simplificado do processo de sinterização de uma usina siderúrgica.

Figura 5 – Representação esquemática da mistura de materiais que precede a sinterização (a); Esquema simplificado do processo de sinterização de uma planta de operação contínua (b)

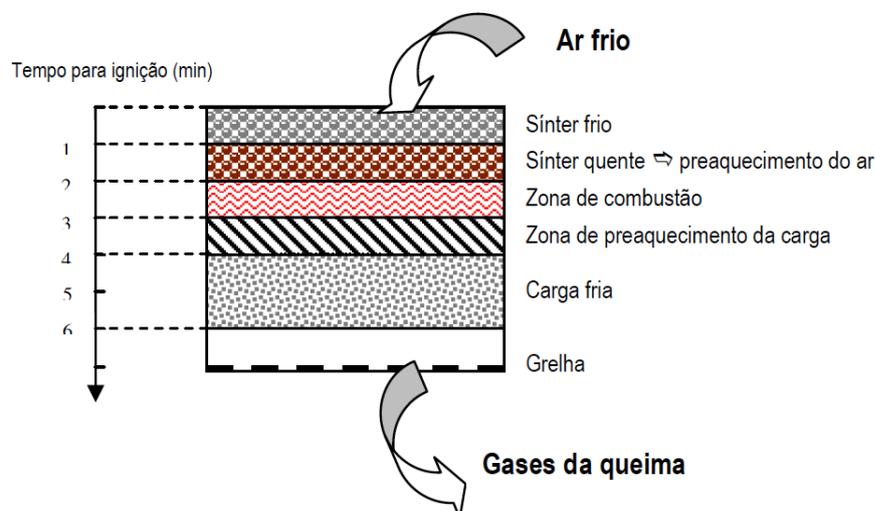


Fonte: (RIZZO, 2005)

Tal processo exige bom controle de permeabilidade da carga, ou seja, da granulometria do material, permitindo a vazão certa e homogênea do ar e dos gases da combustão. A água é adicionada para promover aderência das partículas muito finas à superfície das mais grossas. Porém se as partículas forem muito finas torna-se necessária uma micropelotização prévia.

A temperatura da carga varia de cerca de 450°C a 1350°C e cada camada do material que se encontra em estágio diferente do processo tem, aproximadamente, 10 cm de altura. A Figura 6 representa detalhadamente a sinterização desde a entrada do ar frio para a combustão até a saída dos gases da queima.

Figura 6 – Representação detalhada da sinterização



Fonte: (MOURÃO, 2007)

Da sinterização resultam, além do sínter, os gases da queima que sofrem tratamento ao passarem através de um equipamento responsável pela retenção do particulado que passa pela grelha da esteira/panela antes da emissão atmosférica. A destinação econômica e tecnologicamente viável do sólido resultante do tratamento dessas emissões atmosféricas (pó de sinterização) é o objetivo deste trabalho.

3.3.1. Sistemas de separação de particulados sólidos

Após estudos sobre a viabilidade de reduzir ou eliminar a liberação de contaminantes emitidos pelos processos de produção de modo a adequar o seu quantitativo ao limite máximo estabelecido para as emissões, a implantação de sistemas de depuração é alternativa para minimizar o impacto ambiental gerado pelas substâncias ou compostos contaminantes presentes nas emissões gasosas, que constituem-se de partículas sólidas provenientes da combustão de gases ou substâncias no estado gasoso.

Quando o contaminante está na forma de partículas sólidas, os principais mecanismos de separação são: força gravitacional, força centrífuga, queda aerodinâmica. Este último mecanismo está associado a: impacto inercial, interceptação, difusão, atração eletrostática, sedimentação, força do fluxo, força eletrostática, força térmica, força de difusão, força magnética (RIBEIRO, 2010).

Segundo Navarro (2001), a opção por um dos possíveis sistemas de separação de partículas depende de detalhes relativos ao processo, como características das partículas, características da corrente gasosa e fatores de operação.

Como no processo de sinterização a umidade desaparece na pré-fusão da carga, o processo de separação do particulado é realizado via seco, pelos equipamentos que serão descritos a seguir.

3.3.1.1. Ciclone e filtros de manga

O mecanismo de funcionamento dos ciclones baseia-se em submeter partículas presentes na mistura sólido-gás, a uma força centrífuga. Assim as partículas colidem com a superfície do ciclone, separam-se da corrente gasosa e são recolhidas pela parte inferior do equipamento.

A utilização dos filtros de manga é um dos métodos mais antigos, simples e eficientes para separar componentes de misturas sólido-gás por filtração. Trata-se da passagem do fluido por um leito poroso e permeável que retém as partículas sólidas. Tais filtros são formados por uma série de tecidos filtrantes (mangas) apoiados em estrutura rígida, situados em uma câmara de forma geralmente cilíndrica, com um coletor na parte inferior. A Figura 7 mostra um sistema de despoeiramento de uma usina siderúrgica local, apresentando a combinação entre os ciclones e os filtros de manga.

Figura 7 – Sistema de despoeiramento da planta de sinterização da Siderúrgica Norte Brasil S.A., apresentando um par de ciclones (mais afrente) e um sistema de filtros de manga (mais ao fundo)



Fonte: (AUTOR, 2011)

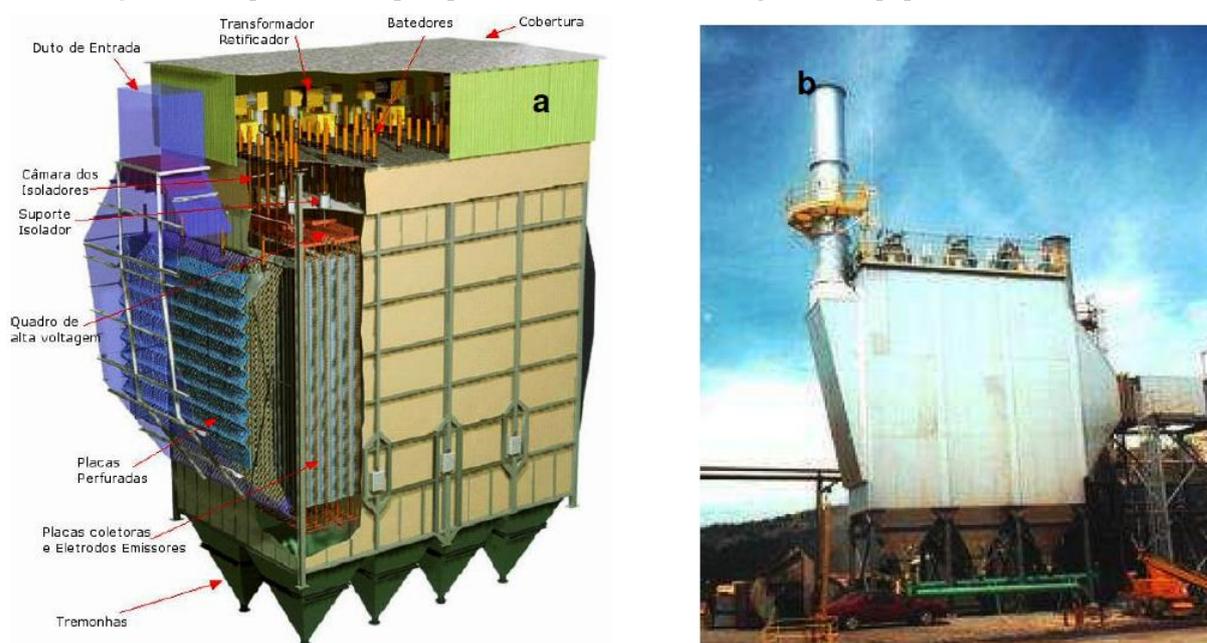
3.3.1.2. *Precipitadores eletrostáticos*

São equipamentos capazes de depurar misturas gasosas dos tipos sólido-gás ou líquido-gás. O emprego dos mesmos é indicado nos casos de necessidade de tratamento de grandes quantidades de mistura gasosa contendo partículas muito pequenas (entre 0,001 e 85 μm) quando seja requerida alta eficiência.

O princípio de funcionamento do equipamento consiste na aplicação de elevada diferença de potencial, de 40 a 120 kV, entre placas entre as quais o fluido/gás é forçado a passar. Tal diferença de potencial aplicada é suficiente para ionizar o gás. As partículas presentes, carregadas eletricamente, são atraídas pelo eletrodo coletor sobre o qual é formada uma camada resultante da deposição do sólido. Periodicamente, as placas coletoras são submetidas a procedimentos de limpeza por vibração.

De acordo com Ribeiro (2010), os parâmetros de construção do precipitador eletrostático são: o rendimento desejado e as características da emissão como a vazão do efluente, a temperatura, a concentração das partículas no fluido, a composição, o tamanho médio e as propriedades elétricas das mesmas. A Figura 8 mostra o esquema e a fotografia de um precipitador eletrostático.

Figura 8 – Esquema de um precipitador eletrostático (a); fotografia do equipamento instalado (b)



Fonte: (BARRETO NETO, 2008)

3.4. O EMPREGO DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS EM CERÂMICA VERMELHA

A grande produção de resíduos provenientes de diversos segmentos da cadeia produtiva tem induzido uma busca constante na sua reciclagem, como carga, agregado, e também como elemento gerador de propriedades adicionais quando incorporados às mais diversas matrizes (CHAVES, 2009). Dentro da grande área cerâmica, a cerâmica vermelha é o setor que consegue absorver as maiores quantidades de resíduos provenientes de diversas atividades industriais. (REIS, 2007).

Em geral, os resíduos siderúrgicos possuem uma composição química bastante diversificada com óxidos de alumínio, ferro, silício, sódio, cálcio e etc., os quais podem possibilitar uma interação com a argila para a fabricação de produtos cerâmicos (MENEZES; NEVES; FERREIRA, 2002).

Alguns estudos foram realizados sobre a incorporação de resíduos diversos de siderurgia em cerâmica vermelha, com bons resultados em relação à melhoria de propriedades tecnológicas dos corpos confeccionados e testados em laboratório (RIBEIRO, 2010).

Freitas (2016), utilizou o rejeito de minério de ferro com objetivo de analisar a viabilidade da incorporação deste abundante coproduto industrial, e obter características que possam agregar valor aos produtos de cerâmica estrutural. Para isso foram preparadas formulações com objetivo de avaliar a microestrutura, as propriedades físicas e mecânicas obtidas após a incorporação do rejeito

como substituto parcial da argila. Os resultados foram positivos, mostrando que teores de rejeito incorporados em associação à massa argilosa para fabricação de cerâmica vermelha, melhoraram as propriedades físicas das amostras.

Holanda *et al* (2004), incorporaram um resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico na formulação de uma massa argilosa utilizada na fabricação de cerâmica vermelha. As massas preparadas continham os seguintes teores de resíduo de siderurgia: 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0% em peso. As propriedades físico-mecânicas foram determinadas em função da temperatura de queima e do conteúdo de resíduo de siderurgia. Os resultados obtidos indicaram que o resíduo adicionado modificou as características físico-químicas e, também, as propriedades da massa argilosa pura. As massas cerâmicas contendo este resíduo têm potencial para serem empregadas na fabricação de produtos de cerâmica vermelha para a construção civil.

Monteiro *et al* (2007), avaliaram o efeito da incorporação de até 20% em peso de lama fina de aciaria, proveniente de uma indústria siderúrgica integrada, na microestrutura de argila caulínica utilizada para a fabricação de tijolos e telhas, além de avaliar a inertização de elementos potencialmente tóxicos através de ensaios de lixiviação e solubilização na cerâmica incorporada. Os corpos de prova foram obtidos por prensagem uniaxial a 18 MPa e queimados a 900°C. Os resultados indicaram que a lama fina de aciaria contribui para o incremento de hematita na cerâmica queimada e que sua incorporação em 20% em peso altera a microestrutura da cerâmica argilosa criando regiões de falhas que contribuem para o decréscimo da resistência mecânica da argila.

