

Universidade de Ribeirão Preto
Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental

FABIO PIMENTA ESPER KALLAS

**VALORIZAÇÃO DA ESCÓRIA GERADA NA PRODUÇÃO DE NÍQUEL
COMO MATÉRIA-PRIMA PARA PRODUÇÃO DE TELHAS
CERÂMICAS**

RIBEIRÃO PRETO - SP
2015

FABIO PIMENTA ESPER KALLAS

**VALORIZAÇÃO DA ESCÓRIA GERADA NA PRODUÇÃO DE NÍQUEL
COMO MATÉRIA-PRIMA PARA PRODUÇÃO DE TELHAS
CERÂMICAS**

Trabalho Acadêmico apresentado à
Universidade de Ribeirão Preto, ao curso
de Tecnologia Ambiental, como requisito
para a obtenção do título de Mestre em
Tecnologia Ambiental.

Professor Orientador:
Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini

**RIBEIRÃO PRETO - SP
2015**

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento Técnico da Biblioteca
Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

K14v Kallas, Fabio Pimenta Esper, 1957-
Valorização da escória gerada na produção de níquel como
matéria prima para produção de telhas cerâmicas / Fabio Pimenta
Esper Kallas. -- Ribeirão Preto, 2015.
177 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini.

Dissertação (mestrado) - universidade de Ribeirão Preto,
UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2015.

1. Propriedades tecnológicas. 2. Níquel. 3. Massa cerâmica.
I. Título.

CDD 628

Fábio Pimenta Esper Kallas

“Valorização Da Escória Gerada Na Produção De Níquel Como Matéria-
Prima Para Produção De Telhas Ceramicas”.

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo programa de Mestrado Profissionalizante em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

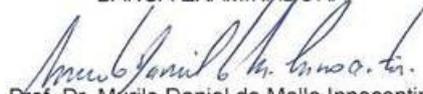
Orientador: Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

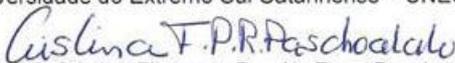
Data de defesa: 29 de setembro de 2015

Resultado: APROVADO

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini
Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP
Presidente


Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo
Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC


Prof. Dr. Cristina Filomena Pereira Rosa Paschoalato
Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP

Ribeirão Preto
2015

DEDICATÓRIA

Aos meus amores
Cibele, Julia e Karina

AGRADECIMENTOS

Não seria possível vencer este desafio se não fosse o apoio de meus amigos/irmãos Manoel, Rui, Matheus e Sergio. Sempre serão personagens principais em minha história de vida. A todos eles, meu reconhecimento e minha eterna amizade.

Agradeço à equipe do Laboratório de Materiais da FESP/UEMG, comandada pelo Prof Ivan, pela ajuda na composição das misturas planejadas, e ao Moacir pelas inúmeras vezes que buscou e levou material para que este trabalho fosse realizado ao longo destes anos.

À equipe do Laboratório de Solos, da FESP/UEMG, liderada pelo Prof. Fernando Spadon, na solução dos procedimentos para a realização dos ensaios de absorção de umidade dos corpos-de-prova. Neste, especialmente ao Edinho pelo apoio sempre que solicitado.

Agradeço aos professores da UNAERP pela dedicação a cada um de nós, colocando todo seu conhecimento à nossa disposição para que pudéssemos desenvolver um trabalho aplicável em nossa região.

Agradeço ao SENAI-BH, com sua equipe, pela atenção disponibilizada na elaboração dos corpos-de-prova com as diversas misturas para o desenvolvimento deste trabalho.

É necessário agradecer à empresa Mineradora Morro Azul, de Pratápolis/MG, pela disponibilidade de material para o trabalho e pelas informações sempre imediatamente disponibilizadas.

À cerâmica Avante, de Capitólio/MG, ao Sebastião e ao Bezinho, por colocar a estrutura da cerâmica para a queima dos corpos-de-prova deste trabalho e disponibilizar matéria-prima para os ensaios em todas as solicitações realizadas.

Agradeço ao Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo da Universidade do Extremo Sul Catarinense/SC, pela forma com que se dispôs a nos ajudar, pela prontidão em vir à Ribeirão Preto avaliar o trabalho e pela disponibilidade em coorientar este trabalho.

Especialmente, agradeço ao Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini pela forma com que me ajudou a construir este trabalho. Passo a passo, avaliando detalhes, sempre disponível, numa condução primorosa, motivando e corrigindo caminhos. Fica em mim, o orgulho enorme de tê-lo como orientador, e a expectativa de poder encontrá-lo muitas outras vezes pela vida.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o estudo da incorporação de um resíduo proveniente de uma mineradora de níquel à massa cerâmica de uma indústria de tijolos e telhas, ambas da região Sudoeste do Brasil. Utilizou-se a escória de níquel, estocada no pátio da mineradora ao longo dos anos e que até então não tinha uma proposta de destinação mais nobre ou de reutilização. Procurou-se uma forma de melhorar as propriedades de produtos que são intensamente utilizados na construção civil, como as telhas. Foram feitos ensaios de adição em percentuais distintos de escória à massa cerâmica e buscou-se a melhor composição para que as características do produto final, especificamente da telha, pudessem ter um ganho de qualidade. A queima dos corpos-de-prova foi viabilizada em ambiente laboratorial e ao final, com o percentual ideal, foi repetido na própria indústria cerâmica, utilizando seus processos e equipamentos, contribuindo para sugerir uma melhor rota de queima, possibilitando complementarmente uma economia energética. Com base nos resultados, ficou demonstrado que a adição de escória de níquel à massa cerâmica melhorou a densidade aparente, a resistência mecânica, a impermeabilidade e reduziu a retração linear proporcionando maior estabilidade dimensional das telhas. O aumento da resistência mecânica é atribuído à sinterização do resíduo de escória nas altas temperaturas de queima utilizada no processo de fabricação de telhas, mantendo as outras características recomendadas pela ABNT.

Palavras-chaves: Níquel; escória de níquel; massa cerâmica vermelha; telhas; propriedades tecnológicas.

ABSTRACT

The aim of this work was the study of the incorporation of a residue from a nickel mining company to the clay mass of an industry of bricks and tiles, both from the South West region of Brazil. The waste used was the nickel slag, stored in the yard of the mining company over the years and that until then did not have a proposal for better allocation or reutilization. The intention was the improvement of the properties of products that are extensively used in civil construction, such as tiles. Tests were carried out with the addition of different percentages of slag in the clay mass in order to find the composition that resulted in the best final properties of the product (tiles). The heat treatment of the samples was carried out in laboratory environment and at the end, with the ideal percentages, it was repeated in the ceramic industry, contributing to suggest a better burning route and to provide complementary energy savings. Based on the results, it was shown that the addition of nickel slag to the clay mass improved bulk density, mechanical strength, impermeability and also reduced linear shrinkage, providing increased dimensional stability of the tiles. The increase in mechanical strength is attributed to sintering of slag waste at high firing temperatures used in the manufacturing process of tiles, while maintaining the other characteristics recommended by the Brazilian National Standards Organization (ABNT).

Keywords: Nickel; nickel slag; red ceramic mass; tiles; technological properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	O Estado de Minas Gerais e a cidade de Pratápolis - Local de estudo	20
Figura 1.2	O condicionamento da escória na mineradora em estudo	21
Figura 3.1	Principais aplicações do níquel na indústria mundial	26
Figura 3.2	Uso do níquel na Indústria mundial	27
Figura 3.3	A variação do preço do níquel (t) no mercado mundial	30
Figura 3.4	A produção nacional de minério de níquel concentrado	31
Figura 3.5	A rota RKEF adotada na Mineradora Morro Azul	36
Figura 3.6	Depósito de escória da Mineradora de Barro Alto em Goiás	40
Figura 3.7	Caracterização e classificação de resíduos sólidos	46
Figura 3.8	Distribuição das indústrias cerâmicas por região (%)	57
Figura 3.9	As cerâmicas sindicalizadas distribuídas no Estado de Minas Gerais	62
Figura 3.10	Fluxograma do processo de fabricação de blocos e telhas cerâmicas	68
Figura 3.11	Detalhe da esteira para entrada das argilas misturadas	69
Figura 3.12	Detalhe do processo de desintegração da argila	69
Figura 3.13	Detalhe da mistura e laminação da argila	70
Figura 3.14	Detalhe da extrusão da argila em forma de tarugos cilíndricos	70
Figura 3.15	Detalhe da prensagem dos tarugos na forma da telha desejada	71
Figura 3.16	Detalhe da secagem das telhas para aguardar a queima	72
Figura 3.17	Detalhe dos fornos para queima das telhas e tijolos	73
Figura 3.18	Detalhe da estocagem das telhas após a queima	74
Figura 3.19	Detalhe do processo de envernizamento das telhas	74
Figura 3.20	Detalhe da estocagem final das telhas	75
Figura 3.21	Comprimentos útil e de fabricação de telha cerâmica	77
Figura 3.22	Larguras útil e de fabricação de telha cerâmica	77
Figura 3.23	Representação esquemática da retilinearidade das telhas	78
Figura 3.24	Representação esquemática da planaridade das telhas	78
Figura 4.1	Fluxograma do processo de fabricação atual de telhas cerâmicas.	93

Figura 4.2	Fluxograma do processo de fabricação proposto para telhas cerâmicas otimizadas	94
Figura 4.3	Fluxograma das ações do estudo de incorporação da escória em argila para produção de telhas cerâmicas otimizadas	95
Figura 4.4	A escória gerada na produção de níquel	97
Figura 4.5	Plasticímetro de indentação	101
Figura 4.6	Extrusão de corpo-de-prova.	104
Figura 4.7	Detalhes da extrusora usada no SENAI-BH, para geração dos corpos-de-prova	104
Figura 4.8	Corte dos corpos-de-prova no SENAI-BH, após extrusão das argilas	105
Figura 4.9	Detalhe da geração de corpos-de-prova de seção retangular	105
Figura 4.10	Detalhe da extrusão de argila com bocal cilíndrico	105
Figura 4.11	Detalhes do processo de prensagem da massa extrudada para geração dos corpos-de-prova em forma de bolacha	106
Figura 4.12	Geração de corpo-de-prova com boquilha retangular	106
Figura 4.13	Detalhes do ensaio de umidade das argilas da cerâmica em estudo	107
Figura 4.14	Detalhes dos corpos-de-prova em forno para análise de umidade pós extrusão	108
Figura 4.15	Detalhe do equipamento para análise de composição de metais na escória com espectrofotômetro de absorção atômica.	109
Figura 4.16	Detalhe de amostra para ensaio de solubilização da escória	110
Figura 4.17	Espectrofotômetro da UFSCar utilizado no ensaio de fluorescência de raios-X.	111
Figura 4.18	Fluxograma para destinação da escória na produção de telhas cerâmicas por processo de monoqueima	115
Figura 4.19	Detalhes dos corpos-de-prova imersos em água com vácuo	117
Figura 4.20	Detalhes dos corpos-de-prova para obtenção das massas úmida e imersa	117
Figura 4.21	Detalhes dos corpos-de-prova para obtenção da massa úmida.	118
Figura 4.22	Detalhe da prensa elétrica Universal de ensaios	118

Figura 4.23	Detalhes do ensaio de ruptura por flexão.	119
Figura 4.24	Detalhe de ensaio de compressão de corpo-de-prova.	120
Figura 4.25	Detalhes do ensaio de permeabilidade das amostras sinterizadas.	122
Figura 4.26	Corpos-de-prova para ensaio de permeabilidade.	123
Figura 4.27	Detalhes dos corpos-de-prova para obtenção do extrato lixiviado	123
Figura 5.1	Distribuição granulométrica da escória	125
Figura 5.2	Detalhe da análise de composição de metais na escória com equipamento de espectrofotometria de absorção atômica	126
Figura 5.3	Difratograma de raios-X da escória in natura	128
Figura 5.4	Difratograma de raios-X da escória após tratamento térmico	128
Figura 5.5	Componentes químicos da escória da mineradora em estudo	129
Figura 5.6	Retração Linear da escória em função da temperatura	130
Figura 5.7	Comportamento da escória de níquel em Análise Térmica Diferencial	131
Figura 5.8	Distribuição granulométrica da mistura das argilas feita em sedígrafo	132
Figura 5.9	A plasticidade das argilas Jacir, Mata Santa e Mutuca com percentuais diferentes de umidade	133
Figura 5.10	A plasticidade das misturas M1, M2 e M3 com percentuais diferentes de umidade	134
Figura 5.11	A plasticidade das misturas M4, M5 e M6 com percentuais diferentes de umidade	135
Figura 5.12	Curvas de sinterização das argilas individualizadas	136
Figura 5.13	Curvas de sinterização das misturas das argilas	137
Figura 5.14	Massa preparada de corpos-de-prova com percentuais variados de escória adicionada à mistura de argilas	138
Figura 5.15	Umidade das misturas das argilas pós extrusão	139
Figura 5.16	Curva de aquecimento do forno da cerâmica Avante quando da queima dos corpos-de-prova	139
Figura 5.17	Corpos-de-prova queimados na indústria cerâmica Avante	140
Figura 5.18	Densidade dos corpos-de-prova em função das diferentes composições	141

Figura 5.19	Densidade aparente dos corpos-de-prova em função das diferentes composições	141
Figura 5.20	Porosidade aparente dos corpos-de-prova em função das diferentes composições	142
Figura 5.21	Absorção de umidade dos corpos-de-prova em função das diferentes composições	142
Figura 5.22	A variação da tensão de ruptura à flexão dos corpos-de-prova em função das diferentes composições	144
Figura 5.23	Tensão de ruptura à compressão dos corpos-de-prova em função das diferentes composições	145
Figura 5.24	Módulo Young para os corpos-de-prova em função das diferentes composições	145
Figura 5.25	Permeabilidade dos corpos-de-prova de cada mistura proposta	147
Figura 5.26	Mapa de permeabilidade com localização das composições estudadas neste trabalho	148
Figura 7.1	Telhado com painéis de células fotovoltaicas	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	As reservas e a produção do níquel no mundo	28
Tabela 3.2	O consumo mundial de níquel	29
Tabela 3.3	Reservas brasileiras de níquel	31
Tabela 3.4	Dados sobre a cidade de Pratápolis - MG	34
Tabela 3.5	Caracterização do depósito mineral da área da mineradora	35
Tabela 3.6	Destinação atual da escória da mineradora Morro Azul	38
Tabela 3.7	Análises químicas por XRF	38
Tabela 3.8	Os subprodutos gerados na produção do níquel	41
Tabela 3.9	Caracterização da escória bruta ferro-níquel de redução, lixiviação e solubilização	44
Tabela 3.10	Classificação de resíduos sólidos	47
Tabela 3.11	Projetos de incorporação de resíduos em massa cerâmica	54
Tabela 3.12	Resumo da indústria cerâmica no Brasil	57
Tabela 3.13	Os tipos e os principais exemplos de telhas cerâmicas	64
Tabela 3.14	Normas para carga, massa, impermeabilidade e flexão vigentes para telhas cerâmicas	65
Tabela 3.15	Peso máximo da telha seca segundo as normas brasileiras	66
Tabela 3.16	Comparação entre os requisitos das normas brasileiras e estrangeiras para telhas cerâmicas	67
Tabela 3.17	Composição granulométrica (%) em relação aos tipos de produtos	86
Tabela 3.18	Composição química de argilas da região central do Rio de Janeiro	87
Tabela 3.19	Componentes importantes das argilas e suas principais características	88
Tabela 3.20	Relação entre absorção de água em porcentagem (%) e as características estimadas da argila para conformação de produtos	89
Tabela 3.21	Interpretação do ensaio de umidade de extrusão	90
Tabela 4.1	Os diferentes tipos de argilas usadas na cerâmica em estudo	98
Tabela 4.2	Formulações propostas em percentuais de matérias-primas	102
Tabela 4.3	Quantidade de matéria-prima por composição (kg)	103

Tabela 4.4	Filtros usados no ensaio de fluorescência de raios-X para determinação dos elementos químicos da escória	111
Tabela 4.5	Requisitos das normas brasileira e estrangeiras de telhas cerâmicas	120
Tabela 4.6	Critérios de resistência mínima à compressão de blocos e tijolos, segundo a normatização brasileira	121
Tabela 4.7	Dados a serem obtidos para preparação do lixiviado	124
Tabela 5.1	Presença de metais em ensaios de solubilização e lixiviação na escória da Mineradora Morro Azul	126
Tabela 5.2	Quantidade de metais contidos na escória de níquel em ensaio de solubilização e lixiviação	127
Tabela 5.3	Umidade de cada matéria-prima in natura em base úmida e base seca	136
Tabela 5.4	Quantidade de matéria-prima por composição (g)	138
Tabela 5.5	Classes de resistência de blocos cerâmicos de alvenaria (NBR 7171)	146
Tabela 5.6	Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade	147
Tabela 5.7	Dados obtidos no ensaio de lixiviação dos corpos-de-prova	148

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Anuário Brasileiro de Cerâmicas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica
ANICER	Associação Nacional das Indústrias Cerâmicas
ASTM	American Society for Testing and material
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
DEMa	Departamento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FESP	Fundação de Ensino Superior de Passos
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LME	London Metal Exchange
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MMA	Mineradora Morro Azul
NBR	Normas Brasileiras de Referência - Denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
RDC	Reciclagem de Resíduos de Demolição e Construção
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RL	Retração Linear
SENAI	Serviço Nacional da Indústria
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UNAERP	Universidade de Ribeirão Preto
XRF	Fluorescência de raios-X

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	23
2.1 - OBJETIVO GERAL	23
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3. REVISÃO DA LITERATURA	24
3.1 - O NÍQUEL.....	24
3.1.1 - O uso do níquel	25
3.1.2 - Utilização do níquel na indústria	26
3.1.3 - Produção de níquel no mundo.....	27
3.1.4 - A produção de níquel no Brasil.....	30
3.1.5 - Processo de produção de níquel proveniente de mineradoras do Sudoeste do Estado de Minas Gerais	33
3.1.6 - A mineradora em estudo	34
3.1.7 - As interferências das mineradoras no meio ambiente	39
3.2 - RESÍDUOS GERADOS NA PRODUÇÃO DE NÍQUEL	41
3.2.1 - Processos de geração de escória em mineradoras de níquel	42
3.2.1.1 - Escória em resfriamento brusco em água.....	42
3.2.1.2 - Escória no resfriamento ao ar	43
3.2.1.3 - Escória no resfriamento na água ou a vapor	43
3.2.2 - A composição química da escória	43
3.2.3 - Classificação dos resíduos na mineração do níquel.....	44
3.2.4 - O uso de materiais alternativos na construção civil	47
3.2.4.1 - Reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD) ...	48
3.2.4.2 - Reutilização de escória de alto forno	50
3.2.4.3 - Reutilização da escória de aciária.....	51
3.2.4.4 - Reutilização de sucata de aço	52
3.2.4.5 - Reutilização de cinzas volantes	52
3.2.4.6 - Utilização da escória de ferro-níquel	53
3.2.4.7 - Outros resíduos	53
3.2.5 - O uso da escória de níquel na construção civil	55

3.3 - A INDÚSTRIA DAS CERÂMICAS VERMELHAS E AS TELHAS.....	55
3.3.1 - Tipos/Classificação de telhas	63
3.3.2 - Normas técnicas para telhas	65
3.3.3 - O processo de fabricação das telhas.....	67
3.3.4 - Características técnicas das telhas	76
3.3.4.1 - Impermeabilidade.....	76
3.3.4.2 - Carga de ruptura à flexão.....	76
3.3.4.3 - Dimensões	77
3.3.4.4 - Geométricas.....	78
3.3.5 - Estudos de incorporação de resíduos em telhas cerâmicas.....	79
3.4 - AS ARGILAS.....	81
3.4.1 - Tipos de argilas	83
3.4.1.1 - Argila da China ou Caulim.....	83
3.4.1.2 - Argila Bentonita	83
3.4.1.3 - Argila de Grês	83
3.4.1.4 - Argila Vermelha.....	84
3.4.1.5 - Argila Refratária	84
3.4.1.6 - Argila Flint-Clay	84
3.4.1.7 - Argila tipo "Ball-Clay"	84
3.4.2 - A granulometria das argilas	86
3.4.3 - A composição química das argilas	87
3.4.4 - A composição mineralógica das argilas.....	88
3.4.5 - A capacidade de absorção de água pelas argilas	88
3.4.6 - A plasticidade da massa argilosa	90
3.4.7 - A resistência das peças de cerâmica vermelha após a queima	91
3.5 - COMENTÁRIOS SOBRE A LITERATURA	91
4. MATERIAIS E MÉTODOS	93
4.1 - DEFINIÇÃO DO PRODUTO A SER OTIMIZADO	93
4.2 - ESCOPO DO TRABALHO	94
4.3 - DESCRIÇÃO E PROCESSO DE OBTENÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS.....	96
4.3.1 - A escória.....	96
4.3.2 - As argilas	97

4.3.3 - Misturas das argilas e da escória	99
4.4 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	99
4.4.1 - Análise com as argilas.....	100
4.4.1.1 - Análise de granulometria e picnometria das argilas	100
4.4.1.2 - Análise de plasticidade das argilas.....	100
4.4.1.3 - Extrusão.....	102
4.4.1.4 - Ensaio para avaliação das umidades das argilas e da mistura	107
4.4.1.5 - Sinterização das argilas.....	107
4.4.1.6 - Ensaio da umidade dos corpos-de-prova pós extrusão.....	107
4.4.2 - Ensaio com a escória.....	108
4.4.2.1 - Análise de granulometria e picnometria da escória	108
4.4.2.2 - Ensaio com espectrofotômetro de absorção atômica	109
4.4.2.3 - Ensaio de lixiviação e solubilização da escória.....	109
4.4.2.4 - Difração de raios-X	110
4.4.2.5 - Fluorescência de raios-X	110
4.4.2.6 - Sinterização da escória	111
4.4.2.7 - Análise Térmica Diferencial	113
4.5 - CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS CERÂMICOS.....	114
4.5.1 - Imersão em água.....	115
4.5.2 - Resistência mecânica.....	118
4.5.2.1 - Ensaio de flexão para telhas.....	119
4.5.2.2 - Ensaio de compressão	120
4.5.3 - Permeabilidade	121
4.5.4 - Lixiviação.....	123
5. RESULTADOS.....	125
5.1 - ENSAIOS COM A ESCÓRIA	125
5.1.1 - Análise granulométrica e picnométrica da escória.....	125
5.1.2 - Ensaio de lixiviação e solubilização da escória	126
5.1.3 - Análise estrutural da escória por difratometria de raios-X	127
5.1.4 - Análise dos componentes químicos da escória.....	129
5.1.5 - Sinterização da escória	129
5.1.6 - Análise térmica diferencial da escória	131

5.2 - ENSAIOS COM AS ARGILAS	132
5.2.1 - Análise granulométrica e picnométrica das argilas.....	132
5.2.2 - Plasticidade das argilas e da mistura	133
5.2.3 - Ensaio para avaliação da umidade das argilas e da mistura	136
5.2.4 - Ensaio de sinterização das argilas.....	136
5.3 - ENSAIOS COM A MASSA ARGILOSA E A ESCÓRIA PARA PRODUÇÃO DE TELHAS CERÂMICAS	137
5.3.1 - Ensaio de umidade dos corpos-de-prova pós extrusão.....	138
5.3.2 - Processo de queima dos corpos-de-prova	139
5.3.3 - Ensaio de absorção em água	140
5.3.4 - Ensaio de ruptura por flexão dos corpos-de-prova.....	143
5.3.5 - Ensaio de ruptura por compressão dos corpos-de-prova	144
5.3.6 - Ensaio de permeabilidade	146
5.3.7 - Ensaio de lixiviação dos corpos-de-prova	148
6. CONCLUSÕES	149
7. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	151
8. REFERÊNCIAS.....	153
APÊNDICE 1 - DADOS DOS ENSAIOS DE RUPTURA POR FLEXÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	164
APÊNDICE 2 - DADOS DOS ENSAIOS DE RUPTURA POR COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	171

1. INTRODUÇÃO

No processo de produção de níquel por qualquer mineradora é gerado um resíduo em grande proporção chamado escória de níquel. Ao longo dos anos, mesmo com o volume estocado em crescimento, não se encontrou destinação para esta escória e a mesma foi sendo depositada em áreas da mineradora, próxima à produção, gerando um passivo ambiental de grande volume. A produção das mineradoras oscila de acordo com o preço da commodity, sendo que diminuem a produção quando o preço internacional está baixo e aumentam à medida que o preço internacional melhora. A mineradora, geradora da escória que faz parte deste estudo, está situada na cidade de Pratápolis, região do sudoeste mineiro, conforme Figura 1.1, considerada de pequeno porte e iniciou suas atividades em 1962, com volume de aproximadamente 1.000 t/ano, triplicando esta produção no final dos anos 1990. A partir da virada do século, sua produção chegou a ser paralisada por causa do preço do níquel no mercado internacional, voltando a funcionar a partir de 2007, com outra razão social, numa produção de liga de ferro-níquel de 840 t/ano, gerando em contrapartida, aproximadamente 50.000 t de escória no processo produtivo por ano.