Ribeiro (2010), avaliou o potencial do resíduo em pó do precipitador eletrostático da etapa de sinterização de uma usina siderúrgica integrada, como componente de massa cerâmica para confecção de peças em cerâmica vermelha, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%. O resíduo sólido particulado foi caracterizado por DRX, FRX, MEV, MO, ATD/TG e espectroscopia Mössbauer. A microestrutura das massas cerâmicas foi avaliada por MO, MEV, DRX e porosimetria de mercúrio. Foram determinadas ainda propriedades físicas e mecânicas da cerâmica com os diversos teores de incorporação, tais como: RLQ, AA e TRF. Os resultados indicaram que este tipo de resíduo tem potencial para o uso em cerâmica vermelha.

Vieira *et al.* (2006) estudou os efeitos da incorporação de até 20% de lama fina de aciaria, um material com 74% em massa de ferro total, em argila caulínica usada na confecção de telhas e tijolos. Os corpos de prova foram confeccionados por prensagem uniaxial a 18 MPa e queimados a 900°C. Resultados obtidos revelaram aumento no teor de hematita do material com intensificação da cor avermelhada e interferência na microestrutura do material com criação de região de falhas que contribuem para reduzir a resistência mecânica. Entretanto os

ensaios de lixiviação e solubilização apresentaram resultados satisfatórios o que faz da incorporação um procedimento viável quando se objetiva a inertização.

Souza (2007) avaliou a incorporação de resíduo do processo de pelotização de minério de ferro em cerâmica vermelha para fabricação de tijolos e telhas. Foram confeccionados corpos de prova com teores de 0%, 5%, 10%, 20% e 30% em massa do resíduo, que contém cerca de 85% de hematita, em argila caulínica da região de Campos dos Goytacazes, por prensagem uniaxial a 20 MPa. A queima foi realizada nas temperaturas de 700, 900 e 1100°C após secagem em estufa a 110°C por 24h, em forno de laboratório com taxa de aquecimento/resfriamento de 3°C/min e 1h na temperatura de patamar. Como resultado, foi observado que a incorporação de 10 a 30% de resíduo posiciona as massas em região do Diagrama de Winkler favorável à conformação de telhas, enquanto que a massa com 0% estava fora de qualquer das regiões de interesse para sua utilização por facilitar a conformação das peças. A absorção de água também sofreu alteração positiva com adição do resíduo, principalmente com teores de 5 e 10% e com a maior das temperaturas de queima usadas, apesar de ter aumentado consideravelmente a RLQ nesta temperatura. Adições de 5 e 10% do resíduo elevaram o TRF.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

As argilas utilizadas nas formulações foram de dois tipos: uma argila magra, denominada AM, com menor plasticidade e uma argila gorda, denominada AG, de maior plasticidade. Ambas foram fornecidas pela Cerâmica Castanheira Ltda., localizada em Marabá, Pará. As argilas foram secas e posteriormente maceradas com almofariz e pistilo e, em seguida passadas em peneira de forma a apresentarem a granulometria adequada de 100 mesh Tyler.

O rejeito utilizado nas formulações cerâmicas foi o pó de despoeiramento da sinterização (PDS) e foi fornecido pela Siderúrgica Norte Brasil S.A., localizada no Distrito Industrial da cidade de Marabá, Pará. O rejeito foi seco e em seguida passado em peneira de forma a apresentarem a granulometria adequada de 100 mesh Tyler.

4.2. METODOLOGIA

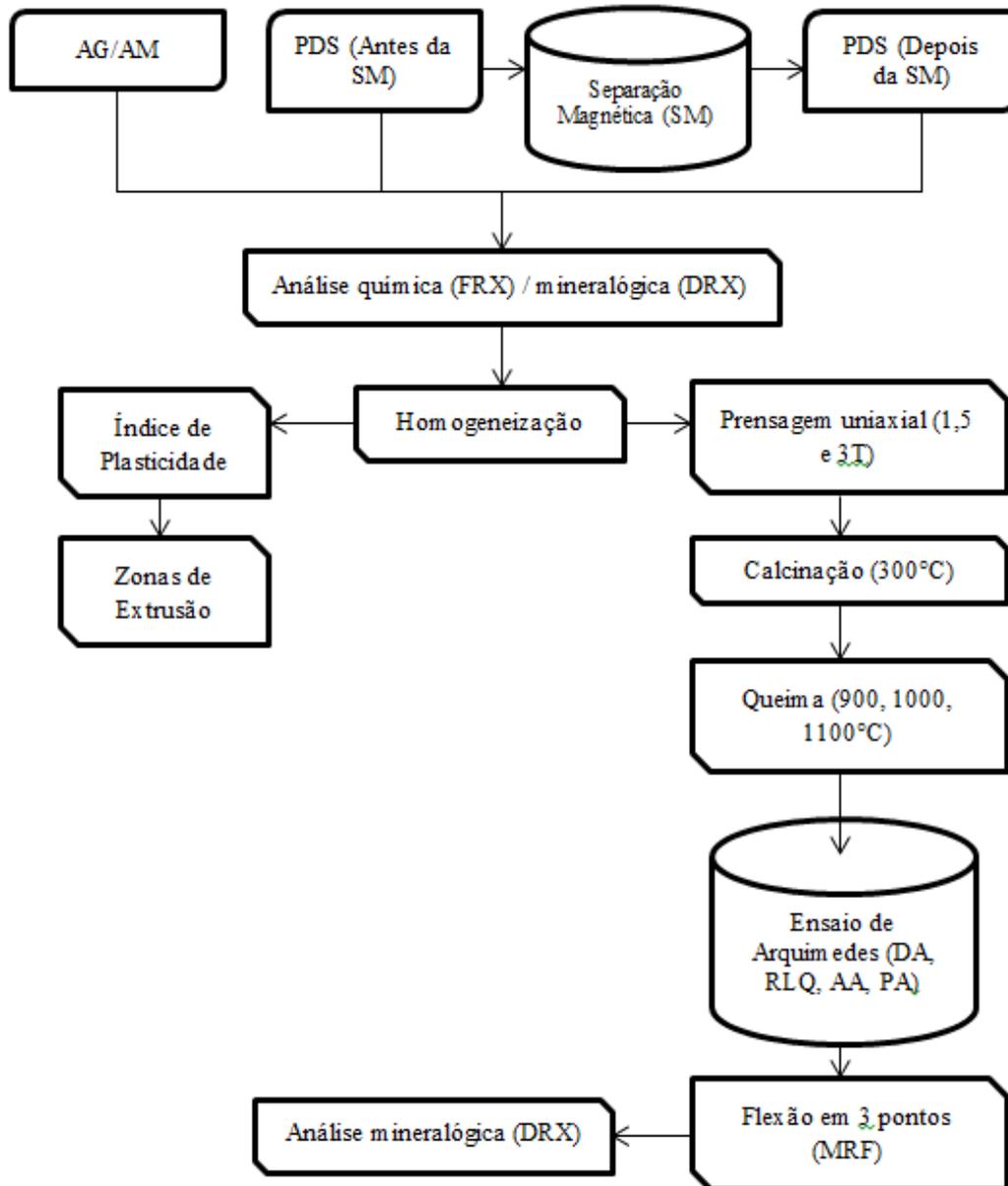
A Figura 9 demonstra, em forma de fluxograma, todas as etapas do procedimento experimental.

Para a análise das propriedades com a adição do PDS foram determinadas cinco formulações, sendo a primeira denominada formulação inicial (F1) composta apenas das duas argilas em proporções iguais. Nas demais formulações, teve-se a adição do PDS conforme é especificado na Tabela 2.

Na confecção dos corpos de prova utilizou-se para a prensagem uma matriz de aço, com dimensões 60 mm x 20 mm, na qual se aplicava uma carga inicial de 1,5T (12,25 MPa) e em seguida uma carga de 3T (24,5 MPa). Para cada formulação foram escolhidos corpos de prova, numa dada temperatura, totalizando 45 peças (15 para cada temperatura). Após calcinação a 300 °C por 2h, as amostras foram submetidas a sinterização a 900 °C, 1000 °C e 1100 °C por um período de 2h de patamar. Em seguida houve uma nova medição de suas dimensões para se determinar a retração linear de queima (RLQ), seguido de sua imersão em água por 12h para avaliar os parâmetros de densidade aparente (DA), absorção de água (AA) e porosidade aparente (PA). Na determinação da resistência mecânica, realizou-se o ensaio de flexão em 3 pontos, utilizando a máquina universal de ensaios marca EMIC, modelo DL10000.

Para a determinação do índice de plasticidade (IP) e das zonas de extrusão foram utilizadas as mesmas formulações, havendo apenas a adição de mais 2 amostras (uma contendo apenas argila gorda e outra apenas argila magra) para efeito de comparação entre os resultados.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho



Fonte: (AUTOR, 2016)

Realizou-se o processo de separação magnética, seguindo-se os mesmos parâmetros para a confecção dos novos CPs e realização dos mesmos ensaios tecnológicos.

Tabela 2 - Formulações propostas para o desenvolvimento do trabalho

AMOSTRA	IDENTIFICAÇÃO	AG (%)	AM (%)	PDS (%)
1	A1	100	-----	-----
2	A2	-----	100	-----
3	A3 / F1	50	50	-----
4	A4 / F2	48,5	48,5	3
5	A5 / F3	47,7	47,7	5
6	A6 / F4	46,5	46,5	7
7	A7 / F5	45	45	10

Fonte: (AUTOR, 2016)

4.2.1. Ensaios tecnológicos

4.2.1.1. Densidade Aparente (DA)

O ensaio de densidade aparente determina a porosidade dos corpos de prova, através da determinação da razão entre a massa e o volume. O ensaio para determinação desta propriedade foi realizada seguindo a norma ISO 10545 parte 3 – 1995. Com a Equação 1 foi possível determinar a densidade aparente para cada corpo de prova.

$$DA(g/cm^3) = \left(\frac{P_s}{P_u - P_i} \right) \cdot L \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde Ps = peso seco; Pu = peso úmido; Pi = peso imerso; L = densidade do líquido.

4.2.1.2. Retração Linear de Queima (RLQ)

A medida da retração linear é representada pela relação entre o comprimento inicial medido do corpo de prova com o auxílio de um paquímetro (precisão de $\pm 0,01$ mm) e o comprimento após a secagem dos corpos de prova (AICE/ITC, 1992). As medidas obtidas foram colocadas na Equação 2 e a retração para cada corpo de prova foi calculada.

$$RLQ(\%) = \left(\frac{L_i - L_f}{L_i} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde L_i = comprimento antes da queima; L_f = comprimento depois da queima.

4.2.1.3. Absorção de Água (AA)

De acordo com as normas NBR 15270/2005 e NBR 15310/2005, que estabelecem os procedimentos que devem ser adotados para ensaio de componentes cerâmicos (blocos e telhas), os corpos de prova de cada formulação, depois de sinterizados, foram pesados e submersos em água durante 24 horas. Ao decorrer deste tempo os mesmos foram novamente pesados, obtendo-se assim os valores do peso úmido. Os valores de massa seca foram obtidos anteriormente após submetê-los à secagem em estufa a 105°C, pesando-os imediatamente após a retirada da estufa. Os resultados foram então aplicados na Equação 3, apresentada abaixo, para a obtenção da porcentagem de água absorvida por cada corpo de prova.

$$AA(\%) = \left(\frac{P_U - P_S}{P_S} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde P_s = peso seco depois da queima; P_u = peso úmido.