Figura 1.1 - O Estado de Minas Gerais e a cidade de Pratápolis - Local do estudo.

A jazida de minério de níquel desta mineradora é de minério do tipo oxidado, diferente do minério de outra mineradora da região que tem o minério sulfetado, sendo estas características próprias de cada mina, em cada local do Estado e do país. Este minério passa por um processo de britagem para a adequação de sua granulometria e em seguida ocorre a etapa de calcinação, em fornos rotativos, em que toda a umidade é retirada e também toda a água quimicamente ligada é retirada. O minério calcinado é então carregado em forno elétrico, onde a altas temperaturas ocorre a redução do minério. Nesta etapa o oxigênio dos óxidos de ferro e níquel são retirados, obtendo assim a liga FeNi com cerca de 20% de níquel.

Ao longo dos anos, a geração de escória chegou a 68.000 t por ano e a quantidade que a mineradora tem deste produto em seus depósitos é de cerca de 1.000.000 t, como pode ser observado na Figura 1.2.



Figura 1.2 - O condicionamento da escória na mineradora em estudo.

A escória gerada passou a ser denominada de "Olivina Azul", devido à sua coloração, sendo um produto resultante do processo de eletro-fusão de minério saprolítico de níquel seguido de uma cristalização em água a alta pressão.

Diante da quantidade de escória gerada e acumulada ao longo dos anos pela mineradora, é necessário gerar estudos de destinação para este material, contribuindo para que outros produtos possam ter ganhos de qualidade através da inclusão deste material na composição de sua matéria-prima, avaliando-se anteriormente sua composição química e suas implicações ambientais que eventualmente possam estar gerando.

É importante salientar que qualquer tecnologia de destinação da escória pode ser aplicada em outras regiões do país, com mesma vocação extrativista, sendo que Minas Gerais é apenas o 4º produtor de níquel do país não possuindo as maiores reservas de resíduo gerado, observando-se para isso a composição de cada escória de acordo com as normas brasileiras existentes.

Este estudo pode ser referência para utilização das escórias de outras mineradoras no Estado de Minas Gerais e em outros Estados, pois pretende-se avaliar e propor uma utilização nobre para este sub-produto, como componente da matéria-prima para produção de telhas, com baixa absorção de umidade e destinada à produção pelo método de monoqueima. Esta rota é a mais moderna e atual para a produção de telhas atualmente, permitindo a obtenção de telhas de elevada qualidade técnica e menor custo. A "massa" utilizada na fabricação das telhas e tijolos é composta por 2 ou mais argilas diferentes, cada uma com uma função diferente como resistência, cor e outras.

Observando as cerâmicas da região, é possível perceber que os estoques de argilas são uma preocupação para a continuidade da produção, pois a medida que se esgotam, novas jazidas precisam ser viabilizadas e o custo do transporte desta nova argila passa a ser um importante componente para a comercialização dos produtos. A escória, como elemento a ser adicionado a esta massa de argilas, proposta neste estudo, pode ser considerada uma substituta de parte destas argilas, aumentando assim a sobrevida das jazidas, favorecendo o processo industrial, melhorando as características dos produtos e mantendo a renda e a empregabilidade desta empresa à partir da definição da viabilidade comercial desta aplicação.

2. OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo investigar o emprego de escória gerada em mineradora produtora de níquel da região, incorporando-a à massa argilosa para a produção de telhas cerâmicas de alta resistência, de baixa absorção de umidade e alta qualidade técnica por processo de monoqueima.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho teve como objetivos específicos:

- Fazer a caracterização das argilas utilizadas atualmente na produção de telhas por uma cerâmica na cidade de Capitólio-MG e a caracterização da escória gerada na produção de níquel pela Mineradora Morro Azul, em Pratápolis-MG;
- Obter a otimização das composições das argilas com a escória em diferentes proporções do ponto de vista de plasticidade e tratamento térmico;
- Preparar corpos-de-prova e fazer avaliações de suas propriedades em escala laboratorial e fazer os testes de caracterização finais de acordo com a necessidade com ensaios mecânicos, estruturais (porosidade, permeabilidade, absorção de água, microestrutural etc.) e testes específicos de requisito de produto;
- Definir a melhor composição da mistura de argilas com escória para produção de telhas cerâmicas.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 - O NÍQUEL

O níquel, de símbolo químico Ni, é um metal de número atômico 28 e número de massa 58,7 *uma*, pertencente ao grupo VIIB da tabela periódica; à temperatura ambiente encontra-se no estado sólido. É um elemento com concentração na superfície terrestre da ordem de 0,008%. É usado desde os tempos remotos, na China. É um metal de transição, levemente duro, branco prateado, com importantes qualidades para uso industrial como a capacidade de suportar deformação sem o risco de fratura e rompimento (ductibilidade), podendo ser moldado por deformação (maleabilidade). Tem grande resistência à oxidação e à corrosão e elevado ponto de fusão, próximo a 1450°C, com grande diversidade de uso. O nome deriva da palavra alemã Kupfernickel, usada para indicar o falso cobre que extraíam das minas. Destaca-se pelo seu magnetismo, que o transforma em um ímã em contato com campos magnéticos. Quando associado a outros metais, tem como característica melhorar as propriedades da liga. Pode-se dizer que cerca de metade da aplicação do uso do níquel é para a formação de ligas metálicas. É extraído de minerais do tipo lateríticos e sulfetados. Apesar de 70% das reservas mundiais serem encontradas na forma laterítica, apenas 40% do níquel produzido é laterítico. Estas são mais utilizadas na produção de ferro-níquel, utilizado diretamente na produção de aço. O aço inoxidável é uma liga constituída principalmente por ferro, cromo e níquel, sendo que o níquel participa com aproximadamente 8% da liga (ROSEMBERG, 1968).

Baseando-se em evidências geofísicas e análises de meteoritos é suposto que o níquel ocorra em abundância no núcleo terrestre, formando ligas metálicas com o ferro. O níquel, assim como o vanádio, são os elementos-traço mais comuns encontrados na composição química do petróleo, em geral estando mais enriquecidos nos óleos pesados. A exposição ao metal níquel e seus compostos solúveis não deve superar aos 0,05 mg/cm³, medidos em níveis de níquel equivalente para uma exposição laboral de 8 h diárias e 40 h semanais. O níquel tetracarbonilo (Ni(CO)₄), que é gerado durante o processo de obtenção do metal, é um gás de enorme toxicidade (FERREIRA; MESQUITA; LIMA, 2008).

Com o crescimento da industrialização dos países do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), especialmente a China, ocorreu um aumento da demanda e do preço deste metal, acarretando em grandes investimentos em pesquisa e implantação e expansão de unidades de produção de níquel, especialmente para produção do aço, fundamental na indústria em geral (BNDES, 2000).

Conforme o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, as reservas de minério de níquel do país que são formadas predominantemente minerais lateríticos, estão estimadas em cerca de 10.000.000 t de níquel contido, e distribuem-se por cinco estados: Goiás, Pará, Piauí, Minas Gerais e São Paulo. Os estados de Goiás e Pará são os que concentram mais de 80% dessas reservas e os maiores e os mais importantes depósitos econômicos de níquel do país. A mineração de níquel no Brasil ultrapassou o patamar de produção de 40.000 t anuais de níquel contido em 2011, sendo realizada predominantemente nos estados de Goiás e Minas Gerais, que juntos respondem pela totalidade da produção do país, sendo que do primeiro estado provém cerca de 85% do total. O parque produtivo do níquel é considerado moderno e atualizado tecnologicamente, em razão de contínuos investimentos realizados pelas grandes empresas que trabalham no setor. A concentração da produção em poucas unidades é também uma característica observada na mineração de níquel brasileira. Cerca de 90% da produção provém essencialmente de três complexos mineiro-metalúrgicos que são voltados única e exclusivamente à obtenção de produtos de matte de níquel para exportação, liga Fe-Ni, e carbonato de níquel, matéria-prima para produção de níquel eletrolítico em unidade localizada em São Miguel Paulista, estado de São Paulo (BNDES, 2000).

3.1.1 - O uso do níquel

O uso do níquel pelo homem é conhecido há muitos séculos. Estima-se a presença do níquel na composição de moedas desde 800 anos a.C. e também em armamentos de 300 ou 400 anos a.C. No século XVIII, o mineralogista e químico sueco Axel Frederik Cronstedt ao tentar extrair o cobre da niquelina, obteve um metal branco que chamou de níquel, já que os mineiros de Hartz atribuem ao «viejo Nick» (o diabo) o motivo pelo qual alguns minerais de cobre não poderiam ser

trabalhados. O metal responsável por isso foi descoberto por Cronstedt na niquelina, o *kupfernickel*, diabo do cobre, como era e ainda é chamado o mineral. No processo industrial verifica-se a utilização do níquel somente após a obtenção da primeira amostra de metal puro por Richter no século XVIII, e do desenvolvimento da liga sintética de ferro-níquel por Michael Faraday e associados. Nesta época Fleitman descobre que a adição de uma pequena quantidade de magnésio tornava o níquel maleável propiciando a fabricação da primeira moeda de níquel puro. A partir destas descobertas, dá-se início a uma aplicação intensiva do níquel em ligas não só com ferro, mas com outros metais como cobre, magnésio, zinco, cromo e outros (MAGALHÃES, 2004).

3.1.2 - Utilização do níquel na indústria

A cada dia, aumenta o uso do níquel na produção industrial, sendo utilizado em diversas ligas, como o aço inoxidável, em galvanização, fundições, catalisadores, baterias, eletrodos e moedas, como apresentado na Figura 3.1.

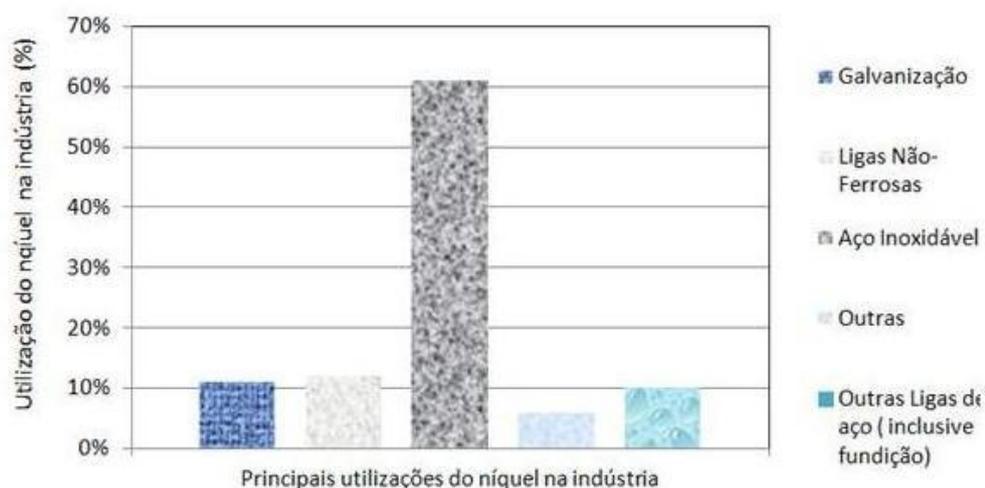


Figura 3.1 - Principais aplicações do níquel na indústria mundial.

Fonte: BNDES, 2000.

O níquel está presente em materiais produtos e equipamentos de transporte, bélicos, equipamentos eletrônicos, produtos químicos, equipamentos médico-hospitalares, materiais de construção, equipamentos aeroespaciais, bens de consumo duráveis, pinturas, e cerâmicas, como apresentado na Figura 3.2.

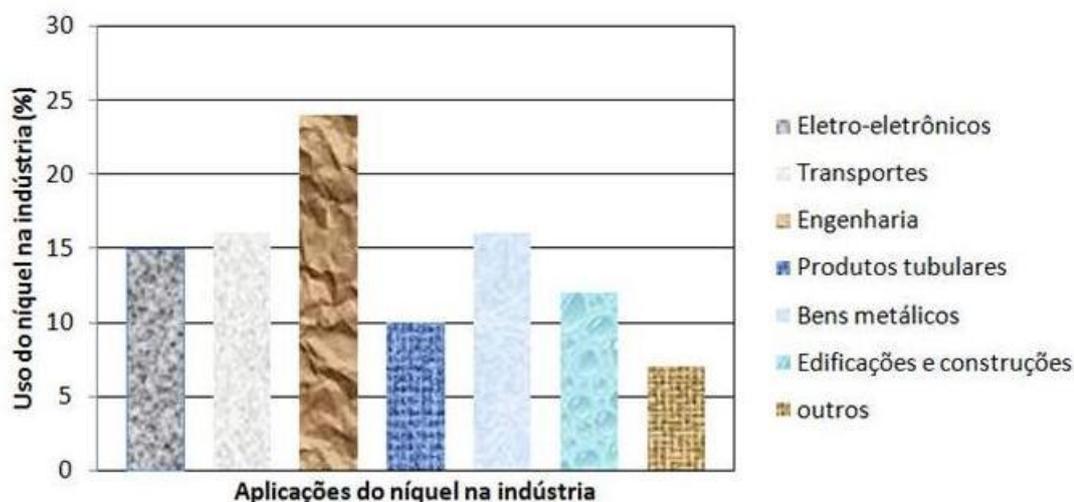


Figura 3.2 - Uso do níquel na indústria mundial.

Fonte: BNDES, 2000.

O níquel tem grande importância para a indústria mundial moderna, pelas várias possibilidades de aplicações, tornando-se um produto estratégico para muitos países. As fontes de níquel são os minerais sulfuretos, silicatados, arsenetos e oxidados. O teor de níquel no mineral e a concentração do mesmo em uma área definida na crosta terrestre, definem os depósitos minerais para exploração, constituindo fonte de suprimento das demandas existentes

A principal aplicação do níquel em todo mundo é para a fabricação de aço inox com tratamento em superfície. No mercado interno as aplicações do níquel em suas diversas formas são direcionadas à elaboração de aço inox, fundidos de ferro e aço, galvanoplastia, liga com cobre e também com alumínio, ligas eletroeletrônicas, superligas e produtos químicos (BNDES, 2000).

3.1.3 - Produção de níquel no mundo

Com o uso das ligas, tem-se desenvolvido novos processos de beneficiamento do níquel, gerando estudos e pesquisas quanto às suas propriedades químicas e físicas e ampliação do seu campo de aplicação. As reservas mundiais, de acordo com a Mineral Commodity Summaries de 2013, classificam a Austrália, Canadá, Filipinas, Indonésia e Rússia como países responsáveis por 65% do níquel consumido. Outros produtores são África do Sul,

Brasil, Bósnia, China, Colômbia, Cuba, Madagascar, Nova Caledônia e República Dominicana. A produção mundial de níquel em 2012 foi da ordem de 2.100.000 t de Ni contido no minério, representando um aumento de 8,38% em relação a 2011.

O desenvolvimento de processos mais rentáveis e eficientes de beneficiamento mineral do chamado minério laterítico tem sido responsável por novos patamares na produção de níquel na Austrália principalmente, e em outros países como o Brasil. Neste contexto, a produção brasileira, 6^a no ranking dos produtores mundial, juntamente com a Nova Caledônia, foi de 140.000 t de níquel contido em ligas de ferro-níquel, níquel eletrolítico e mate de níquel.

De acordo com a Mineral Commodity Summaries de 2013, os maiores produtores de níquel em 2012 são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - As reservas e a produção do níquel no mundo.

Discriminação	Produção e Reservas Mundiais (t)			
	Produção		Reservas	
Países	2012	%	2012	%
África do Sul	42.000	2,0	3.700.000	4,93
Austrália	230.000	11,0	20.000.000	26,67
Brasil	140.000	6,7	7.500.000	10,00
Botswana	26.000	1,2	490.000	0,65
Canadá	220.000	10,5	3.300.000	4,40
China	91.000	4,3	3.000.000	4,00
Colômbia	80.000	3,8	1.100.000	1,47
Cuba	72.000	3,4	5.500.000	7,33
Filipinas	330.000	15,7	1.100.000	1,47
Indonésia	320.000	15,2	3.900.000	5,20
Madagascar	22.000	1,0	1.600.000	2,13
Nova Caledônia	140.000	6,7	12.000.000	16,00
Rep.Dominicana	24.000	1,1	970.000	1,29
Rússia	270.000	12,9	6.100.000	8,13
Outros Países	135.000	6,4	8.440.000	11,25
TOTAL	2.100.000	100,0	75.000.000	100,00

Fonte: Mineral Commodity Summaries (2013) - Adaptada.

Países da Ásia participam com 59,12% do consumo mundial. Grandes consumidores da Ásia são Japão, Coreia do Sul, Taiwan e China tiveram crescimento significativo no consumo de níquel. A China teve um consumo referente a 28% do total mundial, enquanto o Japão 12% e os EUA, em 3º lugar com 10%.

Apesar da redução nas reservas de níquel da Austrália em 2011, justificado pelo aumento de sua produção, houve uma expansão em 52,8% da oferta do metal na Colômbia contribuindo para o crescimento das reservas mundiais em 14,3 % em relação ao ano anterior, mantendo o Brasil na 3ª posição no ranking internacional. A evolução da produção mundial nos últimos três anos foi de 37,9%, superior ao Brasil com um crescimento de 28,0%.

Os maiores consumidores desse metal em todas as suas formas são estão na Ásia e na Europa, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - O Consumo mundial de níquel.

	(Mil t de Ni)						Participação
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
África	45,5	32,0	42,0	33,6	27,0	29,8	2,74
América	164,6	174,3	180,4	171,4	160,5	117,1	10,77
Ásia	579,6	592,2	683,7	690,9	688,3	642,7	59,12
Europa	454,3	447,2	492,1	423,9	399,6	294,7	27,11
Oceania	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	2,9	0,27
Mundo	1.246,8	1.248,5	1.401,1	1.322,7	1.278,3	1.087,2	100,00

Fonte: INSG Preliminar estimado, 2010.

A diversidade e a importância estratégica do uso do níquel, aliadas ao crescimento atual da demanda determinada pela recuperação da economia mundial e principalmente pelo processo industrial da China são responsáveis pelo crescente e consistente aumento no preço desse metal. Os preços da commodity do níquel no mercado internacional variam de ano para ano, devido às mudanças nas regras comerciais dos países. A variação do preço da tonelada de níquel no mundo influencia diretamente a produção das mineradoras, fazendo com que algumas diminuam sua produção quando o preço por tonelada fica abaixo de um patamar aceitável, como mostrado na Figura 3.3.

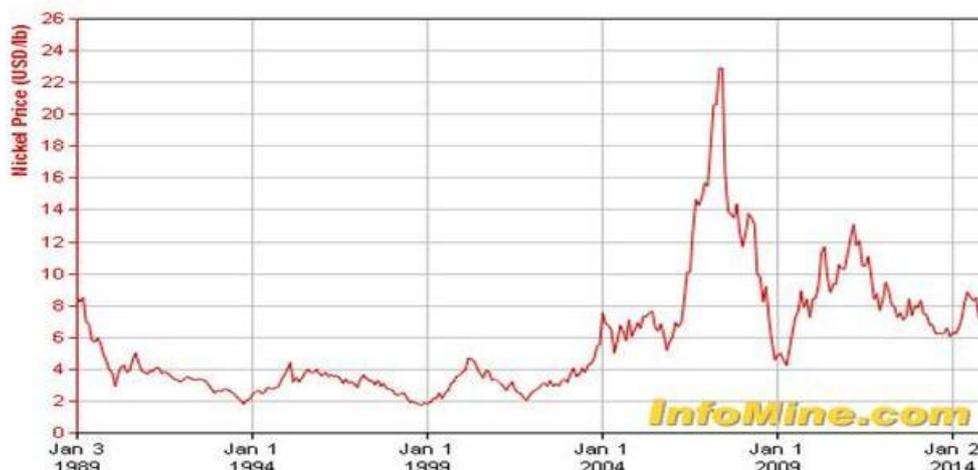


Figura 3.3 - A variação do preço do níquel (t) no mercado mundial.

Fonte: InfoMine, 2015.

Os preços do níquel caíram em 2011, tendo uma pequena recuperação em 2012, pela London Metal Exchange (LME) após um declínio de 12 meses, e voltou a se contrair com a situação da crise europeia e pela desaceleração da economia chinesa. Problemas econômicos no Japão criadas pelo terremoto em março de 2011, além do tsunami que ocorreu neste mesmo período reforçaram esta desaceleração global. A média mensal LME do preço à vista para outubro de 2012 foi de US\$ 17.242,00 por tonelada. A demanda global por aço inoxidável tem projeção de crescimento apesar do clima econômico deprimido.

A demanda cada vez maior por superligas deverá ser fortalecida pelas indústrias aeroespaciais e pelas indústrias de geração de energia. O aumento da extração de gás natural de xisto e a descoberta de campos de gás no Canal de Moçambique são esperados para acelerar os pedidos de novas turbinas fabricadas a partir de aço inoxidável de níquel e superligas. Novas minas de níquel estavam sendo desenvolvidos em diversas partes do mundo, especialmente no Brasil, Canadá, África Oriental, Oceania e Sudeste da Ásia para atender ao crescimento esperado de longo prazo na demanda.

3.1.4 - A produção de níquel no Brasil

A produção de minério de níquel no Brasil entre os anos de 2000 a 2011 é descrita na Figura 3.4.

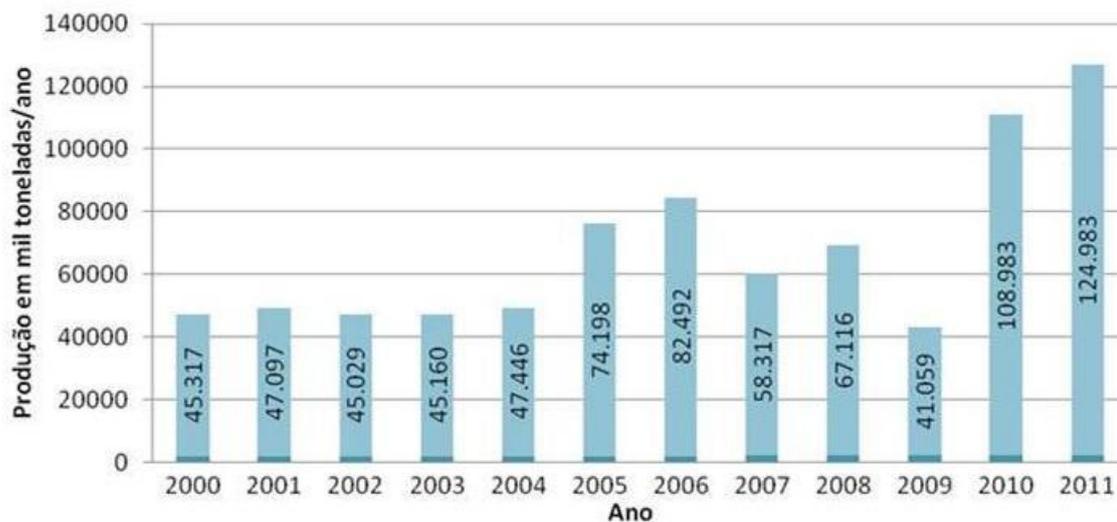


Figura 3.4 - A produção nacional de minério de níquel concentrado.

Fonte: DNPM, 2013.

No Brasil, as minas estão concentradas nos Estados do Pará, Bahia, Goiás e Minas Gerais, e são exploradas pelas empresas Anglo American Brasil Ltda., Vale S.A., Mirabela Mineração e Grupo Votorantim.

As dimensões das reservas de níquel, da produção e o valor da comercialização de níquel constituem um dos pilares do desenvolvimento da indústria extrativa mineral e importante elo da cadeia produtiva brasileira do níquel e da siderurgia nacional, como pode-se observar na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Reservas brasileiras de níquel.

UF	Minério (t)	Ni contido (t)	Teor (%)
GO	229.713.447	3.176.393	2,59
PA	193.895.000	2.830.867	1,40
PI	138.000.000	2.014.800	0,98
BA	94.419.000	566.514	0,66
MG	5.292.806	107.231	1,32
SP	2.252.000	32.879	1,39
Total	663.572.253	8.728.684	1,67

Fonte: Anuário Mineral Brasileiro - DNPM/2013.

A produção de ferro-níquel de Barro Alto-GO e Niquelândia-GO foi destinada aos Estados de Minas Gerais (91,8%), São Paulo (5,6%) e Rio Grande do Sul (2,6%) para a aplicação na siderurgia. O percentual de 27,1% das vendas de níquel eletrolítico, produzido em São Miguel Paulista, foram destinadas ao mercado interno distribuídos entre os Estados de São Paulo (19,7%), Rio de Janeiro (3,8%), Minas Gerais (1,8%), Paraná (0,8%), Santa Catarina (0,7%), e outros (0,5%), destinados em especial na aplicação de ligas, superligas, aço inoxidável, siderurgia, galvanoplastia, fundidos de ferro e aço, ligas de alumínio e cobre (BNDES, 2000).

As exportações brasileiras de níquel, em sua maior parte oriunda de Goiás e incluindo ferro-níquel, ligas de níquel em forma bruta, mates de níquel, sinters de óxido de níquel, catodos de níquel e resíduos de níquel são realizadas principalmente com a Alemanha, Japão, Bélgica, Finlândia, Estados Unidos. Outros compostos químicos, incluindo aqui óxido níqueloso, hidróxido de níquel e sulfato de níquel, têm como mercados a Bélgica, Alemanha, Espanha, Estados Unidos e Argentina. Nos últimos anos, essas exportações têm rendido entre 150 a 200 milhões de dólares de divisas ao país (BNDES, 2000).

No mercado interno, constituído predominantemente pelos estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul, o níquel é consumido na forma de ferro-níquel e de níquel eletrolítico. A siderurgia é o setor de maior demanda pelo metal, consumindo 80% da produção que se destina à fabricação de aço inoxidável. O restante é destinado ao fabrico de outros tipos de aços, a artefatos como galvanoplastia, alpacas (ligas metálicas) e outros produtos.

Diante do cenário mundial de forte demanda de consumo por níquel e cotação recorde de seu preço na Bolsa de Metais de Londres a partir de 1998, a produção de níquel é atualmente um dos principais focos mundiais de investimentos privados no segmento de *commodities* minerais. Neste contexto, Goiás, por suas reservas, características do minério, localização, logística e política estadual para o setor mineral, é o estado brasileiro com um dos maiores investimentos privados, mais de 3,0 bilhões de reais, em pesquisa, implantação e expansão da produção brasileira de níquel.

Os depósitos de níquel de Jussara, Montes Claros e Iporá em Goiás são objeto de reavaliação e pré-viabilidade visando à implantação de unidades de produção de níquel pela empresa canadense Teck-Cominco, e pela Cia Níquel Tocantins do Grupo Votorantim. A se confirmar a viabilidade da exploração dessas reservas, a região será palco de investimentos privados e geração de renda e postos

de trabalho semelhantes aos que ocorrem no Pólo Mínero-Metalúrgico de Niquelândia-Barro Alto (BNDES, 2000).

3.1.5 - Processo de produção de níquel provenientes de mineradoras do Sudoeste do Estado de Minas Gerais.

Silva (2006) estudou escórias de níquel de mineração localizada no município de Fortaleza de Minas da empresa Votorantim Metais Níquel S/A. Seu estudo consistiu na tentativa do aproveitamento deste resíduo como agregado miúdo no concreto. O processo de produção de níquel detalhado é similar ao processo de produção do Ferro Níquel produzido no município de Pratápolis pela Mineradora Morro Azul. Segundo Silva (2006), o processo de lavra para produção de níquel é convencional, com desmonte e carregamento, utilizando explosivos granulados e emulsão, para preencher os furos abertos por perfuratrizes pneumáticas. Na britagem primária (britador de mandíbulas) é formado fragmentos, e uma grelha separa os matacões, desmontados com martelo hidráulico. Da pilha de estocagem o minério é retomado para abastecimento do moinho semi-autógeno (SAG). Uma peneira vibratória horizontal separa a fração fina, que se junta à descarga do moinho de bolas e vai alimentar a ciclonação. Nas etapas de fundição do níquel, são utilizados os fornos flash e elétrico, tendo como matéria-prima o minério concentrado via flotação.

Segundo informações obtidas na Empresa Votorantim Metais Níquel S/A, o objetivo principal do processo de fusão do concentrado de níquel (matéria-prima principal), é a produção de mate, que se trata de uma liga polimetálica contendo proporções médias de 50% de níquel, além de cobre, cobalto, ferro e enxofre.

Nesta etapa de fusão, segundo Silva (2006), o forno flash gera o mate, que seguirá para um circuito de granulação comum ao forno elétrico, gerando também a escória. Nessa fase, quando ocorre a redução dos óxidos de metais pesados presentes, é adicionado o coque e, novamente, são gerados mate e uma segunda escória. Esse mate depois de granulado com jatos de água segue para a estocagem e exportação. Já a escória do forno elétrico é estocada para uso como enchimento da mina subterrânea ou como tapetes drenantes do depósito de rejeito.

No mate, o principal metal de interesse é o níquel, e aplicando a tecnologia da hidrometalurgia e da eletrodeposição, obtém-se o níquel eletrolítico, principal

insumo para a produção dos aços inoxidáveis. Etapas sucessivas de recebimento, manuseio, secagem, fusão flash, fusão por redução e conversão de gases permitem a obtenção do produto final, e do subproduto, que é comercializado para empresas produtoras de fertilizantes e de álcool.

Do mate, além do níquel são ainda recuperados o cobre, o cobalto, e metais preciosos recuperados durante no processo. Mate e ácido sulfúrico são os principais produtos após a metalurgia e a principal matéria-prima da metalurgia.

3.1.6 - A mineradora em estudo

A mineradora em estudo situa-se na cidade de Pratápolis, na vertente sudoeste da Serra da Canastra, no extremo oeste do sul do Estado de Minas Gerais e na bacia do Rio Grande, na microrregião de Passos, sendo cortada pelo Ribeirão Prata e pelo Rio Palmeiras, que banham a cidade, apresentando um território montanhoso. Tem como vizinhos limítrofes os municípios de Cássia, Fortaleza de Minas, São Sebastião do Paraíso, Itaú de Minas e Capetinga. Sua flora é de matas, cerrados e capoeira, com muitas áreas reflorestadas de eucaliptos, guardando ainda pouquíssimos exemplares de madeiras nobres. A fauna é a de raposas (raras), lobos, veados, tatus, e grande variedade de aves e pássaros. Pratápolis possui 8.807 habitantes (IBGE - 2010), com IDH, PIB, Área e densidade demográfica apresentada na Tabela 3.4, situada na região do sudoeste mineiro, distante 358 km de Belo Horizonte, 420 km de São Paulo, 150 km de Ribeirão Preto, 80 km de Franca, 33 km de Passos, 28 km de São Sebastião do Paraíso, 12 km de Itaú de Minas e 33 km de Cássia. A cidade tem linhas rodoviárias diárias para São Paulo e Campinas (Expresso União), Belo Horizonte (Gardênia), Ribeirão Preto, Passos, Paraíso, Itaú, Cássia e Franca.

Tabela 3.4 - Dados sobre a cidade de Pratápolis - MG.

Pratápolis	Área: 215.516 km ²	Pop: 8.807 habitantes
PIB: R\$ 98.834 mil	PIB Per Capta: R\$ 11.172,80	IDH: 0,729
Dens. Dem: 40,9 hab/km ²		

Fonte: IBGE, 2010.

No processamento dos minerais encontrados em Pratápolis-MG, a Morro Azul Metais produz níquel, gerando como subproduto a escória, rica em silicato de magnésio, que durante todos os anos de processamento formaram um passivo de aproximadamente 1.000.000 t. A partir de 2013 este resíduo passou a ser destinado à Votorantim Cimento para ser agregado à produção de cimento. Neste momento, a MMA está se preparando para a fabricação de fertilizante usando parte da escória em estoque.

O minério encontrado na área de extração da mineradora em estudo é um serpentinito decomposto, niquelífero fraturado, onde é comum o enriquecimento por Garnierita (Ni, Mg) SiO₃ e H₂O, cujos elementos principais são o Ni, Fe e Si conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Caracterização do depósito mineral da área da mineradora.

Nome	Minério de Níquel
Rocha	Serpentinico decomposto
Densidade	1,65
Grupo	Rochas Igneas ou Magmáticas
Origem	Peridotito com alteração total em olivina
Mineral	Minério de Níquel
Nome	Ganierita - (NiMg) SiO ₃ n H ₂ O
Origem	Secundária
Ocorrência	Associado com a serpentina, provavelmente um produto de alteração do periodito

Fonte: Pieroni (2013).

O processo de lavra nesta mineração é convencional, com desmonte e carregamento, utilizando explosivos granulados e emulsão, para preencher os furos abertos por perfuratrizes pneumáticas. O minério sai da lavra com tamanho máximo de 800 mm, podendo variar de 600 x 1200 mm, e umidade de 25 a 35%. Pode ser transportado por teleférico, transportador de correia ou caminhões até a estação de britagem, sendo que nos 2 primeiros processos o minério precisa ser submetido a uma britagem prévia. Com o minério disponível para o processamento, é necessário prepara-lo para alimentar o forno de redução. A partir daí são realizadas as seguintes operações: cominuição, aglomeração de pó, secagem e calcinação. O minério é secado ao tempo, em pátios semicobertos. Antes de entrar no calcinador o

minério seco recebe o pó aglomerado e uma quantidade adequada de redutor (carvão mineral, carvão vegetal, óleo gasóleo ou madeira). Uma temperatura de cerca de 900°C, o calcinado é descarregado e alimentado ao forno elétrico.

Richter (2009) estudou a escória gerada na produção de níquel na Mineradora Morro Azul. Seu estudo consistiu no desenvolvimento de uma rota de recuperação de metal a partir da escória secundária gerada na produção de ferro níquel. De acordo com Richter, o crescente uso do processamento de jazidas lateríticas para a obtenção de ferroníquel, aliado à necessidade do mercado global, implicou no desenvolvimento de rota conhecida como RKEF (rotary kiln-eletric furnace, ou calcinador rotativo-forno elétrico), conforme Figura 3.5. Esta configuração é interessante porque tem consumo energético baixo e o produto final obtido, o ferroníquel, não interfere negativamente nas etapas seguintes da cadeia produtiva, por possuir baixas concentrações de carbono, enxofre, fósforo e silício. Estes interferem substancialmente na qualidade do aço (MOURÃO, 2007). A rota RKEF ficou consolidada conforme a Figura 3.5.

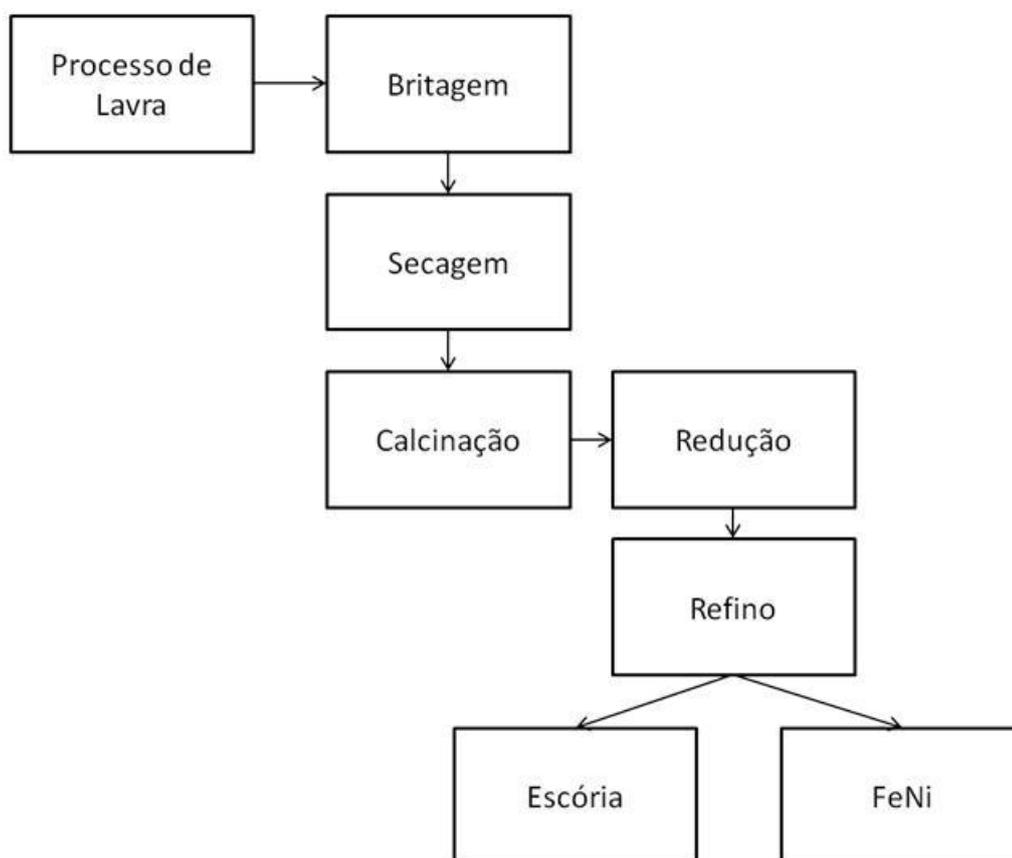


Figura 3.5 - A rota RKEF adotada na Mineradora Morro Azul.

Esta configuração de equipamentos atualmente é utilizada pela maioria das mineradoras produtoras de ferro-níquel em todo mundo. Neste processo a lavra é realizada por escavação mecânica, podendo haver desmontes com explosivos, sendo transportado até a estação de britagem. Para se reduzir a umidade do minério, é realizada uma operação de secagem em secador rotativo com queimador GLP, óleo combustível, carvão pulverizado ou outro. A tendência atual é substituir estes processos por secagem ao tempo em pátios semicobertos, como praticado na Morro Azul, diminuindo custos e impacto ambiental, embora criando um intervalo de tempo no processo de mineração.

A escória, assim como o metal, é descarregada normalmente em temperaturas acima de 1400°C. Normalmente, a escória é granulada com água de forma a facilitar seu manejo. O seu transporte é feito normalmente por caminhões convencionais basculantes.

A extração de níquel na mineradora em estudo acaba gerando problemas ambientais no processo de retirada do minério e da produção de níquel, como em toda e qualquer mineradora. As interferências na área de lavra e a deposição dos rejeitos gerados de escória geram cuidados constantes por parte da mineradora para que as alterações do meio ambiente, com relação à flora, à fauna e os parâmetros de qualidade de água existentes no entorno não coloquem a área com problemas irreversíveis de degradação ambiental. Há necessidade de implementação de ações de recuperação das áreas degradadas no local em todos os níveis, de modo que a atividade não comprometa as águas dos córregos em sua proximidade.

Atualmente a mineradora produz níquel sob a forma de FeNi, sendo que no decorrer dos anos a geração de escória foi se avolumando nos entornos da mineradora, havendo um passivo de aproximadamente 1.000.000 t. Hoje, parte desta escória está sendo utilizada no estado bruto, na produção de cimento e adubo na forma de termofosfato, de acordo com a Tabela 3.6, havendo necessidade de desenvolvimento de tecnologias para utilização mais nobre deste subproduto e principalmente encontrar destinação para o material disposto ao longo dos anos de produção do Níquel.

Tabela 3.6 - Destinação atual da escória da mineradora Morro Azul.

Granulometria (mm)	Destinação
0 a 0,4	Indústria refratária
0 a 0,8	Concreto refratário
0,4 a 1,4	Jateamento
1,4 a 2,4	Jateamento mais grosso
2,4 a 6,0	Indústria refratária
0 a 10,0	Indústria de adubos e cimenteira

Fonte: Mineradora Morro Azul.

De acordo com Richter (2009), a análise química da escória por fluorescência de raios-X (XRF), em base calcinada e normalizada a 100%, está descrita na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Análises químicas por XRF.

Nome da Amostra	Escória Resfriada	Escória Granulada
MgO	5,75	7,38
Al ₂ O ₃	0,25	0,25
SiO ₂	7,32	18,3
P ₂ O ₅	0,68	0,44
SO ₃	0,13	0,03
K ₂ O	0,02	0,02
CaO	21,10	22,10
Cr ₂ O ₃	1,71	2,09
MnO	0,11	0,12
Fe ₂ O ₃	62,32	48,67
Co ₃ O ₄	0,03	0,02
NiO	0,58	0,58
TOTAL	100,00	100,00

Fonte: Richter (2009) - Adaptada.