4.2.1.4. Porosidade Aparente (PA)

A porosidade aparente é o ensaio que determina a quantidade de poros abertos nos corpos de prova depois de sinterizados, sendo calculada através da relação entre o quociente do volume de poros de cada corpo de prova pelo volume aparente. Para a realização do ensaio a norma regulamentada a ser seguida foi a ISO 10545 parte 3 – 1995, a exemplo dos ensaios de densidade aparente. A medida do peso úmido obtida no ensaio anterior foi utilizada. De posse das medidas, após o ensaio, com a utilização da Equação 4, representada abaixo, a PA de cada corpo de prova foi determinada.

$$PA(\%) = \left(\frac{P_U - P_S}{P_U - P_I} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde Ps = peso seco depois da queima; Pu = peso úmido; Pi = peso imerso.

4.2.1.5. *Módulo de Ruptura à Flexão (MRF)*

De acordo com a NBR 15310/2005, a determinação da carga de ruptura à flexão simples (flexão a três pontos ou ensaio dos três cutelos), tem por finalidade simular situações genéricas no transporte, no uso, na construção e manutenção de materiais cerâmicos. Os corpos de prova foram submetidos, em uma máquina de ensaios universal, ao ensaio de flexão em três pontos. Após o ensaio e com a utilização da Equação 5, a resistência à flexão foi determinada e, através deste ensaio, a qualidade das formulações e dos produtos finais foi determinada.

A medida do módulo de ruptura, em MPa (N/mm²), dos corpos de prova indica a capacidade das amostras suportarem esforços mecânicos exercidos por cargas, que podem levar a ruptura ou quebra dos mesmos. O ensaio de flexão em três pontos foi realizado na máquina de ensaios universal EMIC DL10000.

$$RM(MPa) = \left(\frac{3.P.L}{2.b.h^2} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde P = carga atingida na ruptura; L = distância entre os apoios; b = largura do corpo de prova; h = altura ou espessura do corpo de prova.

4.2.1.6. *Índice de Plasticidade (IP) e zonas de extrusão (ZE)*

O índice de plasticidade de uma argila é determinado pela diferença entre seu limite de liquidez (LL), que é o teor limite entre o estado líquido e o plástico, e o limite de plasticidade (LP) que consiste no teor de umidade limite entre o estado sólido e o semi-sólido.

O ensaio para determinar o LL é realizado com auxílio do aparelho de Casagrande (NBR 6459/84), onde se mede o teor de umidade no qual se fecha uma ranhura feita na amostra disposta em uma concha metálica, por meio de 25 golpes (padrão) a velocidade constante, desta concha contra uma base fixa.

O LP é determinado pelo mínimo teor no qual é possível moldar um cilindro de solo com 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento sem fissurar, de acordo com a NBR 7180/84 (BASTOS, 2005). Valores de IP menores do que 7% indicam que o solo é fracamente plástico, entre 7 e 15% medianamente plástico e acima de 15% altamente plástico.

A partir do índice de plasticidade e do limite de plasticidade pode-se construir o gráfico para classificação destas amostras em zona de extrusão ótima e zona de extrusão aceitável. Para uma extrusão aceitável a amostra deve apresentar índice de plasticidade entre 10 e 34% e limite de plasticidade entre 18 e 31%. No entanto, para uma extrusão ótima os valores para IP devem estar entre 15 e 25% e os de LP entre 18 e 25% (PAES SANTOS *et al*, 2012). Tais representações gráficas são de extrema importância, pois indicam a viabilidade de uma massa cerâmica poder ser conformada pela extrusora, de modo a não apresentar defeitos que possam vir a inutilizar as peças à verde para o posterior processo de queima, causando maiores custos de produção.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização de todos os procedimentos experimentais os resultados foram analisados de forma comparativa, antes do processo de separação magnética do óxido de ferro (ANTES) e depois da separação (DEPOIS). Os resultados dos ensaios tecnológicos foram também comparados às normas correspondentes que viabilizam a utilização destas formulações na indústria de cerâmica estrutural.

5.1. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

5.1.1. Caracterização química

Os resultados da análise química por fluorescência de raios-x (FRX) da argila e do pó de sinterização, tanto antes quanto depois de ser submetido ao processo de separação magnética, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química das matérias primas utilizadas

Matéria Prima	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	K₂O (%)	MgO (%)	CaO (%)	MnO (%)
Argila	58,972	25,193	9,154	2,450	0,940	0,262	-----
PDS (ANTES)	9,169	7,962	72,213	0,157	-----	8,763	0,769
PDS (DEPOIS)	27,955	16,846	13,866	5,538	-----	25,658	4,789

Fonte: (UAEMa-UFCG, 2016)

Observa-se que a argila é composta basicamente de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), característicos de matérias primas cauliníticas de coloração creme, uma vez que os teores de ferro são relativamente baixos (na faixa dos 9%) (PAES SANTOS *et al*, 2012). Outra característica referente à argila é o baixo teor de óxido fundentes como o óxido de magnésio (MgO), óxido de potássio (K₂O) e óxido de cálcio (CaO).

Durante o processo de sinterização, tais óxidos baixam o ponto de fusão, contribuindo para uma maior união entre as partículas e formação de uma fase líquida no interior da peça, devido às suas estruturas serem CFC e HC, possuindo mesmo fator de empacotamento e

facilitando uma maior densificação do material, que posteriormente adquire aspecto vítreo devido a presença dos óxidos refratários (SiO_2 e Al_2O_3), que possuem estruturas tetragonal (sílica) e octaédrica (alumina), implicando em uma maior estabilidade mesmo em altas temperaturas. Essa maior formação de fase vítrea contribui para uma maior densificação da peça, resultando numa retração da mesma e diminuição na quantidade de poros (espaço entre as partículas). Os valores de absorção de água diminuem e a resistência mecânica aumenta devido à maior coesão entre as partículas (SANTOS *et al*, 2015).

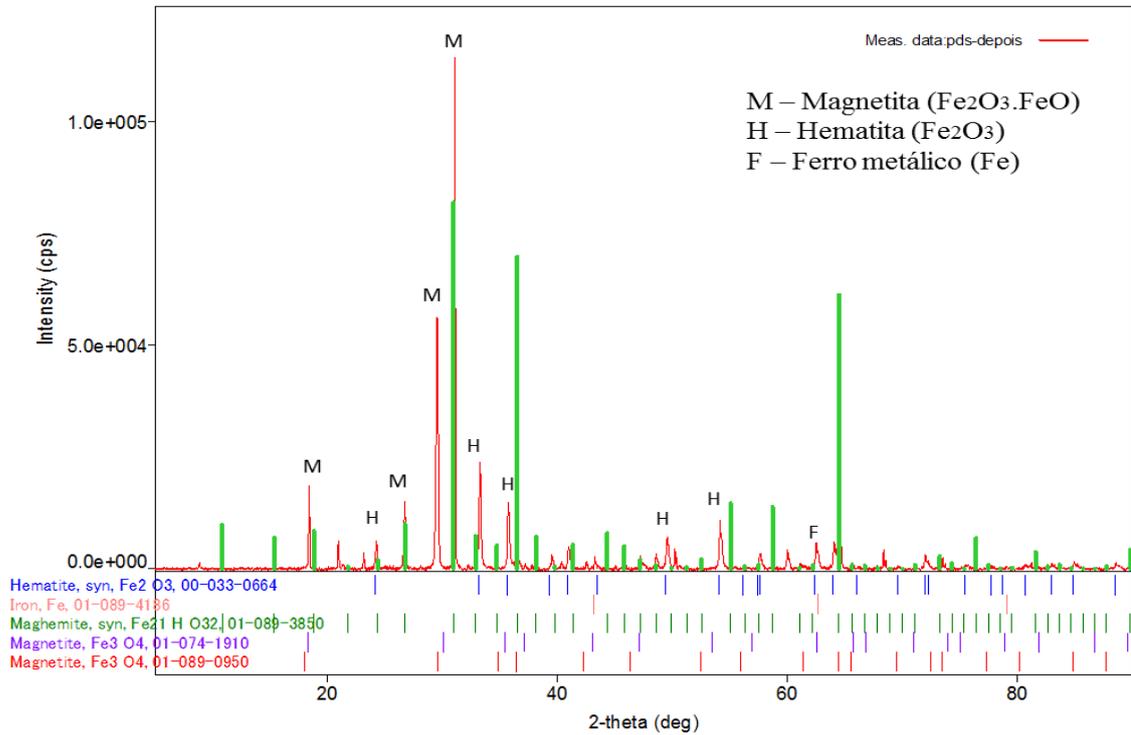
No pó da sinterização observa-se, inicialmente, um elevado teor de óxido de ferro, seguido de valores mais baixos de sílica e alumina. Isto implica em uma menor adição do rejeito à argila, uma vez que, apesar do mesmo apresentar uma quantidade baixa de sílica, que não causaria perdas significativas na plasticidade dos corpos de prova, o excesso de óxido de ferro, além de alterar a coloração, reduz de forma drástica a resistência mecânica. Com a realização do processo de separação magnética, o teor de óxido de ferro reduziu consideravelmente (cerca de 81% do teor inicial), concentrando ainda mais os demais óxidos, o que pode favorecer na evolução das propriedades físico-mecânicas.

5.1.2. Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica do pó de sinterização foi determinada por difratometria de raios-X. Os picos relacionados a cada fase foram identificados. O difratograma apresentado na Figura 10 representa o rejeito siderúrgico. Observou-se a partir dos picos que as principais fases encontradas foram a hematita (Fe_2O_3), magnetita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$) e pequenos traços de ferro metálico. Já a Figura 11 representa o difratograma da argila com a adição do rejeito siderúrgico (10% PDS), sinterizados a um patamar de 1100 °C. Vemos a presença da hematita, proveniente tanto da argila quanto do rejeito, bem como o quartzo (SiO_2), aluminossilicatos ($\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e aluminossilicatos hidratados ou caulinita [$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$], presentes na argila.

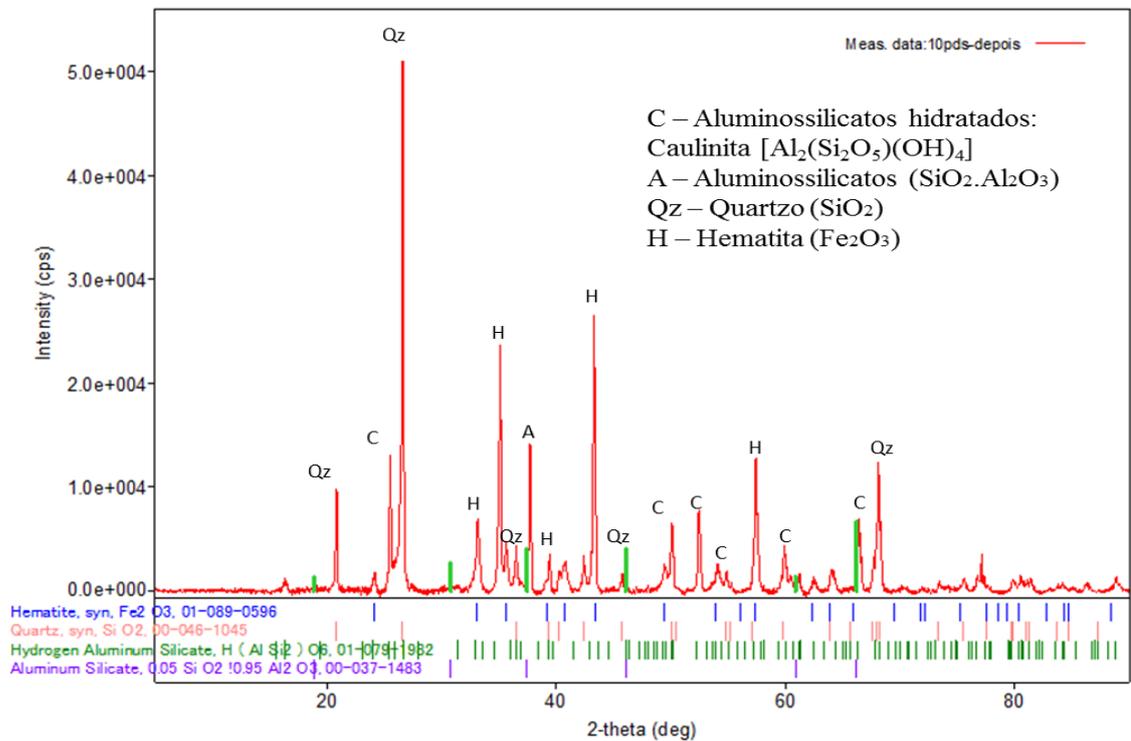
Tais fases cristalinas conferem ao produto final uma combinação de propriedades que pode torná-lo apto para ser empregado na indústria de cerâmica estrutural, uma vez que os aluminossilicatos contribuem com a plasticidade da massa cerâmica e redução da retração linear; a hematita, em teores controlados, influencia na coloração, podendo também atuar como um agente formador de fase líquida, que tende a preencher os poros gerados, e o quartzo favorece a secagem e contribui para a resistência após a sinterização das peças, através da vitrificação de tal fase líquida. (AMORIM, 2007).

Figura 10 – Difratometria de raios-X do pó de sinterização



Fonte: (AUTOR, 2016)

Figura 11 – Difratometria de raios-X da argila com a adição do pó de sinterização (10%), sinterizados a 1100 °C



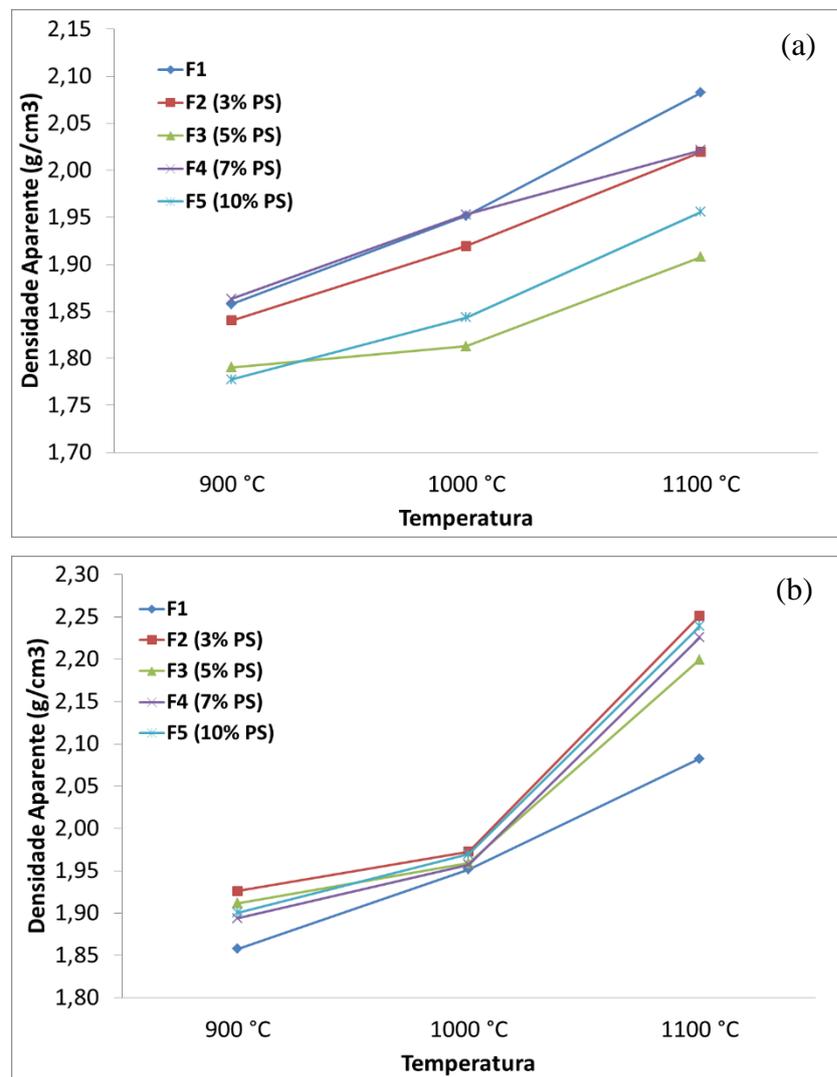
Fonte: (AUTOR, 2016).

5.2. ENSAIOS TECNOLÓGICOS

5.2.1. Densidade aparente (DA)

A Figura 12 apresenta as curvas de densidade aparente das formulações em função da temperatura.

Figura 12 – Densidade aparente das formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS



Fonte: (AUTOR, 2016)

Nota-se, em ambos os gráficos, um aumento desta propriedade com o aumento da temperatura de sinterização. Isto se deu devido a uma maior compactação das partículas, tanto argilosas quanto do rejeito, havendo uma maior redução na quantidade de poros dos corpos de

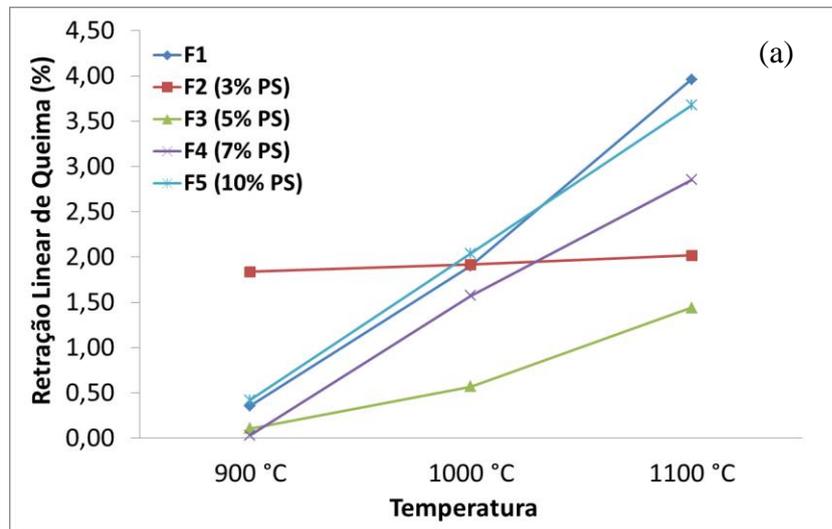
prova. Observa-se também que, ao realizar o processo de separação magnética do óxido de ferro presente no rejeito, houve uma evolução na densificação dos corpos de prova, que possuíam valores inferiores ou semelhantes aos da formulação de base (constituída apenas de argila) antes e passaram a ter valores superiores depois. Isto está relacionado ao fato deste óxido diminuir a compactação das partículas, quando presente em teores elevados.

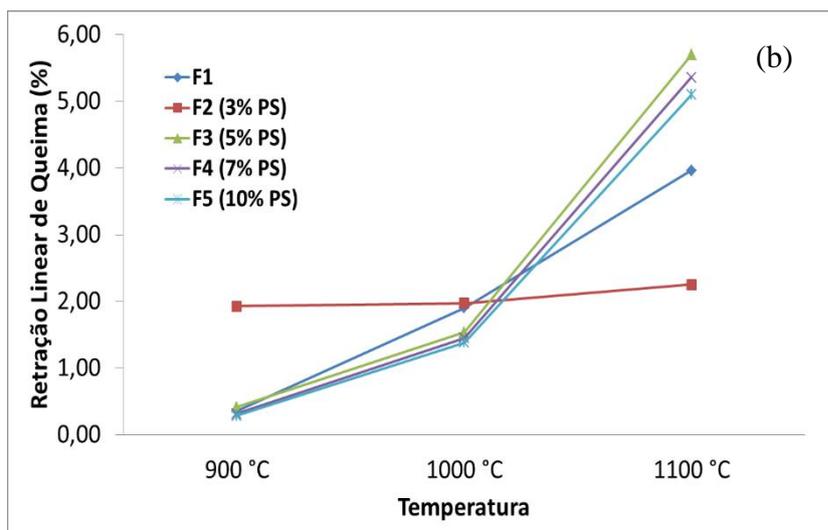
De acordo com Souza Santos (1989), argilas com emprego em cerâmicas estruturais (tijolos de alvenaria, furados e telhas) devem possuir valores de DA variando entre 1,52 e 2,14 g/cm³, quando aglomeradas por prensagem uniaxial. Portanto, todas as formulações podem ser utilizadas para este fim, tendo algumas atingido faixas até maiores do que a referência, como é o caso das que levam 3, 5, 7 e 10% do rejeito após a separação magnética e que foram sinterizadas a 1100°C.

5.2.2. Retração Linear de Queima (RLQ)

A Figura 13 apresenta as curvas de retração linear de queima das formulações em função da temperatura.

Figura 13 – Retração linear de queima das formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS





Fonte: (AUTOR, 2016)

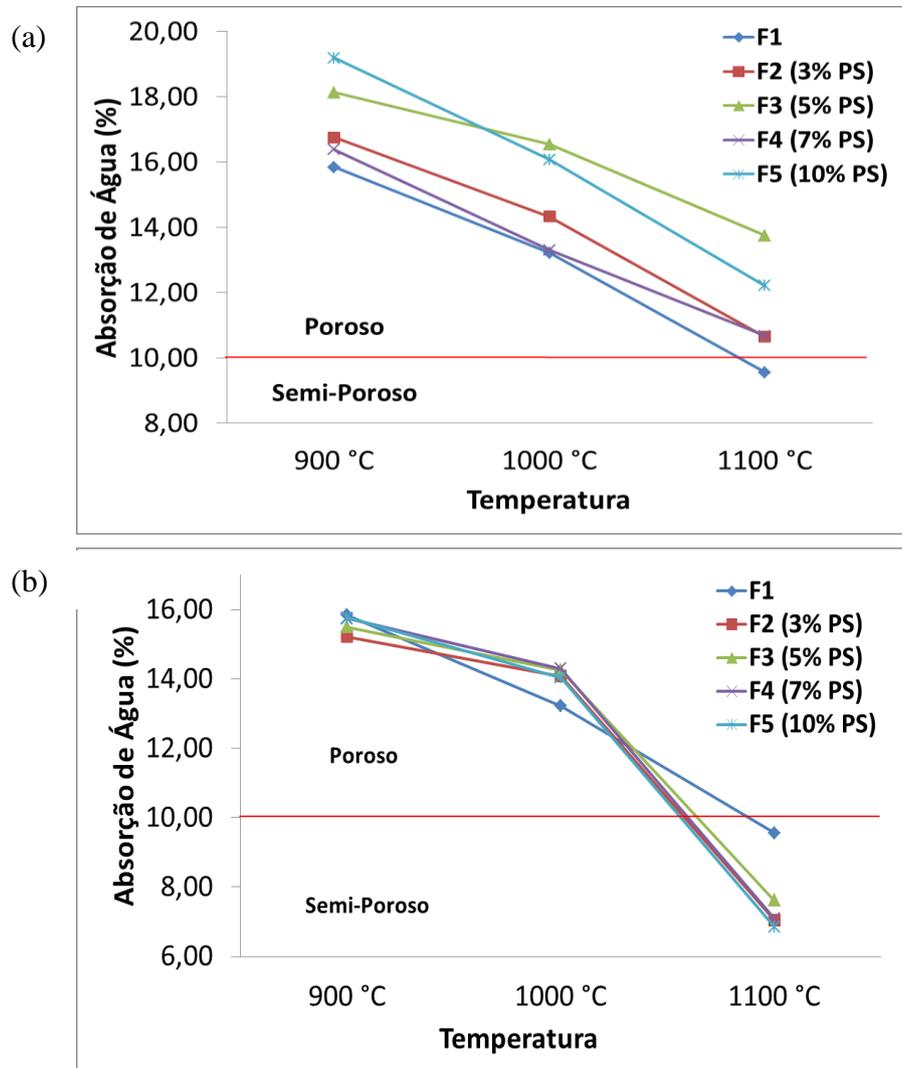
Houve um aumento desta propriedade em ambos os gráficos, com o aumento da temperatura de sinterização. A formulação com 3% do rejeito praticamente não variou muito em ambas as situações. As formulações com 5 e 7% do rejeito apresentaram valores abaixo da formulação inicial, constituída apenas por argila. Já os valores de F5 (10% do rejeito) foram semelhantes. Após a separação magnética, estas 3 formulações (F3, F4 e F5) retraíram bruscamente entre 1000°C e 1100°C, vindo a apresentar valores superiores à F1 na última temperatura. A variação desta propriedade está ligada com a propriedade analisada anteriormente no sentido de que maiores valores de retração linear implicam em uma maior densificação do material cerâmico.