Percebe-se claramente a predominância de óxido de ferro e de óxido de cálcio, sendo fundamental o entendimento que cada jazida tem características

específicas, embora o processo de produção de níquel leve à compostos parcialmente semelhantes.

3.1.7 - As interferências das mineradoras no meio ambiente

A mineração é considerada uma atividade fundamental para o crescimento social e econômico de muitos países. O Estado de Minas Gerais tem sua economia fortemente baseada em recursos provenientes da mineração. Neste sentido, é necessário salientar que o Brasil possui cerca de 70 substâncias, das quais 21 dos grupos minerais metálicos e 45 dos não metais e 4 do grupo dos energéticos.

Em 2011 o Brasil se destacou como o maior produtor de nióbio (97%) e de tântalo (18,4%) além de ser o segundo produtor de magnesita e terceiro produtor de crisotila, bauxita minério de ferro e grafita (DNPM, 2013).

O extrativismo mineral transforma completamente e definitivamente o ambiente, deixando claro o papel de agente poluidor e causador da degradação ambiental. Cabe aos agentes buscar sempre novas formas de obtenção, de processamento e utilização desses recursos, focando no conceito de sustentabilidade ambiental e garantindo o direito das gerações futuras de uma vida melhor e mais saudável.

Portanto, é necessário, por parte das mineradoras, das universidades, dos centros de pesquisa, financiados por órgãos públicos e privados realizar estudos ambientais e implantação de ações de gestão ambiental, que sejam compensadores e que minimizem os impactos ambientais provenientes do processo de mineração.

Em todas as regiões em que ocorre o processo de mineração a degradação do meio ambiente está presente. A degradação de uma área ou região ocorre quando a flora e a fauna são alteradas, destruídas, removidas ou expulsas, quando a camada fértil do solo for perdida, removida ou enterrada; e a qualidade e regime de vazão do sistema hídrico for modificado, em geral para pior. A degradação ambiental ocorre quando há perda de adaptação às características físicas, químicas e biológicas e é inviabilizado o desenvolvimento socioeconômico (IBAMA, 1990).

A degradação da área é inerente ao processo de mineração e a intensidade desta degradação depende do volume, do tipo de mineração e dos rejeitos produzidos. A recuperação destes rejeitos deve ser considerada como parte do processo de mineração. A ação de recuperação, depende do grau de interferência a

ser implantada na área e deve receber o mesmo nível de importância dado à obtenção do bem mineral que contribui para o desenvolvimento socio-econômico da região.

É fundamental o cuidado com os danos ambientais provenientes do processo de mineração de qualquer metal, neste caso, do níquel pelas mineradoras, principalmente fazendo uso de medidas preventivas. Os prejuízos causados pela mineração vão desde a perda da biodiversidade, a perda da fertilidade dos solos até a interferência nos cursos de água.

No processo de desativação ou encerramento das atividades de lavra de uma mineradora, que ocorre devido principalmente a exaustão da mina ou à questões econômicas de inviabilidade, uma série de ações devem ser cumpridas. De acordo com a legislação, estão previstas medidas nas esferas ambiental e social para a mitigação dos impactos socioambientais inerentes ao fechamento de uma mina. Essas medidas fazem-se necessárias pelo fato de que tanto na implantação como desativação de empreendimentos das mineradoras, os impactos positivos e negativos precisam ser encarados como parte do processo de extração, bem como os processos de recuperação ambiental necessários para a reabilitação ou restauração dos ambientes afetados.

Há que se considerar a necessidade de busca de soluções para a destinação de todo o resíduo gerado na produção de níquel, acabando com o passivo gerado ao longo dos anos e prevendo destinação para a produção futura de escória. Um depósito de escória em uma mineradora no Estado de Goiás é ilustrado na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Depósito de escória da Mineradora de Barro Alto em Goiás.

3.2 - RESÍDUOS GERADOS NA PRODUÇÃO DE NÍQUEL

Os subprodutos gerados na produção do Níquel, por parte da Empresa Morro Azul em Pratápolis/MG são vários, principalmente devido à busca por produtos aplicáveis na construção civil, objetivando renda para a empresa em complementação à sua atividade principal.

Estes subprodutos encontram diferentes opções de aplicação no mercado, gerando receitas adicionais à mineradora, tornando-se uma importante fonte de renda, principalmente quando os preços do níquel praticados no mercado mundial estão baixos. Desta forma, permite-se a manutenção da planta, enquanto se aguarda preços adequados e viáveis; Estes subprodutos são destinados principalmente para a indústria da construção civil, sendo destinados principalmente na região do entorno da mineradora, de tal forma que os custos de transporte não inviabilizem estas comercializações. Estes resíduos são divididos conforme Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Os subprodutos gerados na produção do níquel.

	<p>Pó de Brita: Usado na construção civil, em terraplanagem como material para sub-base, calçamento de piso pré-moldado e paralelo, identificação de rede e drenagem, Usina de asfalto, fabricação de massa asfáltica para recapeamento de estradas, avenidas e estabilizador de solos</p>
	<p>Escória < 0,4 mm: Composição de massas refratárias, polimentos de metais e ligas metálicas.</p>
	<p>Abrasivo 1,4 a 2,4 mm: Jateamento de metais e ligas metálicas. (limpeza, crostas).</p>
	<p>0 a 12,7mm: Enchimento de válvula gaveta em usinas de fundição.</p>

Tabela 3.8 - Os subprodutos gerados na produção do níquel (continuação).

	<p>Brita 0: Usada na construção civil, centrais de concreto, fabricação de concreto convencional e bombeado, Indústria de pré-moldados, fabricação de manilhas, blocos de concreto, meio fio, lajes pré-fabricadas, galpões e postes de concreto</p>
	<p>Brita 1: Usada na Construção civil para edificações de prédios, colunas, vigas e lajes e em Usinas de Concreto para fabricação de concreto convencional e bombeado</p>
	<p>Pedra Bruta: Aplicação: Material com granulometria variável usado na construção civil para calçamento, muro de construção, drenagens, enrocamento e concreto ciclópico.</p>

Fonte: Mineradora Morro Azul - Pratápolis/MG.

3.2.1 - Processos de geração de escória em mineradoras de níquel

As escórias geradas em mineradoras são diferentes de acordo com o processo de resfriamento aplicado. Em todas as minerações, as escórias de alto forno são obtidas de diferentes maneiras, podendo ser originárias de resfriamento brusco em água, resfriamento ao ar e resfriamento na água ou a vapor (MASUERO, 1998). Estes processos interferem de maneira significativa nas propriedades principalmente físicas das escórias. Uma parte considerável está sendo consumida pela indústria cimentícia, no entanto o passivo e uma parte considerável permanece e é depositada em aterros nas mineradoras.

3.2.1.1 - Escória em resfriamento brusco em água

A escória obtida por resfriamento brusco, conhecida como escoria granulada, é previamente fragmentada por jato de água e posteriormente resfriada em um tanque de água onde se granula (LOUZADA, 1991). Ela também pode ser pelotizada através de uma canaleta onde circula uma corrente de água. Daí sua forma vítrea com aproximadamente 0,2 mm de diâmetro, dando origem à escória granulada. No

Brasil, cerca de 88% das escórias de alto-forno são resfriadas de forma granulada. Destas, uma parte está sendo utilizada na indústria cimentícia.

3.2.1.2 - Escória no resfriamento ao ar

Para Bittencourt (1992), a escória é vertida em potes e depois lançada em fossas. Dessa forma ela cristaliza-se devido ao resfriamento lento. Após o resfriamento é procedido a britagem em granulométricas variadas. De acordo com Silva (2006), quando a escória é resfriada ao ar (resfriamento lento), é considerada um material inerte com composição granulométrica variando de 12,5 mm a 150 mm.

3.2.1.3 - Escória no resfriamento na água ou a vapor

A escória de alto forno resfriada é submetida a vários jatos de água sob pressão. Segundo Albuquerque (2005), esse processo faz com que a escória incorpore ar e expanda, formando uma estrutura alveolar. Posteriormente é britada e separada em variadas classes granulométricas. A massa específica desta escória varia entre 0,6 a 0,9 kg/L, sendo, portanto, equivalente a um agregado leve.

3.2.2 - A composição química da escória

A composição química e a estrutura física das escórias podem variar de acordo com a eficiência de operação do forno, do teor de minérios utilizados e do método de resfriamento (MASUERO, 1998).

A escória de ferro-níquel é produzida na fusão do minério de níquel em forno elétrico, onde elementos não metálicos, tais como SiO_2 , MgO e Fe_2O_3 , são granulados na presença de água. Neste processo, são geradas grande quantidade de escória.

Na Tabela 3.9 estão apresentadas as faixas de variação dos elementos químicos que constituem as escórias da mineradora Anglo American em Niquelândia - Goiás.

Tabela 3.9 - Caracterização da escória bruta ferro-níquel de redução, lixiviação e solubilização.

Parâmetros	Amostra Bruta		Lixiviação	Solubilização
	%	ppm	mg/l	mg/l
Silício	43,60		2,80	8,10
Ferro	14,90		0,95	0,19
Alumínio	3,90		< 0,05	< 0,05
CaCo ₃	1,49		26,41	26,41
Mg	1,49		18,92	18,86
Cromo	1,30		< 0,05	< 0,05
Magnésio	0,36		4,60	4,58
Manganês	0,34		< 0,11	< 0,05
TiTânio	0,15		< 0,01	< 0,01
Níquel	0,14		< 0,02	< 0,02
Nióbio		< 5,00	< 0,10	< 0,10
Cobre		106,00	< 0,02	< 0,02
Vanádio		184,00	< 0,01	< 0,01
Zircônio		27,00	< 0,01	< 0,01
Cobalto		66,00	< 0,10	< 0,10

Fonte: Santos (2013) - Adaptada.

Uma das tecnologias para produção de escórias vítreas nas grandes siderúrgicas brasileiras é conhecida como granulação. A granulação da escória de alto-forno foi originalmente introduzida por volta de 1853 por Lange, na Alemanha, e visava facilitar a sua remoção das siderúrgicas (JOHN, 2000). Este processo é similar ao da escória de ferro-níquel. A escória, ainda no estado líquido, é granulada com a presença de água e sofre o resfriamento brusco formando os grãos da escória com granulometria muito pequena similar à da areia, alguns com formas irregulares e outros com formatos esféricos.

3.2.3 - Classificação dos resíduos na mineração do níquel

A destinação de resíduos sólidos está normatizada pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) que os classifica como perigosos ou não perigosos, inertes ou não inertes com relação ao meio ambiente e à saúde pública. O objetivo desta normatização é atender às necessidades de toda sociedade brasileira, protegendo-a contra os malefícios gerados à saúde por produtos e substâncias perigosas e danosas e à

proteção ao meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável. Por esta normativa, a classificação dos resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade da qual se originou, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados.

O ensaio de solubilização é aplicado ao resíduo, o qual é colocado em contato estático com água destilada durante sete dias. Em seguida, é realizada a filtração e o extrato obtido é o solubilizado. A listagem G da NBR 10.004 estabelece valores limites para alguns parâmetros analisados no solubilizado. Portanto, se o solubilizado apresentar características de potabilidade, com exceção dos itens já definidos, pode-se considerar o resíduo inerte - basta um valor acima do limite para o resíduo ser classificado como Classe II A - Não Inerte e o procedimento para realização deste ensaio é estabelecido pela NBR 10.006 - Solubilização de Resíduos.

O ensaio de lixiviação procura determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator. Neste ensaio é considerando que durante a decomposição do resíduo sólido ocorre a geração de compostos que acidificam o meio e promovem a solubilização de várias substâncias. A precipitação pluviométrica propicia o arraste de substâncias entre as quais as consideradas perigosas (metais, matéria orgânica, etc.) para o solo, podendo atingir o lençol freático.

Este ensaio de lixiviação reproduz a condição da decomposição do resíduo sólido através da adição de ácido até obtenção de uma condição de pH 5,0. O resíduo sólido é mantido em suspensão em água destilada, em pH 5,0 e em constante agitação por um período de 24 h. Assim, estabelece-se condição para a solubilização máxima de seus constituintes. O extrato é filtrado e posteriormente analisado, observando a listagem F da NBR 10.004 que estabelece valores limites para alguns parâmetros analisados no lixiviado – basta um parâmetro com concentração acima do limite para os resíduos classificar-se como Classe I Perigoso

sendo que o procedimento para realização deste ensaio está estabelecido na NBR 10.005 - Lixiviação de Resíduos.

As etapas de caracterização dos resíduos sólidos, de acordo com a NBR 10.004, são representadas no fluxograma da Figura 3.7.

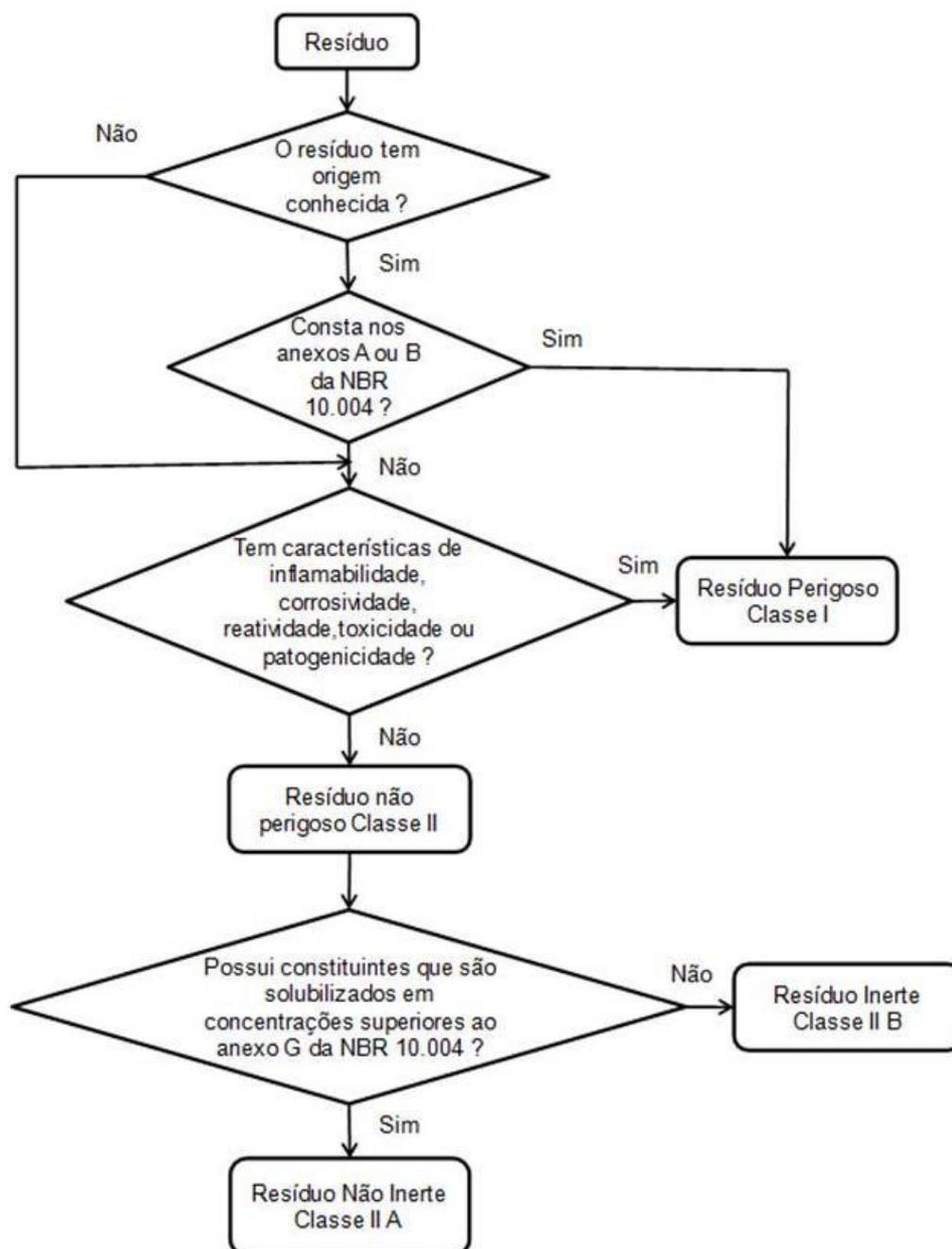


Figura 3.7 - Caracterização e classificação de resíduos sólidos.

Fonte: Normas ABNT (NBR 10.004), 2004 - Adaptada.

Com estes cuidados, dentro dos ensaios de "Lixiviação e Solubilização" que esta norma estabelece, constatando-se que o resíduo é "não perigoso" e "inerte" pode-se propor então a reutilização dos mesmos em diversos elementos da construção civil, gerando economicidade, sobrevida aos aterros sanitários e melhor preservação do meio ambiente. Os impactos gerados pela destinação inadequada de diversos resíduos sólidos geram contaminação do solo, da água e do ar. A Tabela 3.10 contém a classificação dos resíduos de acordo com a NBR 10.004.

Tabela 3.10 - Classificação de resíduos sólidos.

Perigosos - Classe I					Não perigosos Classe II	
D001 Inflamável	D002 Corrosivo pH<2 ou pH>12	D003 Reativo	D004 Patogênico	D005 a D052	Inertes	Não Inertes

Fonte: Norma ABNT NBR 10.004 (2004) - Adaptada.

Os resíduos radioativos, de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear, não são objeto desta Norma.

3.2.4 - O uso de materiais alternativos na construção civil

Com o grande crescimento populacional em todo planeta e com o conseqüente aumento da produção industrial e comercial de bens de consumo, a geração de resíduos desta produção aumentou significativamente nas últimas décadas levando a ocupação de grandes áreas para aterros e provocando enormes problemas ambientais de toda forma. Estes problemas levaram a criação de regras e leis de preservação ambiental como forma de proteção à vida, gerando propostas de redução de resíduos, reutilização quando possível e reciclagem com propostas inovadoras também na construção civil. A reutilização de resíduos pode ser uma forma de gerar economia energética quando se diminui parte da industrialização de materiais, economia de matérias-primas na reutilização de resíduos de toda espécie e redução de custo quando se evita a aquisição de parte de novos insumos para produção de peças para construção civil (ALBUQUERQUE, 2004).

A reciclagem e a reutilização de materiais são pontos prioritários quando se pensa em desenvolvimento sustentável possibilitando a economia de matérias-primas não renováveis, energia e redução de impactos ambientais indesejáveis.

Exemplificando, na região do sudoeste mineiro há uma grande atividade extrativista e comercial da "Pedra Mineira" gerando um descontrole ambiental regional com a geração de grande quantidade de resíduos que provocam assoreamento dos rios e agressão ao ecossistema local. Esta produção de lâminas de pedra mineira provocou uma regulamentação para a extração controlada embora tenha deixado como passivo um volume de resíduo nos locais onde ocorreram e ainda ocorrem esta atividade, gerando trabalhos de pesquisa para a reutilização deste resíduo principalmente como agregado ao concreto para a construção civil, substituindo a areia e também a brita, com a mesma grau de resistência que possuem com as matérias-primas originais, além de tornarem uma boa alternativa para cobertura parcial de estradas rurais. Este exemplo demonstra a capacidade criativa e inovadora do povo quando se encontra frente aos problemas ambientais, sociais e econômicos gerados pelo aumento da atividade na área da construção civil nos últimos anos. Também pode-se salientar diversas propostas como a utilização de lodo proveniente de estações de água, escórias provenientes das mineradoras de níquel, resíduos de extração de pedras como a pedra São Tomé, granitos em geral, refugos de mineração e muitos outros.

3.2.4.1 - Reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD)

A reutilização de RCD como material de construção civil tem sido aplicada em diversos países, não intensamente no Brasil, e teve início na Europa na década de 1940, após a segunda guerra mundial. No Brasil, ainda é uma prática pouco aplicada, especialmente se comparada com países europeus, onde a fração reciclada pode atingir cerca de 90%, como é o caso da Holanda (ZWAN, 1997; DORSTHORST; HENDRIKS, 2000).

A variação da prática de reutilização dos RCD nos diversos países acontece por diversos fatores, como a disponibilidade de recursos naturais, a distância de transporte entre reciclados e materiais naturais, a situação econômica e tecnológica diferente em cada país e a questão da densidade populacional (DORSTHORST; HENDRIKS, 2000).

Embora estejam surgindo empresas interessadas em explorar o negócio de reutilização de RCD paralelo ao negócio de transporte para destinação em aterros, as experiências brasileiras estão limitadas em ações de algumas cidades (PINTO, 2004) cujo objetivo tem sido o de reduzir os custos e o impacto ambiental negativo da deposição da enorme massa de entulho (média de 0,5 t/hab. ano, obtida no meio urbano para algumas cidades brasileiras de médio e grande porte). Algumas cidades como Belo Horizonte (CAMPOS; RESENDE; SINARA, 1994) operam plantas de reutilização, produzindo principalmente material para base de pavimentação. Adicionalmente à reutilização de RCD em canteiro pode ser empregada para a produção de argamassas, aproveitando inclusive a atividade pozolânica conferida por algumas frações cerâmica (LEVY, 1997). A reciclagem de RCD para argamassas e concretos já foi motivo de estudo mostrado-se viável em estudos brasileiros do ponto de vista tecnológico e econômico. Entretanto, a avaliação do risco ambiental não foi avaliada (LEVY, 1997; HAMASSAKI; SBRIGHI NETO; FLORINDO, 1997; BARRA, 1996; MORALES, 2000). A reutilização de pavimento asfáltico, introduzido no mercado em São Paulo nos anos 90 é uma realidade hoje em dia, em algumas cidades brasileiras, viabilizando a reutilização tanto do asfalto quanto dos agregados do concreto asfáltico. Um dos problemas mais graves nos RCD é com relação às características do material, muitas vezes não uniforme e com resíduos que não são oriundos apenas de material de reformas e construções e conseqüentemente, de outras propriedades desses agregados reciclados (PINTO, 2004).