Para cerâmicas estruturais, a retração linear de queima não deve exceder 6% (SOUZA SANTOS, 1989). Uma alta retração pode resultar em um empenamento ou não-uniformidade da peça cerâmica, devido à elevada densificação, podendo gerar falhas no material e comprometendo sua aplicação. Todas as formulações possuem valores dentro da faixa determinada pela referência.

5.2.3. Absorção de água (AA)

A Figura 14 apresenta as curvas de absorção de água das formulações em função da temperatura.

Figura 14 – Absorção de água das formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS



Fonte: (AUTOR, 2016)

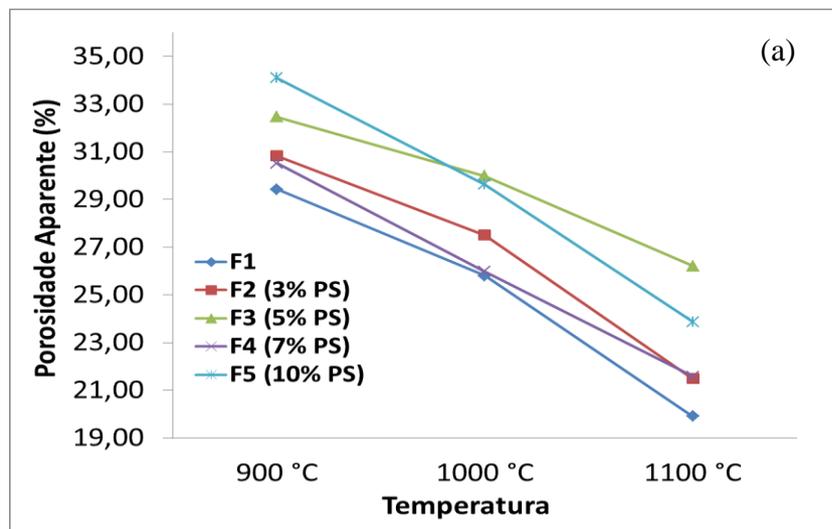
Esta propriedade está diretamente ligada à quantidade de poros dos corpos cerâmicos e se relaciona com a temperatura de maneira inversa, observando-se a diminuição de seus valores para cada formulação, tanto antes quanto depois do processo de separação magnética do rejeito. No primeiro caso, todas as formulações que possuíam o PDS obtiveram valores acima da formulação de referência (apenas a F4 teve um valor praticamente igual a 1000°C). No segundo caso, devido a uma maior densificação e retração dos corpos de prova, a diminuição da absorção de água entre 1000 e 1100°C se deu de forma bem acentuada, passando a ter valores menores do que F1.

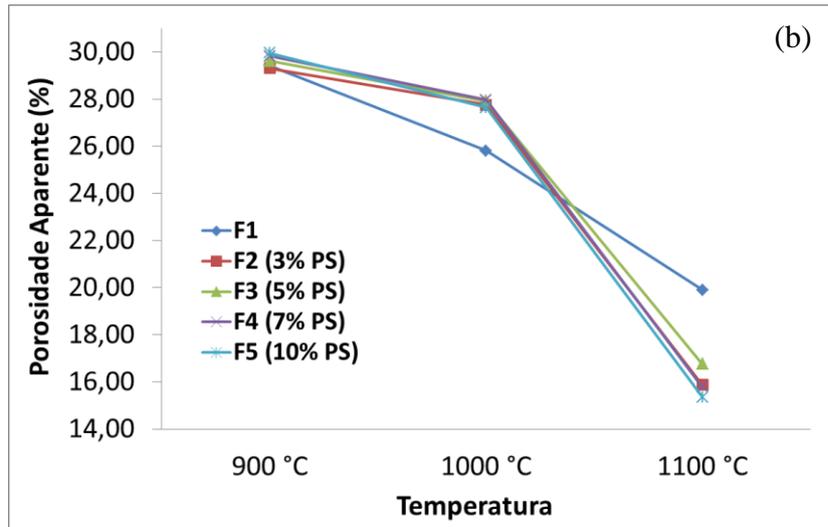
De acordo com a norma ABNT NBR 15270-1:2005 os valores de AA não podem exceder 20% para a fabricação de telhas e devem estar na faixa entre 8 e 22% para a fabricação de blocos cerâmicos. A ANFACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica) classifica os produtos cerâmicos de acordo com o percentual de absorção de água da seguinte maneira: $AA < 3\%$ = Grês; $3\% < AA < 6\%$ = Semi-grês; $6\% < AA < 10\%$ = Semi-poroso; $AA > 10\%$ = poroso. No 1º gráfico, a F1, sinterizada a 1100°C e no 2º gráfico todas as formulações, sinterizadas na mesma faixa de temperatura, possuem uma classificação de semi-porosa, com as demais enquadrando-se na região porosa. De acordo com a norma, para o 1º gráfico, todas as formulações (antes da separação magnética do rejeito) estão na faixa aceitável para seu uso tanto na fabricação de telhas quanto de blocos e para o 2º gráfico todas as que tiveram a presença do rejeito, sinterizadas a 1100°C obtiveram valores abaixo do valor mínimo exigido.

5.2.4. Porosidade aparente (PA)

A Figura 15 apresenta as curvas de absorção de água das formulações em função da temperatura.

Figura 15 – Porosidade aparente das formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS





Fonte: (AUTOR, 2016)

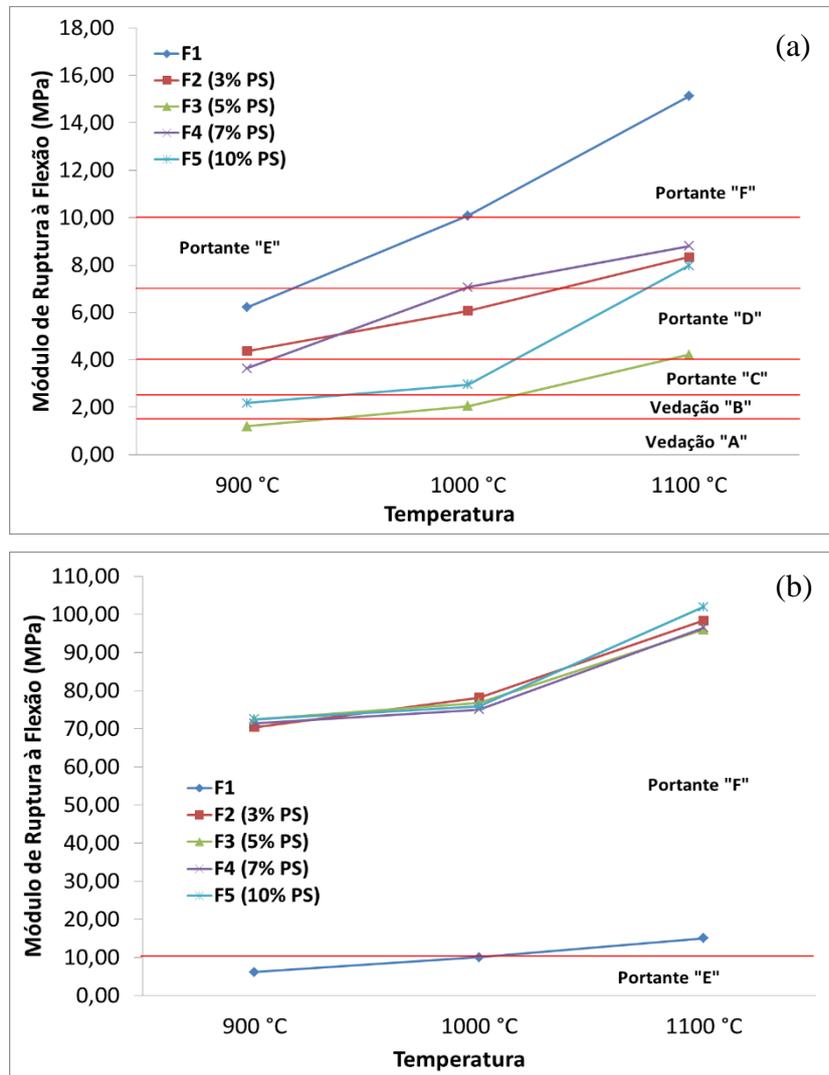
Há uma semelhança entre esta propriedade e a propriedade analisada no tópico anterior no que diz respeito ao comportamento de todas as formulações, tanto antes quanto depois do processo de separação magnética, visto que ambas estão intimamente ligadas. Materiais cerâmicos que possuem pouca quantidade de poros absorvem menos água e possuem maiores valores de resistência mecânica. Observa-se também que, ao se retirar o excesso de hematita (Fe_2O_3) as formulações tenderam a diminuir a quantidade de poros, atingindo valores menores do que as da formulação de referência a 1100°C.

A porosidade para materiais cerâmicos deve se encontrar nas faixas entre 14 a 35%. Esses valores são os mesmos, tanto para a fabricação de blocos cerâmicos, quanto para telhas (SOUZA SANTOS, 1989). Com isso percebe-se que todas as formulações atendem a este requisito, podendo ser utilizadas para a produção destes materiais.

5.2.5. Módulo de ruptura à flexão (MRF)

A Figura 16 apresenta as curvas do módulo de ruptura à flexão das formulações em função da temperatura.

Figura 16 – Módulo de ruptura à flexão das formulações antes (a) e depois (b) do processo separação magnética do PDS



Fonte: (AUTOR, 2016)

O módulo de ruptura à flexão (MRF) é outra propriedade que aumenta de acordo com o aumento de temperatura. Isso é apresentado nos gráficos anteriores, nos quais todas as formulações apresentaram um aumento desta propriedade. No gráfico da Figura 6.a, nenhuma formulação apresentou valores iguais ou superiores aos da formulação inicial; no entanto, após o processo de separação magnética, a evolução dos valores desta propriedade para as mesmas formulações se apresentou de maneira tal que observou-se uma significável diferença entre elas e a F1 (Figura 6.b).

Em estudo realizado por Da Silva *et al* (2014), utilizando 3 rejeitos a base de minério de ferro, processados e tratados por dois diferentes métodos (um deles sendo a separação

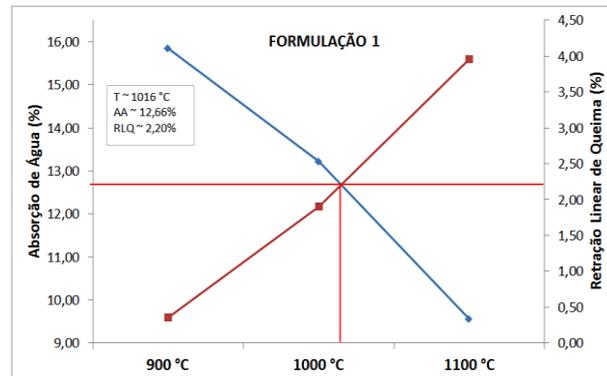
magnética), apontou que altas concentrações de óxidos ferrosos implicam em uma menor aplicabilidade do rejeito em cerâmica vermelha, uma vez que variações em sua estrutura – hexagonal, podendo também se apresentar na forma romboédrica e octaédrica – criam distorções e surgimento de micro defeitos no interior da peça cerâmica e diminuem, portanto, a sua resistência mecânica. Rejeitos com menores concentrações de tais óxidos possuem maiores valores desta propriedade. Comportamento semelhante foi observado no presente trabalho, o que vem a confirmar o efeito observado de melhoria nas propriedades tecnológicas em resposta ao menor teor de óxidos de ferro nas matérias primas.

A classificação dos tijolos em relação à sua resistência, de acordo com a norma NBR7171/83, mostra que, para o gráfico “ANTES” e a partir da T1, as formulações F2 (3% PDS) e F4 (7% PDS) apresentaram valores aceitáveis para serem utilizados na confecção de blocos portantes, que são aqueles que, além de exercerem a função da vedação, também são destinados à execução de paredes que constituirão a estrutura resistente da edificação, podendo substituir pilares e vigas de concreto (MENDES, 2013). Porém, não atendem a especificação da norma NBR6462/87, que exige uma resistência de no mínimo 12,74 MPa (130 Kgf/cm²) para telhas. Com a retirada do excesso de hematita, as formulações já passam a atender as normas.

5.2.6. Curvas de gresificação

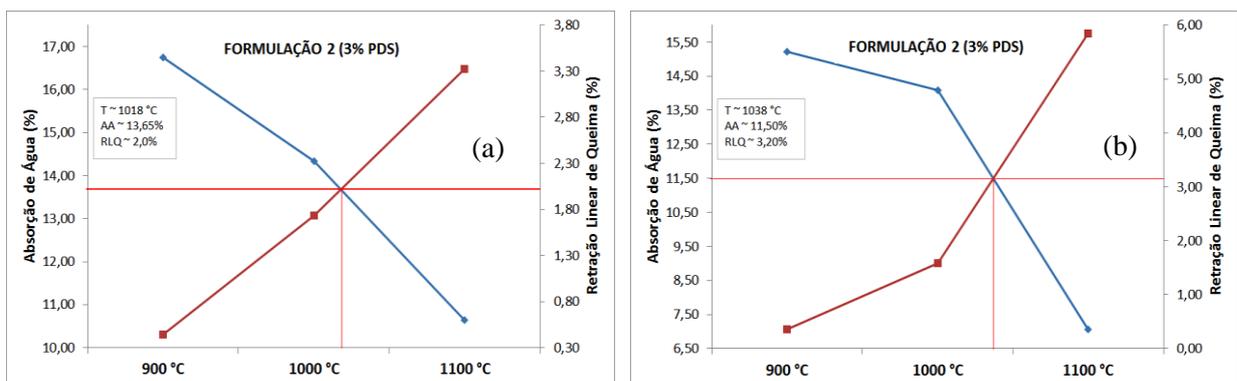
Os gráficos apresentados a seguir foram traçados de modo a encontrar a curva de gresificação para cada formulação estudada, tanto antes quanto depois do processo de separação magnética. Apenas a formulação inicial (F1) possui apenas 1 curva de gresificação. As curvas de gresificação representam graficamente as variações da retração linear e absorção de água dos corpos de prova após serem sinterizados. Através deste gráfico é possível localizar em qual faixa de temperatura o material vai obter melhores propriedades, as condições de processamento e as tolerâncias da massa cerâmica às mudanças de temperatura (FREITAS, 2016).

Figura 17 – Curva de gresificação para a formulação inicial (apenas argila)



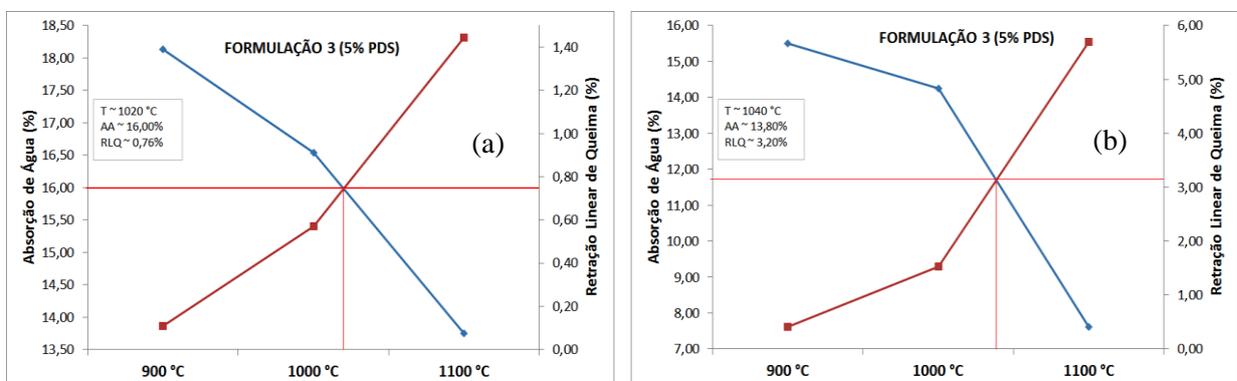
Fonte: (AUTOR, 2016)

Figura 18 – Curva de gresificação para a formulação 2 antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética



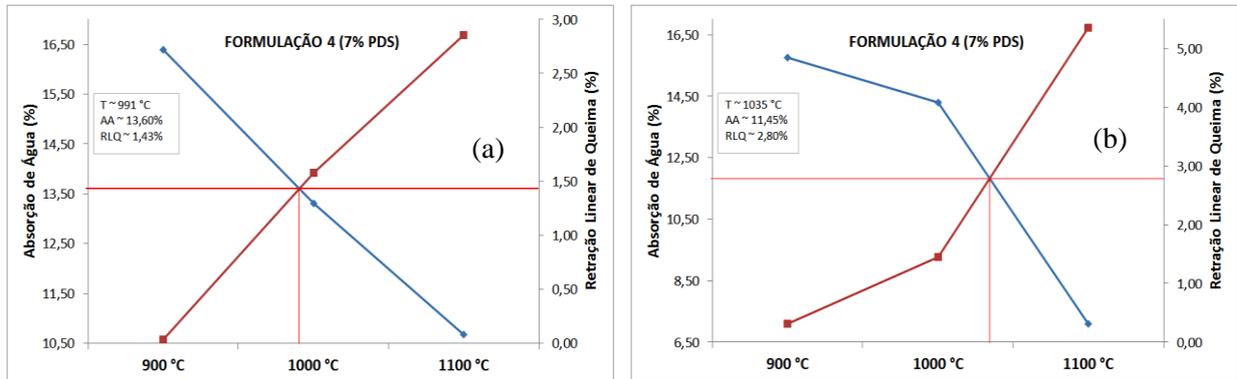
Fonte: (AUTOR, 2016)

Figura 19 – Curva de gresificação para a formulação 3 antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética



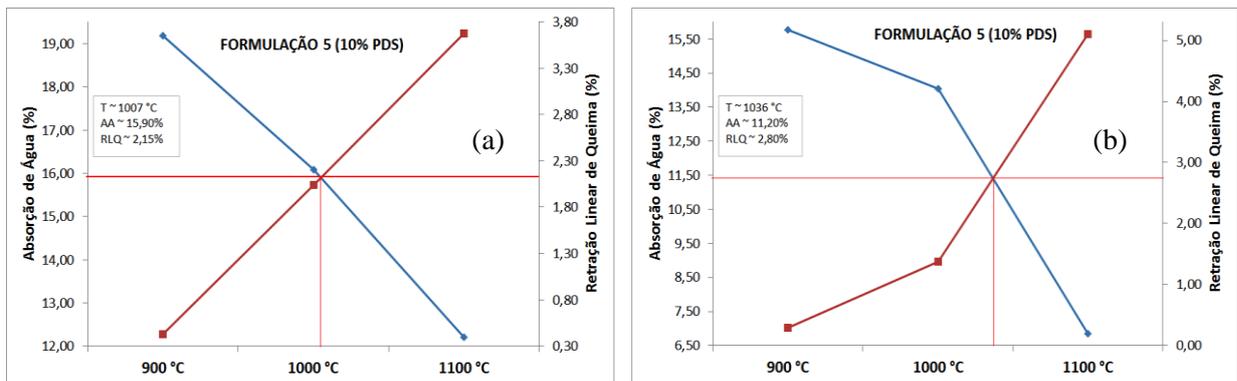
Fonte: (AUTOR, 2016)

Figura 20 – Curva de gresificação para a formulação 4 antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética



Fonte: (AUTOR, 2016)

Figura 21 – Curva de gresificação para a formulação 5 antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética



Fonte: (AUTOR, 2016)

A Tabela 4 apresenta todos os pontos de gresificação, havendo uma diferenciação entre os maiores e menores valores dos parâmetros (temperatura, absorção de água e retração linear de queima).

Tabela 4 – Comparação entre os resultados das curvas de gresificação de todas as formulações

AMOSTRAS	TEMP (°C)		AA (%)		RLQ (%)	
	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS
F1 (0% PDS)	1016	-----	12,66	-----	2,20	-----
F2 (3% PDS)	1018	1038	13,65	11,50	2,00	3,20
F3 (5% PDS)	1020	1040	16,00	13,80	0,76	3,20
F4 (7% PDS)	991	1035	13,60	11,45	1,43	2,80
F5 (10% PDS)	1007	1036	15,90	11,20	2,15	2,80

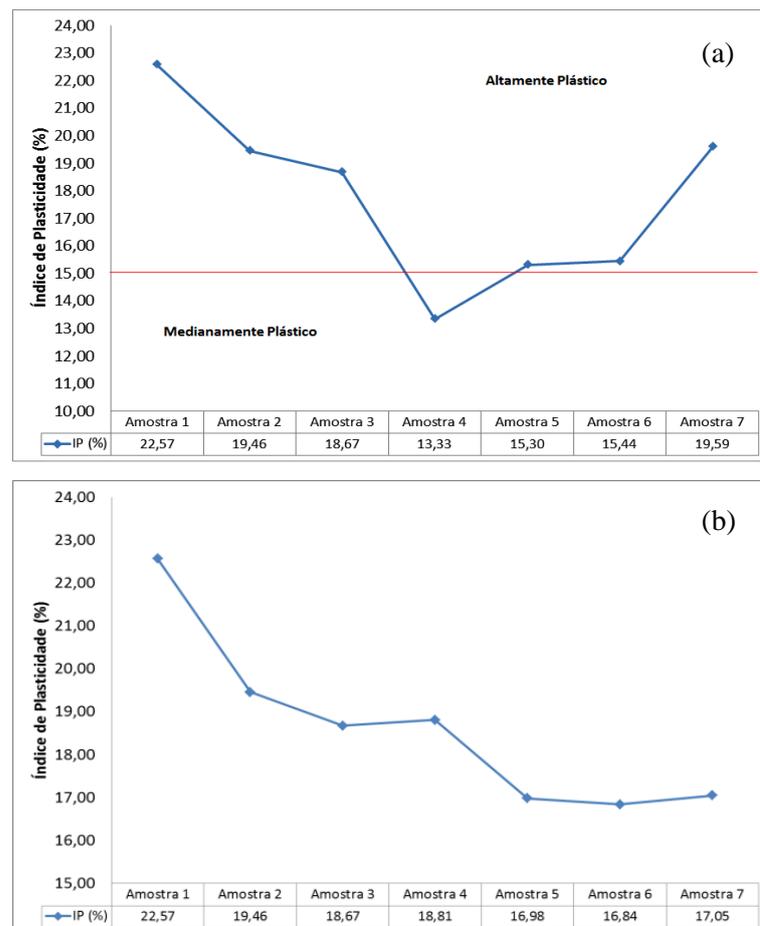
Fonte: (AUTOR, 2016)

Os valores de temperatura ideal para haver simultaneamente uma menor absorção de água e uma maior retração das formulações cerâmicas são maiores para aquelas nas quais o rejeito sofreu o processo de separação magnética. Isso implica em um maior gasto de energia, gerando relativamente maior custo para a produção. No entanto, os valores de absorção são menores e os de retração são maiores do que as formulações que levam o rejeito sem o processo de separação, o que requer uma análise mais cautelosa no quesito custo-benefício.