A utilização crescente do gesso na forma de revestimentos, lajes ou placas no Brasil pode ser um complicador para a reciclagem dos RCD, exigindo processos de controle caso não sejam instalados em Centrais de Reciclagem. Já está proposto solução para alguns contaminantes presentes nos RCD (plásticos e madeiras) com o emprego de tanques de depuração por flotação e separadores magnéticos (QUEBAUD; BUYLE-BODIN, 1999); mas, em alguns casos, a retirada das fases contaminantes pode ser algo bem mais complexo, como compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos (MULDER; BROUWER; BLAAKMEER; FRENAY, 2000). Uma solução para a diversificação do conteúdo da composição e das outras propriedades desses agregados pode ser o manejo em pilhas de homogeneização, reduzindo esta variabilidade. O que se sugere, é o emprego dos agregados em diversas finalidades, porém com um adequado controle, permitindo a valorização do

resíduo e não simplesmente destiná-lo para as necessidades de pavimentação, que se considera a menos nobre devido às menores exigências de qualidade (ANGULO,2000). Atualmente, existem ações em desenvolvimento para regulamentar e facilitar a gestão urbana desses resíduos. Alguns itens que estão em discussão nestes grupos:

- Viabilização da deposição legal da fração mineral: com objetivo de permitir o uso da fração mineral sem riscos de contaminação ambiental do lençol freático ou dos componentes reciclados quando utilizados dentro do princípio de reaproveitamento/reciclagem do material e viabilizar o processo de reciclagem com otimização das potencialidades do resíduo. Este processo exige o licenciamento de Estação de transbordo e classificação.
- Desenvolvimento de mercado para reciclados de resíduo mineral: deve prever também a existência de mercado privado para os componentes reciclados. A diversificação de produtos aumenta a possibilidade de consumo dos mesmos, além de que as características de heterogeneidade do resíduo exigem a aplicação em diversas finalidades, sempre com o objetivo de máxima valorização do resíduo para o aumento de competitividade com os componentes tradicionais. Também neste caso, as ferramentas de controle de qualidade e processo precisam ser consideradas.

3.2.4.2 - Reutilização de escória de alto forno

A produção de escórias de alto forno no Brasil no final da década de 1990 foi de aproximadamente 6.500.000 t, das quais 10% destas escórias são resfriadas lentamente e o restante gera material granulado, sendo adequada à reciclagem como aglomerantes. Uma boa parte da escória granulada é destinada para indústria cimentícia. A maior parte permanece sendo acumulada em aterros nos municípios onde é gerada, da mesma forma que a escória de ferro-níquel. Pode-se perceber que as indústrias siderúrgicas consideram as questões ambientais como parte de sua estratégia competitiva, procurando valorizar economicamente seus resíduos, diversificando o seu mercado consumidor, dando destinação apropriada aos resíduos, economizando no processo de armazenamento e melhorando sua imagem como indústria ambientalmente correta. Recentemente este interesse levou à construção da primeira fábrica brasileira de cimento que não dispõe de forno próprio

para a produção de clínquer. Esta fábrica produz cimento CP-III para exportação e venda no mercado interno. Está capacitada a produzir cerca de 700.000 t de cimento ao ano. Atualmente também exporta escória granulada para os EUA. Os efeitos ambientais deste tipo de cimento são substancialmente menores do que os gerados pelo cimento Portland comum, significativamente perceptíveis quando se avalia o ciclo de vida deste novo cimento (CINCOTTO, 1994). Notadamente as emissões ao meio ambiente e o consumo de matérias-primas são reduzidos. É importante salientar o aumento da durabilidade das estruturas de concreto confeccionadas com a adição de escória de alto forno, diminuindo os custos de manutenção dessas obras (ANGULO, 2000).

3.2.4.3 - Reutilização de escória de aciaria

Além das escórias de alto forno, a indústria siderúrgica brasileira produz um grande volume de escórias de aciaria. Este é um resíduo formado na produção do aço, formado a partir de adições de cal virgem, de uma fonte de MgO e CaF₂, cuja finalidade é absorver os óxidos resultantes da reação do oxigênio insuflado no processo com as impurezas existentes. Esta escória é rica em CaO, MgO e SiO₂ (MARQUES, 1994).

Com composições variadas entre as diferentes indústrias e mesmo tipos de aço, estas escórias são expansivas, uma vez que apresentam grandes teores de aço (em alguns casos acima de 20%). Apesar das dificuldades envolvidas no manuseio deste produto, após a remoção mecânica das frações mais ricas em metal, e envelhecimento, dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia indicam que cerca de 38% tem sido recicladas na forma de lastro ferroviário (SILVA, 2006). Devido à falta de critérios de controle adequados à realidade brasileira, a expansibilidade deste tipo de escória tem levado a vários desastres, tanto quando utilizada como base de pavimentação, aterro ou agregado para concreto. Uma preocupação atual do setor siderúrgico é com o desenvolvimento de critérios técnicos para análise do risco de expansão deste produto. Países como Brasil, Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Coreia do Sul já utilizam a escória de aciaria em sub-bases, bases e pavimentação asfáltica como alternativa a agregados naturais como brita e areia de rio (POLISSENI, 2005).

A utilização da escória de aciaria em obras rodoviárias tem algumas vantagens como:

- Substitui os agregados pétreos tradicionais;
- Requer menor utilização de finos durante a compactação da obra por ter maior resistência mecânica;
- Tem melhor comportamento para o efeito da água devido à inexistência de fração fina plástica e conseqüentemente melhor drenagem;
- Permite uma redução de espessura da camada asfáltica sobre base de escória (TAVARES; ODA; MOTTA, 2010).

3.2.4.4 - Reutilização de sucata de aço

O setor siderúrgico gera grande quantidade de resíduos e conseqüentemente procura fortalecer suas ações de reutilização, valorizando-os economicamente, dando destinação apropriada aos resíduos e diversificando seu mercado consumidor, economizando na armazenagem e se colocando como indústria ambientalmente correta. Boa parte do aço destinado a reforço de concreto armado produzido no país é proveniente do processo de arco elétrico, que utiliza como matéria-prima quase que exclusivamente sucata. A reutilização desta sucata permitiu economizar aproximadamente 6.000.000 t de minério de ferro no final da década de 90, evitando a geração mais de 2.000.000 t de resíduos e de cerca de 11.000.000 t de CO₂ (ANGULO;ZORDAN;JOHN, 2000).

3.2.4.5 - Reutilização de cinzas volantes

Cerca de 1,5 Mton de cinzas volantes são geradas pelo setor termoelétrico e outras indústrias que queimam carvão em caldeiras de leito fluidizado anualmente e cerca de 0,36 Mton de cinzas de grelha. As cinzas volantes são comercializadas especialmente para a indústria de cimento, embora existam várias pesquisas para a produção de cal hidráulica e cimentos. Nos mercados inglês e norte-americano existem associações setoriais voltada a promoção e aperfeiçoamento do mercado de produto. A cinza de grelha é integralmente comercializada como agregado ao concreto, especialmente na indústria de blocos de concreto leves e de maior

resistência térmica. Um dos consumidores destes agregados é a Tarmac Topblocks que produz uma linha de blocos chamada HEMETILE, contendo mais de 50% de resíduos, que utiliza como argumento de venda a sua adequação ao sistema de certificação de edifícios BREEAM. O mercado de cinza volante como adição mineral em concretos de cimento Portland possui ainda um grande potencial de expansão. Embora esta prática traga vários benefícios ao concreto, como o aumento da durabilidade, a redução da fissuração térmica, o aumento da resistência, entre outros, o seu emprego ainda é tímido em alguns países. Enquanto na Europa a adição ao concreto alcance os 40%, no Brasil e nos EUA esse percentual não chega à metade deste desempenho (ANGULO; ZORDAN; JOHN, 2000).

3.2.4.6 - Utilização da escória de ferro-níquel

Em 2010, Francklin Junior e Almeida estudaram as propriedades do concreto de cimento produzidos com agregados de escória de ferro-níquel. Compararam um traço de concreto referência com agregados convencionais e cinco traços de concreto substituindo o agregado convencional miúdo pela escória de níquel nos teores de 100%, 90%, 80%, 70% e 60% respectivamente. Concluíram que o traço de concreto com a escória corrigida com o uso de 60% apresentou excelentes condições de trabalho, devido principalmente à forma esférica das partículas da escória, e resistência à compressão compatível ao do concreto utilizado sem escória.

Em 2009, Lima e Zampieron investigaram a escória de níquel como pigmento a ser incorporado na indústria cerâmica. Realizaram ensaios com o uso de um espectrômetro de raios-X a fim de verificar sua composição química e confeccionaram 10 corpos-de-prova em forma de pastilhas com a escória moída em uma prensa hidráulica com pares de temperatura de 600°C a 1000°C com variação de 100°C entre cada amostra, concluindo que até 600°C é possível utilizá-la como pigmento na indústria cerâmica.

3.2.4.7 - Outros resíduos

Algumas pesquisas para incorporação de resíduos em massa cerâmica já foram desenvolvidos no Brasil, ainda em pequena quantidade, embora a geração de resíduos seja considerável, havendo necessidade de desenvolvimento de novos

trabalhos. Estas propostas são mais significativas em países como o Japão e nos países da Europa (MENEZES; ALMEIDA; SANTANA; NEVES; LIRA; FERREIRA, 2007). Como exemplos, pode-se destacar os trabalhos na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Projetos de incorporação de resíduos em massa cerâmica.

Pesquisadores	Ano	Trabalho desenvolvido e conclusão obtida	
Domingues e Uilman	1996	Utilização de pó de aço em até 20% na mistura de argila para fabricação de blocos	Produto que atendeu ao padrão de regulamentos comerciais - classificado como inerte, com processo cerâmico com baixa emissão de gases perigosos.
Elwan	1998	Utilização de escória de alto forno para fabricação de tijolos	Melhorou a resistência à compressão e a densidade aparente quando substituindo 10% de argila
Godinho	2004	Incorporação de vários tipos de vidros, inclusive tubos de TVs na fabricação de telhas cerâmicas	Propriedades físicas atingiram resultados promissores, embora tenha aumentado o custo de produção na moagem dos vidros
Andrade	2005	Incorporação de resíduos de lodo de ETA no processo produtivo da indústria cerâmica	Concluiu que a utilização de resíduos não causa impacto ao meio ambiente
Morete et al	2006	Incorporação de resíduos provenientes de sondagens com alto teor de ferro	Aumentou a retração linear de queima e aumentou a resistência dos corpos de prova
Mello	2006	Incorporação de resíduos de mármore e granito à massa cerâmica	Concluiu que os resíduos de granito propiciam melhor resistência à ruptura e da quantidade de poros no produto
Kaminata	2008	Incorporação de lodo de tratamento de efluente de lavanderia textil com até 25% em massa cerâmica	Com até 15% de incorporação não houve prejuízo às características exigidas dos blocos de vedação
Duarte	2008	Incorporação de lodo de estação de tratamento de esgoto à massa cerâmica	Constatou-se que houve perda de resistência à compressão e aumento da porosidade.
Medeiros	2010	Incorporação de resíduos de casca de arroz, lodo de ETA e cinza de lenha em massa cerâmica	Constatou que em percentual de até 25% da mistura, atingindo uma temperatura de queima de 1150°C, não comprometeu as características desejadas no produto cerâmico

Fonte: Ferreira, (2012) - Adaptada.

Existe uma enorme quantidade de resíduos gerados com potencial de emprego na construção civil e que ainda são ignorados pelo mercado e até pesquisadores brasileiros. Os resíduos derivados do saneamento urbano, ou seja, escória da incineração de lixo urbano domiciliar, o lixo hospitalar e o lodo de esgoto tem perspectiva de apresentar um crescimento acentuado na sua produção no futuro próximo, especialmente nas grandes cidades como São Paulo, onde as áreas de disposição estão se escasseando, além do saneamento do Rio Tietê e Pinheiros (CAMPREGHER, 2005). A reciclagem dos resíduos da produção de adubos, já foi testada no passado no Brasil. No entanto os produtos apresentaram enorme tendência ao desenvolvimento de fungos na fase de uso e a tecnologia foi abandonada. (MARCIANO; KIHARA, 1997).

3.2.5 - O uso da escória de níquel na construção civil

Na região de Passos-MG, especificamente nas cidades Fortaleza de Minas e também na cidade vizinha de Pratápolis, existe uma forte atividade extrativa de níquel, que é utilizado na indústria metalúrgica para produção de aços de alta resistência com aplicações diversas. Nesta produção de níquel, é gerada uma grande quantidade de rejeitos que ao longo dos anos foram armazenados na área das mineradoras, gerando um passivo ambiental enorme. Atualmente iniciativas de aproveitamento de rejeitos provenientes desta atividade extrativa, têm sido propostas, visto que os volumes desta escória, tanto na Mineradora Serra de Fortaleza, quanto na Mineradora Morro Azul, antiga Mineradora Morro do Níquel são bastante expressivos, além de se considerar que estas mineradoras encontram-se com a produção comprometida pelo esgotamento aparente do metal em suas minas, procurando alternativas para disposição do resíduo gerado ao longo dos anos em seus entornos. Tal iniciativa faz vista a aspectos econômicos (investimentos em novos produtos), quanto a razões ambientais (minimização de resíduos). Estes rejeitos denominados “escória de níquel” são gerados em forno elétrico. O rejeito é obtido através da granulação por resfriamento brusco do material fundido a 1450°C. Este material é originado da extração de rochas ultramáficas mineralizadas com sulfetos, e composto, principalmente, de ferro (Fe), silicato (SiO₂), magnésio (MgO) e outros elementos químicos. A produção atual de escória é bastante significativa, gerando aproximadamente 17 t/h, o que reflete em graves inconvenientes ambientais devido ao grande volume gerado e de maiores necessidades de processos para disposição do resíduo.

3.3. A INDÚSTRIA DAS CERÂMICAS VERMELHAS E AS TELHAS

A indústria cerâmica brasileira evoluiu devido à abundância de matérias-primas naturais, pelas fontes alternativas de energia e pela disponibilidade de tecnologias embutidas nos equipamentos industriais, fazendo com que vários produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com considerável quantidade exportada.

O Sudeste e o Sul do Brasil foram as regiões que mais se desenvolveram neste segmento, em razão da maior densidade demográfica gerando maior

demanda, uma atividade industrial e agropecuária mais vigorosa, uma melhor infraestrutura, uma distribuição de renda que gerou receita e conseqüentemente maior procura por estes produtos, associado ainda às facilidades de matérias-primas, acrescentando-se a isso uma melhor oferta de energia e desenvolvimento de novas tecnologias e processos desenvolvidos pelos centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, são nestas regiões onde se tem uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. É importante ressaltar que outras regiões do país têm apresentado um certo nível de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, principalmente nos segmentos ligados a construção civil levando a implantação de novas fábricas cerâmicas nessa região.

Com relação a cursos de cerâmica, existem, em seus vários níveis, um número reduzido de cursos específicos, predominando os cursos técnicos de cerâmica, os de Engenharia de Materiais e os de Pós-Graduação em sua maioria oferecidos nas regiões sul e sudeste.

Dentro do rol das indústrias cerâmicas há o segmento das cerâmicas vermelhas, que na sua grande maioria tem uma tecnologia muito antiga e que por diversos fatores não se empenha em buscar métodos e processos de produção novos, permanecendo ao longo do tempo praticamente como indústria artesanal.

A expressão Cerâmica Vermelha tem significado amplo, abordando aqueles materiais empregados na construção civil como tijolos, blocos, elementos vazados, lajes, telhas e tubos cerâmicos. Em todos os casos os produtos têm coloração basicamente avermelhada proveniente das argilas utilizadas. Calcula-se a existência de milhares de cerâmicas e olarias espalhadas por todo o Brasil com uma grande dificuldade em se obter informações das mesmas, visto que a grande maioria são mantidas por pessoas muito simples e do baixo uso de novas tecnologias e informatização.

Existe uma grande diversidade de formatos e acabamentos para os produtos cerâmicos, em particular das telhas. Acrescenta-se a isto a problemas de terminologia e termos regionais. De acordo com a Associação Brasileira de cerâmicas, a indústria cerâmica movimenta grande quantidade de matérias-primas ao ano, com reflexos nas vias de transportes, e no meio ambiente de lavra de argila. Estas indústrias têm sua ação distribuída em um raio de 250 km em seu entorno, a partir do qual o transporte passa a inviabilizar sua comercialização. Considera-se

para as telhas o alcance maior de 500 km havendo casos de 700 km para telhas especiais. O valor da produção anual é bastante significativo, como mostrado na Tabela 3.12, sendo que essa renda fica nos locais de produção, com enorme importância social na criação de empregos ao propiciar a construção principalmente de moradias.

Tabela 3.12 - Resumo da indústria cerâmica no Brasil.

Unidades Produtivas	11.000
No empregados por unidade	25 a 30
No total empregados	250.000 a 300.000
Materia prima utilizada (ano)	60.000.000 t
Valor Produção anual	2.500.000.000 (US\$)

Fonte: ABC, 2002.

As indústrias de cerâmica vermelha estão espalhadas por todo o território nacional, sendo que mais concentradamente nas regiões do sudoeste e sul do Brasil. Nos últimos anos tem ocorrido uma expansão no nordeste do Brasil. A Figura 3.8 contém a distribuição das cerâmicas vermelhas pelo território nacional em percentual de cada região, segundo o Banco do Nordeste do Brasil – Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE, 2010).



Figura 3.8 - Distribuição das indústrias cerâmicas por região (%).

Fonte: adaptado de ETENE, 2010.

A produção de cerâmica vermelha é uma atividade de grande uso de mão-de-obra e de acordo com a Associação Nacional de Fabricantes de cerâmicas (ANFACER, 2006) a maioria das empresas cerâmicas é de gestão muito simples e familiar tradicional, onde a aquisição de equipamentos mais modernos e de mudança dos processos produtivos, mais sustentáveis, ocorre de forma muito lenta

no decorrer do tempo. Este segmento industrial de cerâmica vermelha, tinha um perfil essencialmente artesanal até o final dos anos 1960. Nos anos subsequentes, experimentou um acelerado processo de industrialização, com uma grande expansão no processo produtivo, a partir da implementação dos programas habitacionais no País.

É fundamental a necessidade de investimentos na melhoria de qualidade e da produtividade dos produtos cerâmicos. A materialização desta tendência ocorre com uma velocidade menor que a desejável. Observa-se a adoção de novas técnicas de gestão, novos equipamentos e uma atuação forte na melhoria do desempenho energético dos fornos de blocos cerâmicos estruturais e de telhas. Dados da Anicer (2007) mostram que o segmento de cerâmica vermelha processava 60.000.000 t de matérias-primas por ano. Por conta de desenvolvimento tecnológico, em 2006, viu-se duplicada a capacidade produtiva, quando foram processadas mais de 120.000.000 t. Entretanto, mesmo com esta forte expansão produtiva, o Brasil ainda apresenta uma baixa produtividade, demonstrando existir espaço para uma maior atuação no aumento da produtividade com a inserção de novas tecnologias e de processos e novas opções energéticas. A produtividade média de 12 – 14 mil peças/operário/mês, que varia de região para região é insignificante em comparação com a produtividade das indústrias da Europa, de 200.000 peças/operário/mês. A mão-de-obra ainda é, em sua maioria, de baixo nível educacional. Os problemas continuam no mercado consumidor, que não é exigente com os produtos e suas especificações. Com este cenário os fabricantes não se preocupam em adaptar suas empresas para demandas maiores, com dimensões padronizadas e qualidade assegurada, para a permanência nos mercados, de acordo com a Associação Nacional da Indústria Cerâmica.

As empresas de cerâmicas vermelhas precisam reduzir as perdas por desperdício e quebras, adotando novas técnicas na fabricação dos produtos, atendendo aos padrões de qualidade estabelecidos por norma e qualificando a mão-de-obra, numa busca constante pela profissionalização do setor. A garantia da qualidade dos produtos de cerâmica vermelha será atingida quando os consumidores passarem a exigir um produto dentro das normas brasileiras, deixando de adquiri-los apenas pelo baixo custo, sem observar a qualidade, desempenho e durabilidade que cada empresa oferece em seu produto (OLIVEIRA, 1993). Esta mudança de cultura permitirá o estabelecimento do cumprimento das

normas a partir da aplicação do código de defesa do consumidor, onde fica estabelecido a obrigatoriedade de comercializar os produtos dentro das normas vigentes no país. Desta forma, os fabricantes passarão a se preocupar com a qualidade dos produtos oferecidos ao mercado.

Neste segmento, o processamento da argila até o produto final é bastante simples, iniciando com a extração da argila da jazida, que é umedecida depois de extraída. Em seguida, ela é homogeneizada e passa pela maromba, onde as peças são moldadas, e, depois, secas e queimadas. Com base nos métodos adotados para a fabricação, determina-se a quantidade de água a ser acrescentada à massa, a necessidade ou não de adição de outros materiais, ou, até, a mistura com outras argilas, objetivando deixar a massa mais adequada para a fabricação do produto cerâmico e melhorar suas propriedades finais. Os produtos da cerâmica vermelha são classificados em função do processo de fabricação utilizado, sendo os produtos extrudados simplesmente e os extrudados e prensados. Entre os produtos extrudados, pode-se citar os blocos de vedação ou tijolos furados, as lajotas de forro, as manilhas e os tijolos maciços, entre outros. No caso dos produtos extrudados e prensados, tem-se, entre os mais representativos, as telhas e os ladrilhos de piso. Os produtores de cerâmica vermelha no País passam por um dilema: ou se adéquam às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e passam a conviver de maneira mais harmônica com o meio ambiente, com a redução da emissão de poluentes e uma exploração sustentada da argila, ou deverão ter dificuldades para continuar na sua atividade. Já existem algumas empresas que estão investindo em tecnologia para aumentar a qualidade dos produtos e sobreviver em um mercado de grande concorrência, onde as questões ambientais começam a ser consideradas. Uma das alternativas, adotadas em algumas empresas em Santa Catarina é a substituição dos fornos tradicionais, abastecidos com lenha e óleo, pelos do tipo túnel, movidos a gás e serragem. Como resultado desta mudança, são os produtos com maior valor agregado e a redução de poluentes. No exterior, este segmento industrial conseguiu melhorias ambientais com a mudança para combustíveis gasosos, melhorias na secagem, emprego de fornos mais eficientes e controle de processo. Procura-se também, as possibilidades de recuperação de calor e seu uso em secadores, resultando em reduções do consumo de energia e decréscimos nas emissões de poluente (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010).

No Brasil, a maioria das empresas produtoras de cerâmica vermelha, utiliza a lenha como principal fonte de calor. O desmatamento de áreas vitais, realizado sem nenhum critério, com vistas à obtenção de lenha, associado à falta de uma prática de reflorestamento das áreas devastadas, ajudam cada vez mais e de forma decisiva o problema da desertificação de alguns polos produtores no País. Em face da diversificação tecnológica existente no Brasil, o consumo de lenha pode variar de 1,7 a 4,1 m³ para a produção de 1000 peças. (BERNI; BAJAY; GORLA, 2010).

Quanto à extração das argilas, as indústrias pequenas ou médias, em geral, não se preocupam com o uso de técnicas de extração adequadas. No entanto, a extração é local e em pequena escala, sem que possuam um plano de recuperação das jazidas exauridas. Mesmo no caso das plantas de grande porte, a degradação é pequena se comparada à extração de outras matérias-primas, como metais e pedras, cuja devastação atinge amplas áreas e a recomposição é de alto custo financeiro. O segmento de cerâmica vermelha possui capacidade de absorver um amplo conjunto de resíduos de outras indústrias, como componentes de geração de calor nos fornos de queima. Essa é uma estratégia adotada pelas indústrias em busca de redução de custos, mesmo desconhecendo a iniciativa ambiental por trás dessa atitude. Resíduos da fabricação de móveis e de serrarias podem ser usados como energéticos, permitindo um encaminhamento útil para tais resíduos, desde que eles sejam provenientes de indústrias que usem madeiras de reflorestamento e não tenham sido tratados com produtos químicos tóxicos. Tem-se, ainda, a geração de resíduos sólidos nas várias etapas do processo produtivo da cerâmica vermelha, os quais usualmente efeito de degradação pode ser monitorado e a área recomposta com facilidade. Já as indústrias de grande porte, cujo impacto é maior, são fiscalizadas constantemente pelos órgãos ambientais, fazendo com que as mesmas utilizem técnicas corretas de extração retornam ao processo, sendo absorvidos nas produções subsequentes. Quando a alternativa anterior não é possível, o resíduo gerado, no caso argila cozida, pode ser descartado na natureza, sem causar danos a ela. O transporte de matéria-prima e a queima de combustível nos fornos e nos secadores são os principais responsáveis pela emissão de CO₂, neste segmento industrial. Quando existe integração espacial entre fonte de matéria-prima, produção e consumo, característica das plantas pequenas e médias, as emissões devido ao transporte são reduzidas. O mesmo acontece no uso da biomassa como energético,

cuja própria produção encarrega-se da assimilação da emissão decorrente de seu uso.

A eletricidade e os combustíveis são algumas das matérias-primas mais importantes em uma fábrica de cerâmica vermelha, independente do seu porte. Na composição dos preços dos produtos, além da intensa mão-de-obra empregada na fabricação e do transporte para entrega dos materiais, o custo energético ocupa uma posição de destaque (ANICER, 2007). Como já mencionado, a maior parte das empresas deste segmento industrial é de pequeno ou médio porte e seus produtos carecem, frequentemente, de uma boa qualidade, sua produtividade é baixa e há substanciais defasagens tecnológicas. Não é de se estranhar, por conseguinte, que se encontrem baixas eficiências de conversão energética na maioria destas plantas. De uma forma geral, os principais consumos de eletricidade ocorrem na moagem, movimentação e queima da cerâmica vermelha, enquanto que os maiores consumos de energia térmica se verificam na preparação de matérias-primas, secagem e queima das peças. A queima é a etapa central deste processo de fabricação, principal consumidora de energia térmica, com aproximadamente 50% do total (ANICER, 2007).

A CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais, realizou, na década de 2008, um levantamento do consumo de energia junto a fabricantes de cerâmica vermelha no Estado, observando uma grande dispersão dos valores encontrados. Em uma amostra de 45 cerâmicas, a CEMIG encontrou extremos com um consumo energético específico de 0,140 kWh/kg a 2,418kWh/kg. o valor mínimo de 0,140 kWh/kg foi obtido em uma indústria que utiliza um forno semi-contínuo (vagão) com melhor desempenho no consumo energético em relação aos fornos intermitentes. (CEMIG, 2008).

Um programa de eficiência energética no âmbito do setor, sem dúvida, tem como pré-requisito a superação de barreiras que dificultam uma maior velocidade em direção à conservação de energia em seu processo produtivo. Entre essas barreiras pode-se destacar:

- I - Estrutura legal pouco atrativa para cogeração ou produção de energia independente.
- II - Necessidade de treinamento de pessoal para identificar oportunidades de eficiência energética e para fazer a gestão dos projetos que se mostrarem viáveis.
- III - Indisponibilidade de determinadas tecnologias.

IV - Racionalização do uso de energia compete com outras prioridades de investimentos.

V - Elevados investimentos iniciais.

VI - Incertezas quanto aos preços de energia e altos custos iniciais dos investimentos devido aos impostos de importação.

VII - Restrições ao financiamento

Um dos Estados brasileiros que mais se destacam na produção de cerâmica vermelha é Santa Catarina, com aproximadamente 1000 empresas no setor (ABC, 2002).

Em Minas Gerais, as cerâmicas vermelhas para fabricação de tijolos e telhas basicamente, estão espalhadas por todo território, como mostrado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - As cerâmicas sindicalizadas distribuídas no Estado de Minas Gerais.

Fonte: SINDICER; SINCOTAP (2015).

Em Minas Gerais, segundo o SINDICER (Sindicato das Cerâmicas), os principais municípios produtores de cerâmica vermelha são Igaratinga, Itaúna e Pará de Minas. A produção do Estado atingiu 2,7 bilhões de peças em 2014, gerando cerca de 12 mil empregos diretos.

As telhas cerâmicas são utilizadas em todo país para coberturas de edificações em geral. A sua massa argilosa é preparada por processo de extrusão com umidade que varia de 20 a 25% na forma de bastões, seccionadas de acordo com o tamanho desejado e depois prensada para dar a forma desejada final. Depois da secagem é queimada a temperaturas que variam de 900°C a 1100°C (SELHORST, 2001).

As telhas não possuem uma padronização a nível nacional, tendo diversas variações de região para região. Certos aspectos importantes como impermeabilização, absorção de água, resistência e outras propriedades são desconsideradas pelos fabricantes (SELHORST, 2001).

Como fator preocupante para a indústria cerâmica vermelha, nos últimos anos tem se observado na indústria da construção civil a substituição da lajota de cerâmica vermelha pelo bloco para laje de isopor e também das paredes de gesso acartonado, das telhas de concreto ou polipropileno, dentre outros materiais. Diante deste cenário, é necessário investir na qualificação de seus produtos, adequando seus processos industriais aos novos padrões de qualidade exigidos pelo mercado.

3.3.1 - Tipos/Classificação de telhas

As telhas cerâmicas são divididas em 4 tipos, conforme a norma brasileira, sendo: telhas planas de encaixe, telhas compostas de encaixe, telhas simples de sobreposição e telhas planas de sobreposição. Pode-se dizer que as cerâmicas, em geral, se especializam em poucos modelos, acrescentando em sua lista de produtos a possibilidade de envernizamento ou não das telhas comercializadas. São diversos os modelos de telhas cerâmicas produzidas em todo Brasil, com maior ou menor aceitação de acordo com cada região, havendo alternativas de cor e grau de queima, proporcionando alternativas para decoração e proteção dos imóveis.

Estas telhas, são comumente oferecidas na cor vermelha, embora sejam bem aceitas comercialmente as telhas de cor branca e com menor frequência as coloridas e as de vidro translúcidas, utilizadas especialmente em locais que se deseja facilitar a entrada de luz no ambiente, embora de custo bastante alto em relação às telhas comuns vermelhas.

As telhas cerâmicas devem apresentar um cozimento uniforme, evitar trincas e empenamentos laterais ou de borda que dificultem os encaixes e facilitem a entrada de água de chuva. A qualidade de cada uma das telhas dos diversos fabricantes deve levar em conta esta uniformidade e a resistência à impactos, observando características geométricas e físicas previstas nas normas técnicas específicas.

Os tipos e os principais modelos utilizados em praticamente todos os Estados do Brasil são os descritos na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Os tipos e os principais exemplos de telhas cerâmicas.

Tipos de Telhas Cerâmicas	Exemplos fabricados	Imagem das telhas
<p>Compostas de Encaixe: Aquelas que possuem geometria formada por capa e canal no mesmo componente, para permitir o encaixe das mesmas entre si. Possuem pinos ou pinos e furos de amarração, para fixação na estrutura de apoio</p>	<p>Portuguesa: Tem mesmo tipo para a peça de capa e do canal. Proveniente das telhas portuguesas da época do Brasil - Colonial. Rendimento de 17 peças/m²</p>	
	<p>Romana: Possui formato característico e com encaixes longitudinais e transversais compondo vedos estanques à água, com rendimento de aproximadamente 17 peças m²</p>	
	<p>Italiana: Tem mesmo tipo para a peça de capa e canal, com rendimento de aproximadamente 13,4 peças m²</p>	
<p>Planas de Encaixe: Aquelas que se encaixam por meio de sulcos e saliências, apresentando pinos ou pinos e furos de amarração para fixação, na estrutura de apoio</p>	<p>Francesa: Ou telhas de encaixe, com baixo custo de fabricação e conforto térmico muito bom. Apresentam encaixes para as telhas laterais e as que se encaixam acima e abaixo dela. Rendimento de 12 peças/m²</p>	
<p>Planas de sobreposição: Aquelas que somente se sobrepõem e que podem ter pinos para encaixe na estrutura de apoio ou pinos e furos de amarração para fixação</p>	<p>Telha Alemã: com dimensões de 0,40 por 0,20 com pinos ou furos de amarração, utilizadas para ambientes de grande variação de temperaturas</p>	
<p>Simples de sobreposição: Aquelas formadas por componentes de capa e canal independentes. A concavidade ou convexidade define a utilização como canal ou capa. O canal deve apresentar, furos ou pinos e furos de amarração, para fixação na estrutura de apoio</p>	<p>Colonial: Tem mesmo tipo para a peça de capa e do canal. Proveniente das telhas portuguesas da época do Brasil - Colonial. Rendimento de 26 peças/m²</p>	
	<p>Plan: Tem características mais retas que as anteriores. Rendimento de 26 peças/m²</p>	
	<p>Paulista: É derivada da telha colonial, com dimensão de largura mais estreita e rendimento de 25 peças/m²</p>	

Fonte: NBR 15310 (2009).

É importante salientar que outros modelos também são conhecidos regionalmente, como a Telha Marselhesa e a Telha Piauí, sendo estas variações pequenas dos modelos da Telha Francesa e da Colonial e não tendo uma comercialização significativa perante às descritas na Tabela 3.13.

3.3.2 - Normas técnicas para telhas

Visando disciplinar o mercado a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) normalizaram as telhas descritas conforme a Tabela 3.13. A normalização (parâmetros máximos e mínimos para dimensões, formas, resistência, impermeabilidade, absorção de água e outras características importantes) é dada por um conjunto de normas complementares entre si. O objetivo é estabelecer condições mínimas para aceitação e controle destes produtos no mercado, através de critérios e métodos de ensaios, permitindo assim a inspeção e consequente aceitação ou rejeição dos lotes de telha a serem adquiridos pelo consumidor.

Alguns índices de qualidade devem ser observados, como cozimento uniforme, superfícies lisas facilitando o escoamento da água, inexistência de fissuras e microfissuras, quebras, esfoliações, rebarbas e deformações que prejudiquem o perfeito encaixe das peças. As telhas cerâmicas precisam estar em conformidade com as normas para atender aos consumidores com a qualidade mínima esperada. As normas vigentes para telhas cerâmicas estão descritas na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Normas para carga, massa, impermeabilidade e flexão vigentes para telhas cerâmicas.

Norma	Ano	Telha Cerâmica	Descrição
NBR 6462	1986	Tipo Francesa	Determinação da Carga de Ruptura à Flexão
NBR 8947	1985	Telha Cerâmica	Determinação da Massa e da Absorção de Água
NBR 8948	1985	Telha Cerâmica	Verificação de Impermeabilidade
NBR 9602	1986	De Capa Canal	Determinação de Carga de Ruptura à Flexão

Fonte: ANICER, 2007.

Como a principal função da telha é evitar a entrada de água dentro da edificação a norma brasileira fixa em 20% o valor máximo permitido para a taxa de absorção de água, que corresponde a quantidade de água absorvida pelo componente após 2 h fervendo imerso em um recipiente.

As normas referentes a telhas (NBR 7172/1987 e NBR 9601/1986) especificam um peso máximo para cada tipo de telha, conforme Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Peso máximo da telha seca segundo as normas brasileiras.

Modelo	Massa (g)
Colonial (Capa ou Canal)	2.700
Plan (Capa ou canal)	2.750
Paulista (Capa ou Canal)	2.650
Romana	3.000
Francesa	3.000

Fonte: ANICER, 2007.

As normas também especificam todas as dimensões destes tipos de telhas, objetivando padronizar a produção, embora até hoje estas especificações não sejam normatizadas, gerando os mais variados tipos de telhas cerâmicas com os mais diversos pesos e medidas. No mercado brasileiro é comum encontrar o mesmo modelo de telha com rendimentos diferentes, por exemplo, um fabricante produz telha portuguesa que rende 15 peças m^{-2} , enquanto outro fabricante produz a mesma telha com rendimento de 17 peças m^{-2} .

Os fabricantes estão sempre tentando diminuir o peso da unidade fabricada e como procedimento adota fabricar um produto com espessura menor, tornando-o mais frágil e não conforme. Desta forma, abre-se campo de estudo para encontrar materiais que possam ser agregados às argilas, mantendo ou melhorando suas características básicas de um produto de qualidade.

As normas brasileiras estabelecem padrões de resistência a flexão, porosidade, permeabilidade, peso, resistência ao gelo, eflorescência e outras. Este padrão de uniformidade e qualidade mínima por norma não é respeitado no Brasil por ter poucas cerâmicas com processos mais rigorosos de fabricação e pelo fato do consumidor não ser exigente a ponto de procurar um produto normatizado.

A Tabela 3.16 contém este comparativo, para as telhas cerâmicas de alguns países que nem sempre são aplicadas pela indústria cerâmica vermelha no Brasil, devido aos diferentes processos produtivos nas diversas cerâmicas de nosso país.

Tabela 3.16 – Comparação entre os requisitos das normas brasileiras e estrangeiras para telhas cerâmicas.

Ensaio	Norma Francêsa (NF P31.301)	Norma Alemã (DIN 456)	Norma Americana (ASTM C1167-96)	Norma Britânica (BSEN 539-2:1998)	Norma Brasileira (NBR)
Resistência a flexão	média > 100 Kgf	média > 150 Kgf	seca: média>178 Kgf sat.:média>133Kgf	x	francesa: 70 Kgf capacanal: 100kgf romana: 130 Kgf
Porosidade (absorção de água)	x	X	Grau1: < 6% Grau2: < 11% Grau3: < 13%	x	Francesa e capacanal:<20% romana:<18%
Permeabilidade	Máximo 0,5 cm/cm após 24 horas	Nenhuma gota pode ser detectada do lado de baixo da telha após 6 horas	x	x	Nenhuma gota pode ser detectada do lado de baixo da telha após 24 horas
Desvio de esquadro	x	Distorção permissível<2%	x	x	x
Planeza das faces	Deflexão máxima = 6 milímetros em 10 amostras	x	x	x	max=5mm
Variação dimensional	x	Desvio máx.=2%	Desvio máx. = 5%	x	2,5% p/ romana 2,0% p/ francesa ou capacanal
Peso	x	X	± 10% do especificado	x	francesa e romana < 3000g colonial<2700 plan<2750 paulista<2650
Resistência ao gelo	x	peça não deve dar sinal de dano após 150 ciclos	Grau1: 500 ciclos Grau2: 50 a 500 cic. Grau3: < 50 ciclos	peça não deve dar sinal de dano após 50 e 100 ciclos	x
Eflorescência	x	x	sem eflorescências de acordo com o método da Norma ASTM C67	x	x

Fonte: ANICER (2007).

Um mesmo tipo de bloco ou cerâmica tem variações bastante significativas, em dimensões, qualidade, resistência, permeabilidade, cor e peso.

3.3.3 - O processo de fabricação das telhas

O processo de fabricação de telhas e blocos é muito semelhante na maioria das cerâmicas, tendo variação na qualidade e precisão das máquinas e

equipamentos e nos processos e transporte de carregamento e descarga no local de destino. O processo industrial de uma cerâmica na fabricação de telhas e blocos pode ser resumido no fluxograma da Figura 3.10.

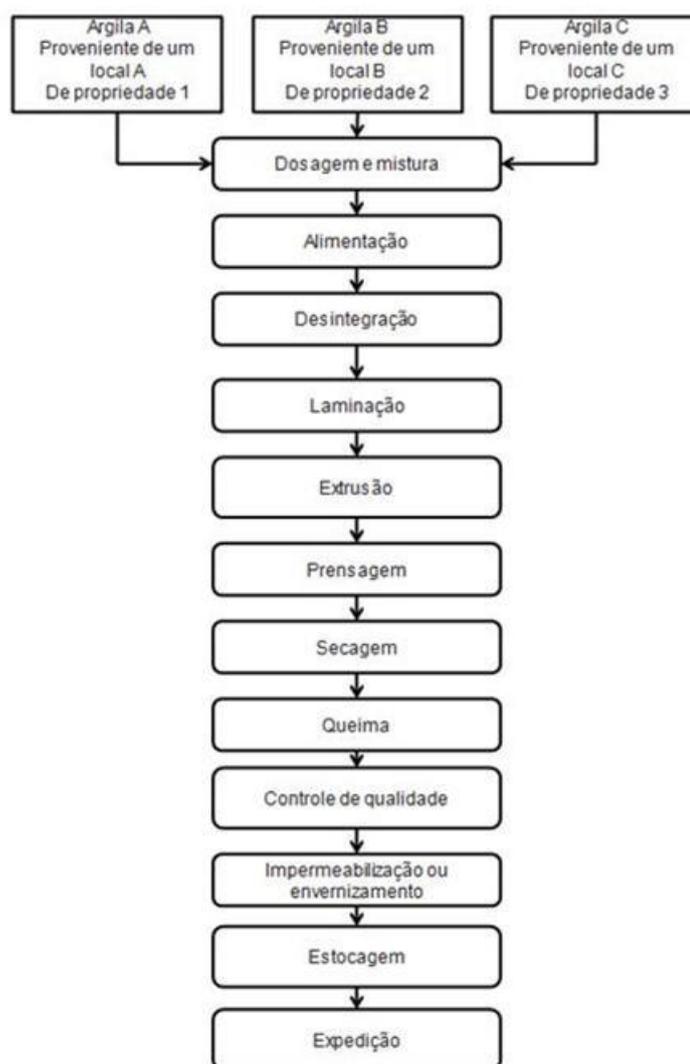


Figura 3.10 - Fluxograma do processo de fabricação de blocos e telhas cerâmicas.

Fonte: ABC (2002).

Também há que se salientar que há cerâmicas que trabalham com 2 ou mais argilas, com objetivo de atribuir uma propriedade mais desejada como por exemplo a cor branca, específica de uma qualidade de argila e do processo de queima aplicado.

O processo produtivo de cerâmicas vermelhas, como os tijolos cerâmicos e as telhas cerâmicas, depende da qualidade do produto desejada, além do porte da

empresa. Existem cerâmicas mais artesanais com processos produtivos mais rudimentares, com administração familiar e empresas mais profissionalizadas com processos tecnológicos bem implantados, com pessoal qualificado e com linha de produção mais adequada a alta produção. O nível de mecanização varia de empresa para empresa e a preparação da massa pode ser variada com a etapa de moagem e a de laminação ser repetida por causa da matéria-prima e os processos de carga e descarga serem manuais ou mecanizados (ANICER, 2007).

O início da fabricação das telhas se dá no momento em que as argilas são dosadas na proporção desejadas, misturadas e colocadas em uma esteira para serem conduzidas ao desintegrador, onde os grandes pedaços de argila são desintegrados e as pedras se existirem, são separadas para não comprometer o processo de extrusão adiante, conforme apresentado na Figura 3.11.



Figura 3.11 - Detalhe da esteira para entrada das argilas misturadas.

Ocorre então o processo de desintegração das argilas, quebrando-as em pedaços menores, conforme Figura 3.12, preparando-a para o processo seguinte.



Figura 3.12 - Detalhe do processo de desintegração da argila.

Após a desintegração, ocorre o processo de mistura para que ocorra a homogeneização das argilas e em seguida para a laminação, que proporciona uma maior homogeneidade à mistura. Esta etapa da mistura das argilas ocorre em seguida à quebra em pedaços menores com adicionamento de água e laminação, conforme Figura 3.13. Nesta etapa é adicionada também as rebarbas de telha que sobraram após a prensagem mais adiante, como forma de reaproveitar o material que sobrou, antes da queima.



Figura 3.13 - Detalhe da mistura e laminação da argila.

Seguindo o processo de produção, ocorre o processo de extrusão, onde se dá a forma do produto cerâmico, por meio da passagem da massa plástica pela abertura da boquilha na maromba e em seguida o corte dos "tarugos", preparando-os para a prensagem e modelagem das telhas a serem fabricadas. O processo de extrusão consiste em fazer a mistura passar, sob pressão, pelo bocal apropriado e se dá a vácuo, liberando os "tarugos" de material que são cortados já no tamanho desejado para a telha, conforme Figura 3.14.