5.2.7. Índice de plasticidade (IP)

A Figura 22 apresenta a curva do índice de plasticidade, antes e depois do processo de separação magnética em função das amostras.

Figura 22 – Índice de plasticidade de todas as formulações antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS



Fonte: (AUTOR, 2016)

Todas as amostras foram classificadas de acordo com Papini (2013), que separa as argilas em fracamente plásticas ($IP < 7\%$), medianamente plásticas (IP entre 7 e 15%) e altamente plásticas ($IP > 15\%$). Para o gráfico da Figura 12.a, a amostra A1 mostrou um maior valor dentre as demais pelo fato de ser constituída apenas por argila gorda. A partir do momento que se adiciona o PDS (amostras 4 até 7) o IP diminui consideravelmente na A4, mas passa a aumentar consideravelmente, atingindo na A7 um valor maior do que a A2, que possui apenas argila magra. Apesar de possuir menor plasticidade que as demais, A4 possui ainda valores medianos dessa propriedade. No gráfico da Figura 12.b, a amostra A4 possui um valor aproximado da A3 (50% de argila gorda e magra) e a partir do aumento do teor de rejeito, passa a diminuir o IP da A4 para a A5 e passa a se manter praticamente constante a partir deste ponto. Porém todas as formulações possuem níveis relativamente altos desta propriedade.

Segundo Souza Santos (1989), são as seguintes condições para uma argila apresentar plasticidade: a) a plasticidade de minerais finamente moídos em presença de água é devida à presença de filmes estáveis de água na superfície das partículas; b) minerais com clivagens definidas têm maior plasticidade do que os que não as têm pois as superfícies clivadas facilitam a orientação das moléculas de água, sendo os minerais de morfologia lamelar mais plásticos do que os que têm clivagem perfeita em outro hábito cristalino; c) os argilominerais são os mais plásticos dos minerais de morfologia lamelar. A hematita, de acordo com sua morfologia, pode ser granular, lobular, martita, microcristalina e lamelar (FONTES, 2013). Esta última é a que confere maior plasticidade às argilas e que pôde ter influenciado no aumento desta propriedade, observada no gráfico da esquerda. Com a sua retirada, os valores de IP tenderam a diminuir, mas continuaram acima da faixa de alta plasticidade devido à presença dos demais argilominerais que contribuem para esta propriedade.

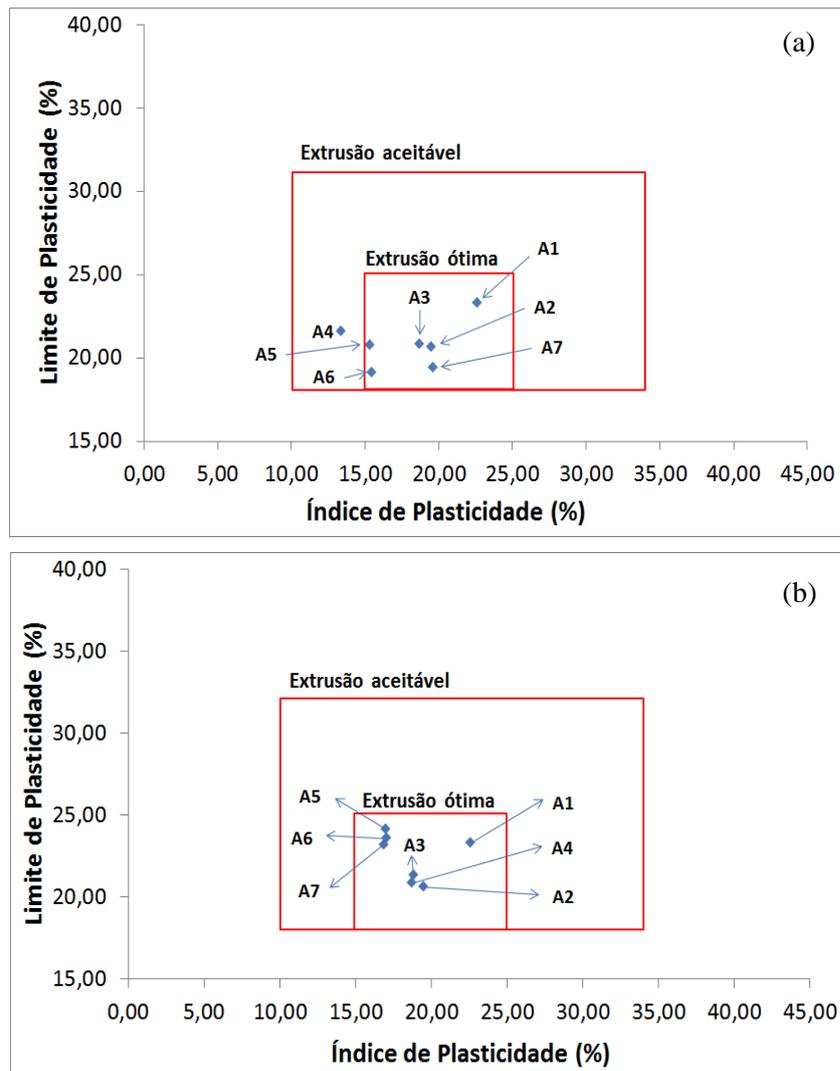
Outros fatores que influenciam na plasticidade das massas cerâmicas são a relação entre as argilas gorda e magra, a quantidade de água utilizada, a granulometria das partículas e a forma dos cristais. A presença de matéria orgânica também aumenta a plasticidade, pois funciona como uma “cola”, promovendo a aderência entre as partículas e aumentando a coesão após secagem (GRUN *et al.*, 2005).

5.2.8. Zonas de extrusão (ZE)

A Figura 23 apresenta as zonas de extrusão em que ficaram localizadas as amostras tanto antes quanto depois do processo de separação magnética.

Como foi afirmado anteriormente, para uma extrusão aceitável a amostra deve apresentar IP entre 10 e 34% e LP entre 18 e 31%. No entanto, para uma extrusão ótima os valores para IP devem estar entre 15 e 25% e os de LP entre 18 e 25%.

Figura 23 – Zonas de extrusão antes (a) e depois (b) do processo de separação magnética do PDS, mostrando a localização de todas as formulações



Fonte: (AUTOR, 2016)

De acordo com o gráfico da Figura 21.a, das sete amostras analisadas, seis estiveram dentro da zona de extrusão ótima (as mesmas amostras que apresentaram IP acima de 15%) e uma dentro da aceitável (A4), que foi a única que apresentou IP abaixo de 15%. Após o processo de separação magnética, todas as amostras passaram a ficar dentro da zona de extrusão ótima, mostrando uma evolução das formulações quanto a este quesito. Isto mostra que todas as

amostras que possuem o rejeito podem ser utilizadas no processo de extrusão para a fabricação de cerâmicas estruturais a verde, pois possuem ótimos níveis de plasticidade.

A Tabela 5 compara, de uma maneira geral, os resultados dos ensaios tecnológicos realizados, separando os valores inferiores das propriedades (vermelho). Nota-se que a separação magnética da hematita torna-se algo positivo para o seu emprego na indústria cerâmica, uma vez que a maioria dos resultados depois do processo são superiores em todas as principais propriedades analisadas.

Tabela 5 – Quadro geral comparativo entre os resultados dos ensaios tecnológicos realizados antes e depois do processo de separação magnética do rejeito utilizado

AMOSTRAS	TEMP (°C)	DA (g/cm ³)		RLQ (%)		PA (%)		AA (%)		MRF (MPa)		IP (%)*	
		ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS
F1 (0% PDS)	900	1,86		0,36		29,42		15,84		6,22			
	1000	1,95		1,90		25,81		13,22		10,09		18,67	
	1100	2,08		3,96		19,91		9,56		15,13			
F2 (3% PDS)	900	1,84	1,93	0,45	0,35	30,82	29,31	16,75	15,22	4,37	70,43		
	1000	1,92	1,97	1,73	1,58	27,50	27,77	14,33	14,08	6,07	78,23	13,33	18,81
	1100	2,02	2,25	3,33	5,84	21,48	15,86	10,64	7,05	8,34	98,41		
F3 (5% PDS)	900	1,79	1,91	0,11	0,41	32,46	29,62	18,13	15,50	1,20	72,51		
	1000	1,81	1,96	0,57	1,53	29,98	27,92	16,54	14,25	2,05	76,78	15,30	16,98
	1100	1,91	2,20	1,44	5,70	26,21	16,76	13,75	7,62	4,22	96,03		
F4 (7% PDS)	900	1,86	1,89	0,03	0,32	30,52	29,82	16,39	15,75	3,65	71,46		
	1000	1,95	1,96	1,58	1,45	25,98	27,96	13,30	14,29	7,07	75,12	15,44	16,84
	1100	2,02	2,23	2,85	5,36	21,59	15,78	10,68	7,09	8,81	96,55		
F5 (10% PDS)	900	1,78	1,90	0,42	0,29	34,10	29,95	19,19	15,76	2,19	72,56		
	1000	1,84	1,97	2,04	1,38	29,63	27,64	16,08	14,04	2,96	76,01	19,59	17,05
	1100	1,96	2,24	3,68	5,10	23,87	15,35	12,21	6,86	7,98	102,05		

* O IP (Índice de Plasticidade) é realizado sem haver a sinterização das formulações

Fonte: (AUTOR, 2016)

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, observou-se que todas as propriedades analisadas, sobretudo a retração linear de queima, absorção de água e resistência mecânica, que são primordiais na avaliação da aplicabilidade do rejeito siderúrgico na fabricação de cerâmicas estruturais, tiveram significativa evolução de seus valores.

O processo de separação magnética ao qual o rejeito foi submetido foi o principal responsável por tal evolução, pois com a diminuição significativa no teor de óxido de ferro, ocorreu a concentração dos demais óxidos, que acabaram contribuindo para uma maior coesão entre as partículas e aumento nos valores das propriedades.