Figura 3.14 - Detalhe da extrusão da argila em forma de tarugos cilíndricos.

A extrusora tem a função de homogeneizar, desagregar e compactar as misturas das argilas, dando a forma desejada. É constituída por uma carcaça metálica, cilíndrica, com eixo interno giratório cujo acionamento se dá por meio de um motor elétrico com sistema de engrenagem ou polias, trabalhando à vácuo, evitando bolhas de ar na massa extrudada.

Um dos problemas que acontecem durante o processo de extrusão é devido à fabricação imperfeita da boquilha e da variação da velocidade da massa que está dentro da extrusora, sendo que o ideal seria ter uma velocidade igual em todas as cavidades do bocal. Este problema é mais acentuado quando da fabricação de tijolos furados e não muito importante quando da fabricação de telhas (CCB, 2001).

O material extrudado sofre imediatamente o processo de corte por fios metálicos, de acordo com o tamanho da peça que se está fabricando. Estes cortadores podem ser manuais ou automáticos. Os fios cortadores são esticados em um quadro móvel e efetua um corte transversal ao bloco de massa que passa pelos roletes (CCB, 2001).

O processo de prensagem ocorre em seguida, após a extrusão e corte, os "tarugos" são levados à prensa para dar o formato final desejado para as telhas, passando nesta etapa a mais um processo manual, conforme Figura 3.15.



Figura 3.15 - Detalhe da prensagem dos tarugos na forma da telha desejada.

Após a prensagem, a telha entra no processo de secagem por meio de evaporação para o meio ambiente da umidade contida no produto extrudado e prensado quando se fala de telhas, sendo empilhadas e colocadas para o processo

de secagem, dentro do ambiente interno de produção, para que não sofra com as intempéries ambientais diárias, aguardando a etapa seguinte que é a da queima em fornos específicos, conforme Figura 3.16. Quando a secagem é acelerada para cumprir a necessidade da comercialização, ocorre retração exagerada provocando a formação de trincas.



Figura 3.16 - Detalhe da secagem das telhas para aguardar a queima.

Pode-se executar esta fase do processo de secagem de duas formas: a secagem natural, onde as peças são deixadas ao ar livre, geralmente dentro do barracão de produção e a secagem artificial, onde os produtos são colocados dentro de secadores e recebem ventilação forçada e ar quente para agilizar o processo de secagem. Este processo reduz a umidade da massa, muitas vezes de 20% para índices abaixo de 6%. Neste momento se faz a seleção de prováveis perda de produtos, ocasionadas por fissuras, quebras ou deformações. As peças descartadas, retornam aos montes de matéria-prima para serem novamente processadas.

Após o período de secagem as telhas são encaminhadas para os fornos para serem queimadas à temperatura que varia de 800°C a 1000°C. Esta é considerada a fase mais importante do processo de fabricação de produtos cerâmicos pois, é onde ocorrem as transformações físicas e químicas necessárias para dar ao produto final as características desejadas. Após a queima, as telhas mantidas nos fornos desligados no período de resfriamento e ao serem retiradas passam a etapa de resfriamento e estocagem externa no próprio barracão de fabricação, conforme Figura 3.17.



Figura 3.17 - Detalhe dos fornos para queima das telhas e tijolos.

Entres os principais tipos de fornos empregados em plantas produtoras de cerâmica vermelha tem-se:

I) **tipo caieira**: com baixo rendimento gerando produtos de qualidade inferior. Utiliza lenha como fonte de energia e é muito utilizado em olarias e cerâmicas muito pequenas;

II) **tipo abóbada**: Com chama reversível permitindo a retenção de calor. Sua capacidade varia de 10 a 50 t. Gera produtos de boa qualidade. É empregada, via de regra, na produção de telhas. Utiliza normalmente a lenha como fonte de energia, podendo ser, no entanto, adaptado para queima de óleo combustível e gás natural. Ao final da queima ar frio é insuflado dentro do forno por ventiladores;

III) **tipo garrafão**: difere do forno abóbada pelo tipo de chaminé;

IV) **forno alber ou paulistinha**: possui capacidade de 70 t e ciclo de queima de 80 h. Sua principal fonte de energia é a lenha. Eletricidade pode ser utilizada em ventiladores insufladores de ar para dentro do forno;

V) **forno Hoffmann**: Seu diferencial principal é a existência de câmaras e o aproveitamento de gases de escape. Possui um sistema de ciclo de carga com ajuste simultâneo da secagem, pré-aquecimento, queima e resfriamento; daí ser chamado de fogo móvel. Esta tecnologia permite um melhor controle da queima, produzindo produtos uniformes e a menores temperaturas do que fornos similares. Sua capacidade pode variar de 8.500 a 70.000 tijolos/telhas por batelada. Além

disso, propicia pequena perda de rejeito. Por outro lado, apresenta um alto custo de implantação e este tipo de forno queima somente óleo combustível ou gás natural.

No processo de fabricação, após a abertura do forno, as telhas são avaliadas, descartadas as que tiverem defeitos pelo processo de queima e armazenadas no próprio ambiente de produção, de acordo com a Figura 3.18.



Figura 3.18 - Detalhe da estocagem das telhas após a queima.

O processo de impermeabilização das telhas vem após a estocagem podendo em casos específicos não ser aplicado, desde que seja de interesse do cliente. Este é um processo em atendimento ao cliente, não sendo um processo essencial à fabricação e comercialização da telha, conforme Figura 3.19.



Figura 3.19 - Detalhe do processo de envernizamento das telhas.

Após a impermeabilização com o envernizamento, as telhas são empilhadas, amarradas e estocadas para carregamento e entrega, conforme Figura 3.20.



Figura 3.20 - Detalhe da estocagem final das telhas.

As etapas finais da produção de telhas são administrativas e descritas como comercialização, controle de qualidade e estocagem final.

A etapa final de expedição e transporte tem sido negligenciada por grande parte das cerâmicas provocando perdas de produtos, chegando ao consumidor com defeitos de quebra e lascas ou trincas perdendo suas características comerciais de uso. O produto quando enviado a granel, segue solto no caminhão de transporte sofrendo os atritos da viagem além do processo individual de carregamento e descarregamento danoso ao produto. No processo de entrega através de pallets, uma certa quantidade é embalada e carregada através de mini-guindastes ou carrinhos transportadores protegendo melhor o produto acabado. Exige-se desta forma que na fase de descarregamento, também haja equipamento apropriado para a retirada do produto no caminhão, o que provoca aumento do custo no processo de transporte e entrega.

No processo de preparação da matéria-prima da Cerâmica Avante, em estudo, as argilas são armazenadas por um período que varia de 6 meses a 1 ano, para que as mesmas obtenham as características ideais para o processamento, além de estocagem para períodos chuvosos garantindo a continuidade da produção. O teor de umidade tem grande influência na eficiência das máquinas, pois se a umidade for mais alta que a desejada, na faixa entre 16% a 25%, a matéria sofrerá apenas o amassamento e não a desintegração. Vale ressaltar que a proporção da mistura depende do tipo de argila utilizada.

As variações do processo de fabricação de telhas dependem da matéria-prima utilizada, da qualidade desejada pelo fabricante, da forma de trabalho e do porte da empresa fabricante. O nível de mecanização muda muito de empresa para empresa.

3.3.4 - Características técnicas das telhas

As características técnicas definem o padrão mínimo de qualidade, segurança e preservação ambiental. A seguir, são listadas algumas características essenciais à telha cerâmica.

3.3.4.1 - Impermeabilidade

Quando submetida ao ensaio para verificação da impermeabilidade, a telha não deve apresentar vazamentos ou formação de gotas em sua face inferior, sendo, porém tolerado o aparecimento de manchas de umidade. A capacidade de infiltração de água nas telhas cerâmicas quando expostas às condições críticas de intemperismo, com o objetivo de verificar se as amostras apresentam vazamentos ou a formação de gotas na sua face inferior (“goteiras”), acarretando a infiltração de água no telhado. As telhas possuem duas faces, a superior, aquela que fica exposta ao ambiente, e a inferior, que fica voltada para o interior da construção. De acordo com a norma brasileira, o aparecimento de manchas de umidade na face inferior da telha é permitido (ABNT NBR 15.310, 2009).

3.3.4.2 - Carga de ruptura à flexão

A capacidade das telhas cerâmicas em suportarem a aplicação de uma determinada carga sobre sua superfície. De acordo com a norma brasileira ABNT, a não conformidade detectada, ou seja, o não atendimento ao valor mínimo de resistência que a telha cerâmica deve possuir, pode acarretar problemas estruturais no telhado e oferecer risco para a segurança do usuário. Além disso, a resistência mecânica das telhas é um aspecto importante a ser considerado também durante o transporte, manuseio e montagem, etapas em que as telhas quebram com maior

frequência, o que representa maiores ônus para os consumidores (ABNT NBR 15.310, 2009).

3.3.4.3 - Dimensões

De acordo com as Normas técnicas brasileiras (ABNT,2005), as características das telhas cerâmicas quanto a sua dimensão são: galga média referente ao atributo da relação entre as telhas; rendimento médio da telha que é a divisão entre 1 m^2 do telhado pela área útil média de uma telha; pinos de apoio que são as saliências na parte inferior da telha, que impede o deslocamento longitudinal sobre o apoio; comprimento de fabricação que é o valor do comprimento indicado pelo fabricante, correspondente ao maior comprimento da telha, representado na Figuras 3.21 e 3.22.

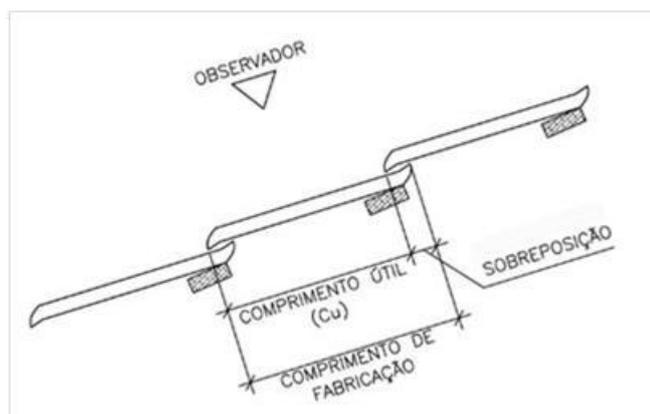


Figura 3.21 - Comprimentos útil e de fabricação de telha cerâmica.

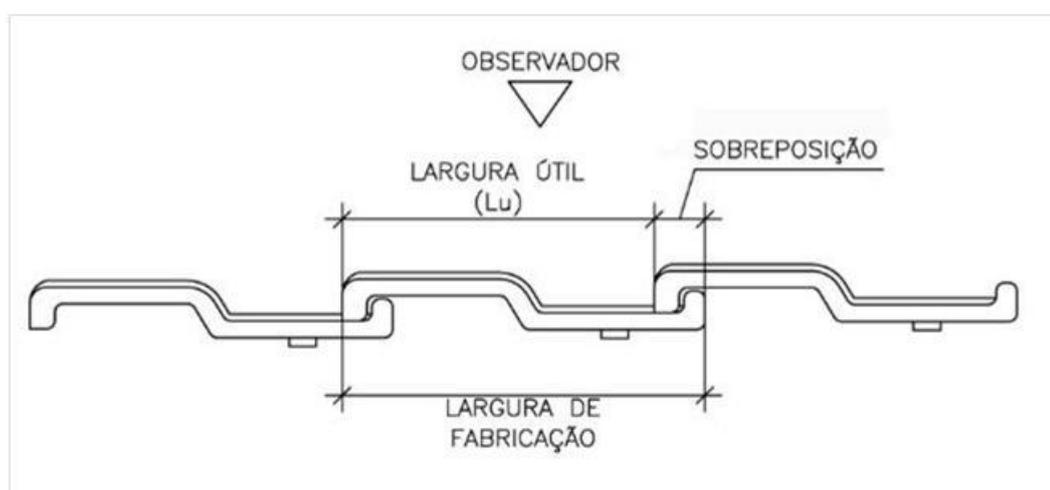


Figura 3.22 - Larguras útil e de fabricação de telha cerâmica.

Fonte: NBR 15.310 - Componentes cerâmicos - telhas.

3.3.4.4 - Geométricas

As características das telhas cerâmicas quanto à sua geometria são:

- Formas e tipos: do ponto de vista geométrico e da sua fixação, características da seção transversal e detalhes de junção entre si na estrutura do telhado. De acordo com a norma NBR 15.310 de 2005, as telhas cerâmicas estão classificadas em quatro tipos: telhas planas de encaixe, telhas compostas de encaixe, telhas simples de sobreposição e telhas planas de sobreposição.
- Retilinearidade: que representa a flecha máxima medida em um ponto das bordas, ou no eixo central da telha no sentido longitudinal ou transversal, conforme Figura 3.23.

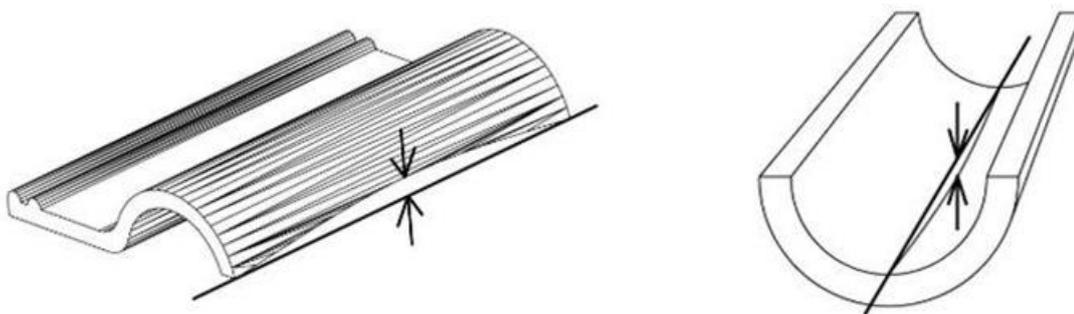


Figura 3.23 - Representação esquemática da retilinearidade das telhas (NBR 15.310, 2009).

- Planaridade: De acordo com a NBR 15.310/2009, a planaridade representa a flecha máxima medida em um dos vértices da telha, estando os outros 3 vértices apoiados em uma superfície plana horizontal, conforme Figura 3.24.

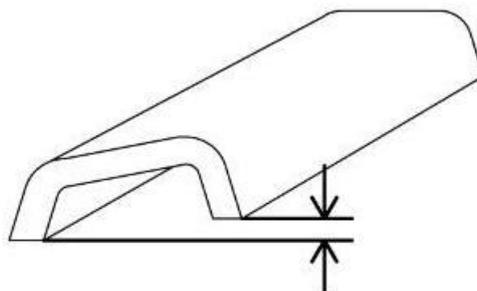


Figura 3.24 - Representação esquemática da planaridade das telhas.

3.3.5 - Estudos de incorporação de resíduos em telhas cerâmicas

A utilização de resíduos na composição da massa cerâmica tem sido motivo de vários estudos no Brasil e no mundo. Na maioria dos trabalhos desenvolvidos, o foco não tem sido apenas o da destinação do resíduo, qualquer que seja ele, mas uma forma de melhorar as propriedades mecânicas dos produtos cerâmicos queimados.

De acordo com Ferreira (2012), a adição de percentuais variados de 10% a 30% de pó de pedra de granito, de cinza de caldeira de biomassa e de lodo de estação de afluente da fabricação de papel e celulose foram motivos de estudo, classificando os resíduos segundo a norma NBR 10.004 e obtendo resultado favorável para o pó de pedra, sendo que os outros resíduos não atenderam ao quesito de absorção e resistência à tensão exigida pela norma.

Dominguez e Ullman (1996) testaram pó de aço em mistura de massa argilosa a 20% da mistura, demonstrando que esta adição atendeu ao padrão comercial, sendo inerte para os testes ambientais com baixa emissão de gases perigosos.

Holanda, Santos e Souza (2002), adicionaram borra de petróleo com máximo de 20% da mistura da massa cerâmica, obtendo resultados que mostram que a borra apresenta potencial para ser utilizada como constituinte de massas argilosas para fabricação de produtos de cerâmica estrutural.

Em 2004, Oliveira, adicionou resíduo de siderurgia com variações de até 30% na massa, constatando haver viabilidade do uso na massa obtida. Godinho (2004) introduziu vários tipos de vidros na fabricação de telhas cerâmicas, obtendo uma mistura com resultados promissores, pois, os estudos das propriedades físicas atingiram resultados satisfatórios. Andrade (2005) introduziu resíduos de lodo de estação de tratamento de água, no processo produtivo de uma indústria cerâmica, misturou lodo primário e secundário de estação de efluente da produção de papel e celulose em até 10% da massa cerâmica, obtendo resultados satisfatórios neste limite de mistura.

Em 2006, foram realizadas várias misturas de pó de jateamento de vidro, resíduos de areia de fundição e argila com uma massa argilosa para fabricação de tijolos e telhas, sendo patenteada como um novo tipo de cerâmica (TOLEDO, 2006). A utilização de resíduos do beneficiamento de caulim e serragem de granito na

produção de blocos e telhas cerâmicas mostrou ser viável em percentual até 50% da massa (MENEZES; ALMEIDA; SANTANA; NEVES; LIRA; FERREIRA, 2007). REIS (2007) adicionou 4 resíduos à massa cerâmica sendo: escória de alto-forno, resíduo de efluente da indústria cerâmica de revestimento, lodo de efluente e resíduo de vidro, constatando que é viável esta destinação. Comprovou a viabilidade técnica da adição de cinza de alto-forno cerâmico em massa cerâmica estrutural, apresentando melhor desempenho com 10% de cinza à temperatura de 1150°C, obtendo menor absorção de água e maior resistência mecânica à flexão.

O reaproveitamento de resíduos da construção civil, na mistura de massa cerâmica em concentração de até 30% em peso, sinterizados em faixas de 950°C a 1150°C levou à conclusão de que não houve perdas na resistência mecânica (Silva, 2006). Vieira e Emiliano (2013) desenvolveram um trabalho de incorporação de argilite em pó, comum em Itu/SP, em massa cerâmica para produção de telhas cerâmicas, demonstrando que esta incorporação melhora as propriedades das telhas produzidas em Campos dos Goytacazes/RJ num percentual de até 30% nas temperaturas de 800°C a 1050°C. Boaventura (2012) apresentou estudos sobre a utilização de rejeitos na produção de tijolos de vedação, tendo focado a questão da sustentabilidade no setor. Dados do IBGE 2008, apresentados pela autora, mostram que a produção de tijolos no Brasil chega a 4 trilhões de peças por mês (10.000 t). Desse total, cerca de 4 a 5% são perdidos no processo de produção. Boaventura apresentou as vantagens da reutilização dessa perda, reduzindo impactos ambientais e os custos da produção, além de agregar valor à cadeia produtiva (MAIA, 2012).

Oliveira (2002), desenvolveu um trabalho de identificação e utilização de resíduos siderúrgicos pelas indústrias de cerâmica. Seu estudo teve o objetivo de avaliar a eficiência energética da cerâmica vermelha. Foi realizado o cálculo energético de 45 empresas na abrangência da Superintendência Regional de Regularização Ambiental (Supram) Central, revelando que as indústrias precisam de investimento em tecnologias para o processo de queima da cerâmica. “De modo geral a indústria de cerâmica vermelha em Minas Gerais apresenta baixo nível tecnológico e muitas vezes não tem conhecimento efetivo das temperaturas aplicadas durante o processo de queima”, afirmou, completando que “o uso do resíduo siderúrgico na queima da cerâmica é um fator de redução energética, tanto no uso da biomassa quanto no tempo de queima dos produtos cerâmicos”.

Como se pode constatar, observando os diversos estudos realizados, a incorporação de escória, proveniente de mineradoras de níquel, surge como uma boa opção de estudo deste trabalho, visto que o resíduo é mantido estocado em grande volume, sendo que as destinações atuais não são suficientes para o volume armazenado ao longo dos anos.

3.4 - AS ARGILAS

As argilas são a principal matéria-prima para a fabricação de blocos e telhas cerâmicas sendo encontradas em grande quantidade e em todos os lugares do mundo. As argilas são provenientes das transformações ocorridas nas rochas primárias por meio de fraturamento, deposição, transformações químicas, contato e oxidação. Estas ações de fraturamento ocorreram devido aos resfriamentos da terra, aos desabamentos de morros e montanhas, expondo novas superfícies e também pelas erosões provocadas pelas águas e ventos. As deposições de materiais de diversas procedências, formaram depósitos pela ação de transporte de água provocando separação nas partículas pelo peso e pela dimensão. As alterações climáticas periódicas, o fluxo das águas e dos ventos e outros fenômenos naturais caracterizaram a formação de camadas de depósitos de argilas.

As transformações químicas provocadas pelas altas temperaturas e pressões provocadas pelos fenômenos naturais contribuíram para a formação das argilas no decorrer do tempo. O contato e a oxidação entre os elementos das superfícies desagregadas provocaram alterações com o tempo. O contato entre partículas de substâncias diferentes originadas pela degradação de elementos diversos da natureza, ao longo do tempo, foram se fundindo e interagindo contribuindo para a formação dos bancos de argila (CHIARA; BORRONI; CHIARA, 2000).

A argila é uma mistura de vários minerais, chamados argilominerais, com partículas de tamanhos diversos. Caracteriza-se por possuir elevado teor de partículas de tamanho inferior a 2 μm , com capacidade de formar uma massa com grande plasticidade quando misturada com água, tornando-se rígida quando seca e quando submetida a uma temperatura elevada, superior a 900°C adquire uma elevada dureza (GOMES, 1988).