Apesar de inicialmente possuir um teor bastante elevado de óxido de ferro, o pó de sinterização, adicionado em pequenas quantidades, apresentou resultados dentro dos padrões exigidos pelas normas, o que o torna, de certa forma, viável para a fabricação de cerâmicas estruturais. Os valores de plasticidade, também com a adição do rejeito, foram bastante interessantes, com as formulações mantendo-se na faixa de média para alta e ficando dentro das zonas de extrusão aceitável e ótima para a fabricação de produtos cerâmicos.

Conclui-se então que os produtos cerâmicos obtidos a partir das formulações trabalhadas, apresentam as especificações necessárias por norma para a aplicação em telhas e blocos cerâmicos, sendo necessário apenas a utilização de temperaturas abaixo de 1100 °C por uma questão de haver uma melhor relação entre a absorção de água e retração linear de queima (ponto de gresificação) além de representar uma maior economia de energia utilizada no processo de fabricação.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a viabilidade da utilização do pó de sinterização siderúrgica em outra rota tecnológica e valor das propriedades levadas em consideração;
- Dentro do campo dos produtos cerâmicos, utilizar outros métodos para separar ou concentrar óxidos de interesse, presentes no rejeito siderúrgico e comparar tais métodos, em busca do mais viável;
- Variar os teores de argila magra e gorda nas massas cerâmicas, objetivando observar o comportamento do rejeito e suas influências no produto final;
- Avaliar a possibilidade de reutilização do óxido de ferro concentrado, oriundo da separação magnética do rejeito, dentro das unidades de produção da siderúrgica, sobretudo na aciaria.
- Avaliar as microestruturas das amostras para se verificar as mudanças estruturais decorrentes da incorporação do rejeito.

REFERÊNCIAS

- [1] SOUZA, C. C. *et al.* **Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro.** Revista Matéria, v. 13, nº 1, pp. 194 – 202, 2008.
- [2] SOUZA, C. C. **Efeito da Incorporação de Resíduo de Minério de Ferro nas Propriedades e na Microestrutura de Cerâmica Argilosa do Município de Campos dos Goytacazes.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2007.
- [3] AMOURY NETO, J. S. *et al.* **Avaliação das Propriedades Cerâmicas de Blocos Estruturais Produzidos com a Incorporação de Rejeito de Ferro e com Matérias Primas da Região Sudeste do Pará.** Artigo apresentado no 21º - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Cuiabá, 2014.
- [4] SILVA, J. N. S. **Siderurgia.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Escola Técnica Aberta do Brasil. Apostila. 110 folhas. 2011. Pg 22. Disponível em: <http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/siderurgia.pdf> Acesso em 07 de junho de 2016.
- [5] SANTOS, D. M. S. *et al.* **Estudo das propriedades físico-mecânicas de cerâmicas argilosas incorporadas com pó de despoeiramento e sua viabilidade na fabricação de peças para alvenaria.** Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Instituto de Geociências e Engenharias. Faculdade de Engenharia de Materiais. Marabá, 2015.
- [6] LEGGERINI, M. R. C. **Materiais Cerâmicos.** Disponível em: <http://www.feng.pucrs.br/professores/mregina/ARQUITETURA_Materiais_Tecnicas_e_Estruturas_I/estruturas_i_capitulo_II_materiais_ceramicos.pdf>. Acesso em 5 de julho de 2016.
- [7] GRUN, E. **Caracterização de argilas provenientes de canelinha/sc e estudo de formulações de massas cerâmicas.** Universidade do Estado de Santa Catarina. Centro de Ciências Tecnológicas. Departamento de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Joinville, 2005.
- [8] Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações Técnicas – Matérias-primas naturais.** Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=47>>. Acesso em 07 de junho de 2016.
- [9] ARAÚJO, N. C. *et al.* **Propriedades Mecânicas de Tijolos Fabricados com Solo e Água Residuária de Mandioca.** Revista Verde (Pombal - PB - Brasil) v. 10, n.2, p. 213 – 217, abr-jun, 2015.

- [10] FACINCANI, E. **Tecnologia cerâmica**. 2 ed. Itália: Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 1992.
- [11] CONCEIÇÃO FILHO, V.M.; MOREIRA, M.D. **Depósitos de argila do Recôncavo Baiano – geologia e potencialidade econômica**. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. CBPM, Série Arquivos Abertos, 15. 46p. Salvador, 2001.
- [12] ROCHA, R. R. **Propriedades Químico-Mineralógicas e Cerâmicas de Rochas da Formação Corumbataí: Aplicação na Diversificação de Produtos**. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2012.
- [13] MOTTA, J. F. M. *et al.* **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos**. Cerâmica Industrial, V. 6, nº 2, Março/Abril, 2001.
- [14] Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações Técnicas – Processos de Fabricação**. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=50>>. Acesso em 02 de junho de 2016.
- [15] OLIVEIRA, A. P. N. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. Revista Cerâmica Industrial, v. 5, n, 6, p. 37-47, nov/dez, 2000.
- [16] HECK, C. **Gres porcelanato**. Revista Cerâmica Industrial, v. 1, n. 4/5, ago/dez, 1996.
- [17] BRISTOT, V. M. **Máquinas e equipamentos para cerâmica**. Criciúma: Luana, 1996.
- [18] NAVARRO, J. E. *et al.* **Tecnologia cerâmica**. Valencia: Instituto de Química Técnica Universidad de Valencia, [s.n.]. V.2: Pastas ceramicas.
- [19] RIBEIRO, M. J. *et al.* **A atomização como processo de obtenção de pós para a indústria cerâmica**. Revista Cerâmica Industrial, v.6, n.5, set/out, 2001.
- [20] MOTTA, J. F. M. *et al.* **As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional**. Revista Cerâmica Industrial, v. 7, n. 1, p. 33-40, jan/fev, 2002.
- [21] VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. Tradução: Luiz Paulo Camargo Ferrão. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.
- [22] JÚNIOR M. C.; MOTTA, J. F. M.; ALMEIDA, A. S. TANNO, L. C.*et al.* **Argila para cerâmica vermelha**. Centro de Tecnologia Mineral. 2005.
- [23] SAMPAIO, J. A *et al.* **Ensaio de separação magnética e eletrostáticas**. Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/1063/Cap%2018%20Separa%C3%A7%C3%A3o%20Magn%C3%A9tica%20NOVO.pdf?sequence=1>>. Acesso em 08 de junho de 2016.

- [24] PAES SANTOS, C. V.; SILVA, A. R.; GUIMARÃES FILHO, M. A. S.; FAGURY NETO, E.; RABELO, A. A. **Índice de Plasticidade e Análise Racional de Argilas de Marabá (PA) para Avaliação das Zonas de Extrusão**. Revista Cerâmica Industrial, nº 17, V. 2, pg 25 – 27, Mar/Abr, 2012.
- [25] SEBRAE. **Construção Civil**. Disponível em: <[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/\\$File/5846.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf)>. Acesso em 08 de junho de 2016.
- [26] SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia de argilas**. Vol. 1. 2ª ed. 408 p. Edgard Blücher: São Paulo, 1989.
- [27] FREITAS, M. C. **Influência da incorporação do rejeito de minério de ferro de carajás em formulações de cerâmica estrutural**. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Instituto de Geociências e Engenharias. Faculdade de Engenharia de Materiais. Marabá, 2016.
- [28] SOBRINHO, P. J. N.; TENÓRIO, J. A. S. **Geração de Resíduos Durante o Processo de Fabricação de Ferro e Aço**. In: Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 55, 2000, Rio de Janeiro, **Anais**: Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2000. p. 2607-2617.
- [29] CUNHA, A. F.; ARAÚJO FILHO, G.; MARTINS JÚNIOR, A.; GOMES, O. C. B.; ASSIS, P. S. **Aspectos técnicos da utilização da carepa gerada em processos siderúrgicos e tratada por desagregação ultrassônica**. Universidade Federal de Ouro Preto. Publicado na Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v. 3, nº 2, pg 1–5. São Paulo, 2006.
- [30] TAKANO, C. *et al.* **A reciclagem de resíduos siderúrgicos sólidos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2000.
- [31] RIBEIRO, M. M. **Material particulado da planta de sinterização de usina siderúrgica integrada em composição de massa de cerâmica vermelha**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Tese de doutorado. Campo dos Goytacazes, 2010.
- [32] MOURÃO, M. B. **Siderurgia para não Siderurgistas**. São Paulo: ABM, 2004. National Geographic Society. Atlas: Brasil. Abril Coleções 2ª Ed, v. 2, 2008.
- [33] NAVARRO, F. J. L. *et al.* **Depuración de los gases de combustión em la industria cerámica**. 2ª edição. Castellón: Instituto de Tecnologia Cerâmica, 2001. p. 240.
- [34] CHAVES, L. F. M. **Estudo da adição do resíduo proveniente da extração de minério de ferro em argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 170 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Natal, 2009.

- [35] REIS, J. P. **Incorporação de resíduos industriais em massa cerâmica usada na fabricação de tijolos**. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Joinville, 2007.
- [36] MENEZES, R. R.; NEVES, G.A; FERREIRA, H.C. **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6. n. 2, p. 303-313. DEAg/UFCG: 2002.
- [37] THURLER, L. M., SOUZA, G. P. e HOLANDA, J. N. F. **Avaliação do Módulo de Weibull para argilas de Campos/RJ**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 43, Florianópolis/SC, 1999. Anais: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 1999, p.11401-11408.
- [38] SOUZA, C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. **Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com resíduo de minério de ferro**. Revista Matéria. V. 3, nº 1, pp.194-202, 2008.
- [39] VIEIRA, C. M. F. et al. **Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com resíduo de minério de ferro**. In: Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 62, 2007, Vitória/ES. Anais: Congresso Anual da ABM, 2007, p.493-500.
- [40] SOUZA, C. C. **Efeito da incorporação de resíduo de minério de ferro nas propriedades e na microestrutura de cerâmica argilosa do município de Campos dos Goytacazes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, p.76, 2007.
- [41] BASTOS, C. **Plasticidade dos Solos**. Disponível em: <<ftp://ftp.ifes.edu.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Apostila%20FURG%20Solos/05.4%20-%20PLASTICIDADE.pdf>>. Acesso em 09 de junho de 2016.
- [42] DA SILVA, F. L.; ARAÚJO, F. G. S.; TEIXEIRA, M. P.; GOMES, R. C.; VON KRUGER, F. L. **Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic**. Ceramics International, 40, pg 16085-16089, Mai/Jun, 2014.
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1 – Componentes cerâmicos Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos**. Válida a partir de 30 de setembro de 2005.
- [44] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2 – Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e requisitos**. Válida a partir de 30 de setembro de 2005.

- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-3 – Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Terminologia e requisitos.** Válida a partir de 30 de setembro de 2005.
- [46] MENDES, T. R. S. **Estudo da exploração da argila para material cerâmico na Construção civil no município de Limoeiro Do Norte – Ce.** Universidade Federal Rural do Semiárido – Departamento de Ambientais e Tecnológicas. Mossoró, 2013.
- [47] FONTES, A. V.; NEUMANN, R.; TAVARES, L. M.; GOMES, O. F. M.; GALLART, R. **Caracterização tecnológica de um minério de ferro especularítico.** Apresentado ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro. Belo Horizonte, 2014.
- [48] Papini, C. A. **Materiais de construção civil: materiais cerâmicos.** Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/AquilesCampagnaro/cermicas-26467332>> Acesso em 14, out. 2015.
- [49] AMORIM, F.R. **Co-processamento de Dregs em Argila para produção de Cerâmica Vermelha.** 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.) Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: 2007.
- [50] RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos siderúrgicos.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- [51] BARRETO NETO, A. A. **Equipamentos de controle de poluição atmosférica.** Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e ambiental. Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo. Disponível em: <<http://www.cefetes.br>>. Acesso em 09 de junho de 2016.