Muitas vezes encontram-se argilas mais puras com apenas um tipo de material argiloso ou predominantemente com um material determinado, como no

caso do feldspato, que aparece em grande quantidade e variedades formando diversos tipos de argilas (NORTON, 1973). O termo feldspato derivada do alemão feld (campo) + spath (pedra). É designação de um dos grupos de minerais mais importantes pois perfazem o maior volume da crosta terrestre em cerca de 60%. Constitui na principal base de classificação das rochas magmáticas e está ausente apenas em algumas rochas ultramáficas e em raríssimas rochas alcalinas. Os feldspatos são os constituintes mais importantes dos pegmatitos simples e são comuns nos filões. São os constituintes principais da maioria dos gnaisses e xistos e ocorrem também em muitas rochas geradas por metamorfismo termal, regional e dinâmico. Por meio das intempéries formaram-se argilas residuais onde ocorreu a decomposição química das rochas. Neste processo encontram-se soluções ácidas e alcalinas, juntamente com álcalis, alumina, sílica e outros elementos que formaram a argila ao longo do tempo.

A construção civil é um dos setores produtivos que mais consome produtos fabricados com argila em várias finalidades. Para a fabricação de tijolos e telhas, as argilas precisam ter uma plasticidade suficiente para serem moldadas, podendo-se usar argilas provenientes de cavas superficiais ou profundas (NORTON, 1973).

As indústrias cerâmicas devem ser localizadas próximas aos centros consumidores e não distantes das matérias-primas para fabricação de seus produtos. As indústrias empregam uma ou várias argilas na composição da massa a ser utilizada, objetivando melhorar alguma de suas características como cor, resistência ou impermeabilidade. Argila é definida como um material encontrado na natureza, terroso, com granulometria fina que, quando umedecido adquire uma plasticidade específica (SANTOS, 1989).

Segundo a ABC (2002), as argilas para a fabricação de cerâmicas vermelhas devem ser de fácil desagregação, ter granulometria fina, possuir teor de matéria orgânica que possa, juntamente com a granulometria conferir a ela boa resistência mecânica e boa plasticidade, suficiente para permitir o seu manuseio de acordo com as peças que se deseja fabricar, enquanto estiver no seu estado cru, sem a queima.

A composição mineralógica é composta de caulinita com illita, caulinita com montmorilonita ou esses minerais em camadas mistas, além de um teor de ferro considerável (SANTOS, 1989).

A grande maioria das argilas possuem impurezas que se misturaram durante sua formação. Enquanto alguns destas impurezas são constituídas de resíduos

minerais de rochas originais, outras se juntaram às argilas durante seu transporte, pelas águas. Os minerais mais comuns são o quartzo, os feldspatos, os calcários, pirita, ilita, hematita entre outros. Estas impurezas agem alterando certas características como cor, retração, dilatação, resistência mecânica e plasticidade nas argilas (MONTEIRO; FRANCO; PINATTI; BARBOSA; SOUSA; CARVALHO, 2007).

A cor avermelhada presente nos tijolos e telhas é devido à presença da oxidação de compostos de ferro liberados no processo de queima, sendo mais ou menos intensa principalmente pela maior ou menor quantidade de ferro contida na argila (ABC, 2002).

3.4.1 - Tipos de argilas

De acordo com Santos (1989), as argilas podem ser classificadas em 7 tipos, descritos a seguir.

3.4.1.1 - Argila da China ou Caulim

De coloração esbranquiçada, utilizada na fabricação de porcelanas, com temperatura de fundição próxima a 1800°C, sendo pouco plástica, devendo ser moldada em moldes ou formas.

3.4.1.2 - Argila Bentonita

De grande plasticidade, originária de cinzas vulcânicas, com aparência e sensação de tato untosa e quando em presença de água pode aumentar de 10 a 15 vezes seu volume. Quando adicionada a outras argilas aumenta a plasticidade da massa e tem temperatura de fundição em torno de 1200°C,

3.4.1.3 - Argila de Grês

Argila de grande dureza, com temperatura de queima elevada, utilizada para fabricação de porcelanas. Apresenta coloração avermelhada, branca, cinza preta e outras. Após a queima tem alto grau de impermeabilização, tornando-se vitrificada e opaca. A temperatura de fundição gira em torno de 1200°C a 1300°C.

3.4.1.4 - Argila Vermelha

É uma argila muito heterogênea, dependendo da região onde é extraída. Possui grande plasticidade, tendo em sua composição química alguns minerais. Quando queimadas a temperaturas de no máximo 1100°C adquire coloração que varia do creme ao avermelhado, dependendo do grau de óxido de ferro que possui. As argilas vermelhas são formadas por argilas ferruginosas.

3.4.1.5 - Argila Refratária

Tem esta denominação devido à sua qualidade de resistência ao calor. Tem características físicas variadas, sendo algumas muito plásticas e finas e outras nem tanto. Utilizadas na produção de peças refratárias para utilização de isolantes e revestimentos para fornos.

3.4.1.6 - Argila Flint-Clay

Argila dura e refratária, de difícil desagregação em água e com pouca plasticidade em condições normais de trabalho. Encontrada na região de Montes Claros, Minas Gerais.

3.4.1.7 - Argila tipo "Ball-Clay"

Com elevada plasticidade, de granulometria bastante fina e refratária, apresentando cores diversas como o marfim, creme-claro ou branca após a queima. Produz uma peça cerâmica de baixa absorção de água após a queima.

Comercialmente, a cor original da argila não é importante, pois esta geralmente se modifica após a queima. O que interessa, além da cor após a queima em temperaturas pré-estabelecidas são as propriedades físicas e mecânicas que ela adquire e transfere ao produto final (LOYOLA, 1998). Normalmente as argilas utilizadas nas cerâmicas vermelhas têm coloração preta, vermelha, marrom ou amareladas, sendo que a temperaturas de aproximadamente 900°C adquirem cor avermelhada e em temperaturas de 1250°C adquirem cor marrom ou preta (super queima).

De acordo com a região em que a argila é encontrada, recebem diferentes designações, sendo que as mais utilizadas na região Sul e Sudeste do Brasil, são: argila de Várzea, argila de Morro e a argila tipo Taguá.

A argila de Várzea é aquela encontrada as margens de rios e alagados, com textura terrosa, esfarelada e em torrões, com granulometria fina e contribui para uma elevada plasticidade quando umedecida. Tem coloração acinzentada ou preta e quando sofre o processo de queima, dá ao produto uma cor avermelhada. A matéria orgânica em sua mistura é responsável, quando em teores elevados, pelas perdas e contração do produto durante a queima. Nesta argila, em geral, encontram-se quartzo, mica e matéria orgânica, sendo que esta pode ser responsável, quando em quantidade elevada, pela perda de contração durante o processo de queima.

A argila de Morro é encontrada fora dos rios e dos alagados, tendo textura terrosa, granular ou em blocos e quando retirada se apresenta em pequenos fragmentos. Tem baixa plasticidade e a cor normalmente é avermelhada ou alaranjada após a queima. Na sua composição encontram-se normalmente quartzo, e as vezes, feldspato como impurezas e uma quantidade pequena de matéria orgânica. É comum encontrar, nestas argilas a presença de seixo, cascalhos e carbonatos.

A argila tipo Taguá é encontrada em camadas mais profundas sob rios ou na base de morros. É caracterizada por camadas finas e muito duras de materiais argilosos de cores variadas, predominantemente vermelha ou cinza. Para se retirar esta argila, se faz necessário o uso de equipamentos mais pesados e detonação com explosivos quando necessário. Quando seca deve ser moída antes de ser misturada com outra argila no processamento dos produtos cerâmicos que constituirá.

Toda indústria cerâmica deve, ao iniciar a extração de argila de um local, fazer a análise granulométrica do material. Porém sabe-se que este procedimento nem sempre é feito e a escolha segue em principio a experiência do oleiro.

As extrações são feitas ao tempo e cada indústria cerâmica tem suas jazidas próprias. Em algumas regiões, se formam cooperativas para esta extração barateando o custo para cada participante, pois os equipamentos para tal passam a ser compartilhados. As escavações são feitas com retroescavadeiras e o transporte é feito por caminhões basculantes. Para se iniciar a remoção da argila, o terreno deve ter sua camada vegetal retirada.

Na indústria, as diferentes argilas são armazenadas por um longo período a céu aberto obtendo com isso as características adequadas para seu processamento. Dá-se o nome de sazonalidade a este armazenamento inicial. Com as mudanças do tempo com sol, chuva, frio e calor a argila melhora sua plasticidade, homogeneiza a umidade e alivia as tensões dos seus pedaços.

Cada tipo de argila é separado em montes diferentes de acordo com suas características a serem usadas na fabricação dos produtos da cerâmica. Após o período de sazonalidade as argilas são depositadas em pátio coberto, evitando assim o excesso de umidade provocada pela chuva ou por ressecamento provocado pelo sol. Geralmente é depositada já misturada com as argilas que vão compor o processo de fabricação dos produtos na proporção aplicada por cada indústria.

3.4.2 - A granulometria das argilas

A granulometria das argilas é determinada com o uso de um jogo de peneiras e a medida que os grãos vão se situando abaixo do limite inferior do peneiramento mecânico, as partículas passa a ser classificadas de acordo com a velocidade de sedimentação em meio aquoso (VAN VLACK, 1973).

Os valores da composição granulométrica dos produtos de cerâmica vermelha são mostrados na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Composição granulométrica (%) em relação aos tipos de produtos.

Tipos de Produto	Composição granulométrica(%)		
	< 2 μm	de 2 a 20 μm	> 20 μm
Materiais de qualidade com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
Telhas e capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

Fonte: Pracidelli e Melchiades (1997).

No ensaio de caracterização das argilas, é necessário ter conhecimento de sua granulometria, pois assim tem-se conhecimento da variabilidade de suas propriedades micrométricas, de sua utilização tecnológica mais apropriada, de seu grau de compactação e da massa que será originada. Quanto menor for a granulometria de uma argila, mais plástica ela será (SANTOS, 1989).

A distribuição granulométrica será adequada quando suas partículas grossas e finas se agruparem de tal forma que nos espaços vazios entre elas passe apenas o líquido que garante a trabalhabilidade da massa (NIZOLLA, 1985; PATIRE NETO, 1994).

3.4.3 - A composição química das argilas

A caracterização química das argilas é feita por meio de análises químicas cujas determinações usuais são: a umidade, a perda ao fogo, os elementos químicos, as matérias orgânicas, a capacidade de troca de cátions e a identificação dos cátions trocáveis (SANTOS, 1989).

Estas análises, complementada com difração de raios-X e análise térmica diferencial (ATD) deverão ser realizadas antes de se iniciar a exploração de uma jazida e anualmente para se ter noção do material que está sendo disponibilizado. (IPT, 1986). Estas análises químicas servem para identificar a presença de minerais que possam inviabilizar a utilização desta argila, como para constatar a presença de calcário e/ou gesso, pois possibilitam o surgimento de trincas dos produtos no processo de queima, gerando perdas ao fogo e baixa resistência ao produto queimado (MÁS, 2002).

Em ensaios de composição química de algumas argilas, percebeu-se a predominância de óxido de sílica e de alumínio, na maior parte combinados, formando as estruturas dos aluminossilicatos como a caulinita e mica muscovita. Observou-se também que as argilas apresentam elevados teores de óxidos corantes como o Fe_2O_3 e TiO_2 , que provocam a cor avermelhada após a queima. A Tabela 3.18 contém a composição de 4 argilas da região central do Rio de Janeiro.

Tabela 3.18 - Composição química de argilas da região central do Rio de Janeiro.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	TiO_2	CaO	MnO
Argila 1	45,92	37,09	9,14	2,94	2,08	1,75	0,73	0,16
Argila 2	48,10	37,57	7,54	1,78	2,23	1,58	1,15	0,05
Argila 3	46,75	39,36	7,91	1,99	1,66	1,72	0,47	0,00
Argila 4	44,30	38,68	10,46	2,11	1,66	1,75	0,59	0,10

Fonte: Almeida e Silveira (1990).

Os componentes mais importantes encontrados na composição química das argilas são representados na Tabela 3.19, com suas características e teores.

Tabela 3.19 - Componentes importantes das argilas e suas principais características.

Componentes mais importantes das argilas	Composto	Característica básica	Teor na mistura
Caulinita	$\text{SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Forma dos argilominerais, com presença de grãos de areia, óxido de ferro e outros elementos, sendo que apresenta alta retração, quando muito plástica e infundível quando muito pura.	
Óxido de ferro	Fe_2O_3	Identificado nas rochas ígneas, provocando a cor vermelha na maioria das argilas quando misturado com caulinita. Reduz o refratário.	Próximo de 7%
Sílica livre	SiO_2 /areia	Evita o trincamento das peças produzidas, quando presente, com a redução da plasticidade e retração na etapa de secagem. Faz ocorrer o vidrado endurecedor tirando um pouco a resistência das peças.	Entre 40 a 80%
Alumina	Al_2O_3	Faz com que o ponto de fusão da argila varie, dependendo de como aparece na mistura. Reduz a plasticidade e a resistência mecânica. Reduz as deformações.	Entre 10 e 40%
Álcalis		Abaixa o ponto de fusão e dá porosidade, facilitando a secagem e o cozimento das peças na queima. Reduz a plasticidade	Próximo de 10%
Cálcio	Ca	Age como fundente e clareia a cerâmica	
Sais solúveis		Podem provocar eflorescência no material cerâmico, sendo nocivo a ele.	
Cal	CaO		Abaixo de 10%
Magnésia	MgO		Abaixo de 1%
Água	H_2O	Está presente por absorção ou inchamento. Faz parte da estrutura das moléculas. Quando aderida às paredes das partículas ou quando preenchendo os poros e vazios define a plasticidade da massa.	

Fonte: Paschoal (2003) - Adaptada.

3.4.4 - A composição mineralógica das argilas

As argilas para fabricação de cerâmicas vermelhas são compostas basicamente por sílica, alumina e água, cujas características apresentam aspectos de coesão, plasticidade, trabalhabilidade e resistência mecânica a seco e quando queimada. As impurezas mais significativas encontradas são: a areia grossa, os seixos, os restos de madeiras, os fosséis e substâncias químicas variadas.

3.4.5 - A capacidade de absorção de água pelas argilas

As argilas, quando umedificadas, assumem quaisquer formas ou deformação, quando sob ação de uma força externa, tornando-se altamente atrativas pela sua

maleabilidade e possibilidade de conformações diversas. Quando seca, ocorre o endurecimento da massa, apresentando uma capacidade grande de coesão, atingindo consistência rochosa quando submetida a aquecimento próximo de 900°C. Há possibilidade de reversão deste fenômeno quando a temperatura de queima não tenha passado de 400°C. As argilas se apresentam de várias formas, mas possuem aspectos semelhantes quando na presença de água, diferenciando apenas nas composições mineralógicas e químicas. Na cerâmica vermelha a argila é constituída por famílias argilosas que são caracterizadas pelas extrema finuras das partículas que não superam a 20 micra e na maioria das vezes abaixo de 2 micra. Na Tabela 3.20 apresenta-se a interpretação dos resultados de ensaio de absorção de água e as características observadas.

Tabela 3.20 - Relação entre absorção de água em porcentagem (%) e as características estimadas da argila para conformação de produtos.

Absorção de água (%)	Característica estimada da argila para conformação de produtos
10 - 14	Fundente com boa resistência após a queima
14 - 16	Capacidade média de fundente
16 - 18	Capacidade fundente fraca - quebra de transporte
28 - 25	Matéria-prima inviável para fabricação de produtos cerâmicos - possível presença de calcário e gesso

Fonte: Más (2002).

Os valores máximos de absorção de água utilizados para a determinação da adequação de argilas são no máximo de 20% para telhas e 25% para blocos e outros produtos (SANTOS, 1989). A baixa absorção de água em uma argila indica fundente e elevada resistência após a queima (MÁS, 2002).

Há relação entre proporção de água e retração na massa argilosa para fabricação de produtos cerâmicos, entre a plasticidade e a retração e entre estas e a resistência do produto, sendo que as mais plásticas possuem maior resistência mecânica (CHIARA; BORRONI; CHIARA, 2000).

A umidade de extrusão é determinada quando a massa de argila umedecida e homogeneizada passa a ter condição de ser extrudada para confecção dos corpos-de-prova. Esta umidade da massa é determinada experimentalmente e não deve ser inferior ao limite de plasticidade (IPT, 1986). Este teor de água é expresso em

porcentagem de argila seca a 110°C com cilindros de 3 a 4 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento. Quando se tem dificuldade de se enrolar estes cilindros, sem teor de água, diz-se que estas argilas são consideradas não plásticas (SANTOS, 1989).

Segundo o IPT (2004), a determinação, controle e manutenção da umidade de extrusão e o conhecimento da quantidade de água que deve ser evaporada no processo de secagem trazem importantes benefícios ao processo produtivo. A avaliação dos resultados de ensaio de umidade, segundo MÁ S (2002), está representada na Tabela 3.21.

Tabela 3.21 - Interpretação do ensaio de umidade de extrusão.

Umidade de extrusão (%)	Interpretação do resultado
24 a 28	Há excesso de plasticidade com tendência a trincas, exigindo maior tempo de secagem e maiores custos consequentemente.
22 a 24	Intervalo razoável para a extrusão.
18 a 22	Intervalo conveniente contra trincas.

Fonte: Más (2002).

A dosagem de água deve ser feita por ajuste manual ou automático, sendo que a sugestão do IPT é pela pulverização. O método de ajuste automático, faz o controle sistemático da umidificação, operando por computador, antes da entrada da maromba, ajustando a água de acordo com o necessário (MÁS, 2002). Esta não é a realidade da maioria das indústrias cerâmicas vermelhas no estado de Minas Gerais.

No processo de prensagem, a umidade deve estar numa faixa de 5 a 15%, devendo ser mantido para se evitar trincas, empenamento e falhas no procedimento de moldagem (IPT, 2004).

3.4.6 - A plasticidade da massa argilosa

A plasticidade de uma massa de argilas é a capacidade que esta tem de se deformar com a aplicação de forças e ao mesmo tempo de se manter, quando esta força for retirada. A plasticidade é resultante das forças de atração entre as partículas argilominerais e da ação lubrificante da água entre as partículas

lamelares. Quanto menor for a granulometria destas partículas, maior será a plasticidade da argila (SANTOS, 1989).

O fato de conhecer uma argila, facilita a sua preparação e moldagem, visto que quanto maior a plasticidade, mais água será necessária para extrudá-la, acarretando em uma maior retração das peças, conseqüentemente (IPT, 1986). A plasticidade muito grande de uma argila aumenta a coesão e a resistência interna da massa, dificultando o deslizamento entre as partículas, diminuindo o atrito da massa sobre superfícies metálicas e criando problemas no processo de extrusão, pois a argila passa mais rapidamente pelas laterais da boquilha que pelo centro do molde (NIZZOLA, 1985).

3.4.7 - A resistência das peças de cerâmica vermelha após a queima

A resistência é resultante da presença de fundentes e da alta temperatura de queima. Materiais com 15 MPa de resistência após a queima são melhores para blocos estruturais do que os de resistência inferior a 1 MPa. Estes ensaios devem ser realizados nos lotes de matéria-prima antes de entrar na linha de produção, definindo o produto ao qual será destinado, pois poderá ocorrer quebras e lascas após o processo de queima e manuseio das peças (MÁS, 2002). Os valores mínimos para o módulo de ruptura e flexão após a queima são de 2,0 MPa para tijolos maciços, 5,5 MPa para tijolos furados e 6,5 MPa para telhas (SANTOS, 1989).

3.5 - COMENTÁRIOS SOBRE A LITERATURA

Neste cenário de numerosas empresas distribuídas em todo o território brasileiro, gerando elevado nível de empregabilidade e conseqüentemente grande responsabilidade social devido principalmente à mão de obra pouco qualificada e à processos produtivos antigos e de pouca tecnologia, além de administrações familiares resistentes à busca de novos processos de produção e com um produto de grande aceitação no mercado nacional, entende-se ser de grande valia desenvolver estudos que aprimorem sua linha industrial, proporcionando melhoria de seus produtos e economicidade, agregando à sua matéria-prima um elemento de descarte de outra indústria, proporcionando desta forma, não apenas a melhor destinação de resíduos industriais, mas sobretudo a melhoria de algumas

propriedades dos produtos cerâmicos, especialmente das telhas, a nível de resistência e impermeabilidade.

Este desafio envolve os estudos e comprovação da aplicabilidade da escória na mistura das argilas e também o convencimento aos proprietários das indústrias cerâmicas do ganho que terão mudando seus paradigmas. Vale ressaltar que, ao se agregar um novo elemento na mistura da argila, ocorre naturalmente uma sobrevida aos bancos de argilas, pois, quando se esgotam, faz-se necessário buscar novas fontes, muitas vezes tão distantes que inviabilizam o funcionamento da indústria, pelo aumento do custo de transporte.

É importante também salientar que as distâncias entre as mineradoras de níquel, geradoras da escória em estudo e as indústrias cerâmicas, serão consideradas para que o ganho em propriedades da telha não se perca com o eventual aumento de seu custo unitário pelo transporte do resíduo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, estão descritos os materiais utilizados neste trabalho como as argilas e a escória, para a fabricação das telhas e os procedimentos e instrumentos para as coletas de dados específicos destes materiais. Foram efetuados experimentos com estas matérias-primas para conhecimento de seus componentes e propriedades e realizados ensaios dos produtos gerados com a cerâmica vermelha com a adição de escória para a fabricação de telhas.

4.1 - DEFINIÇÃO DO PRODUTO A SER OTIMIZADO

O produto a ser otimizado é a telha cerâmica, fabricada e comercializada em cerâmica da região. Os modelos fabricados são a Colonial ou Portuguesa e a Romana ou Italiana, sendo que a massa argilosa é a mesma, se diferenciando do bocal de extrusão e da matriz de prensagem.

O processo de fabricação de telhas nas indústrias cerâmicas, especificamente na empresa envolvida, é descrito conforme Figura 4.1.

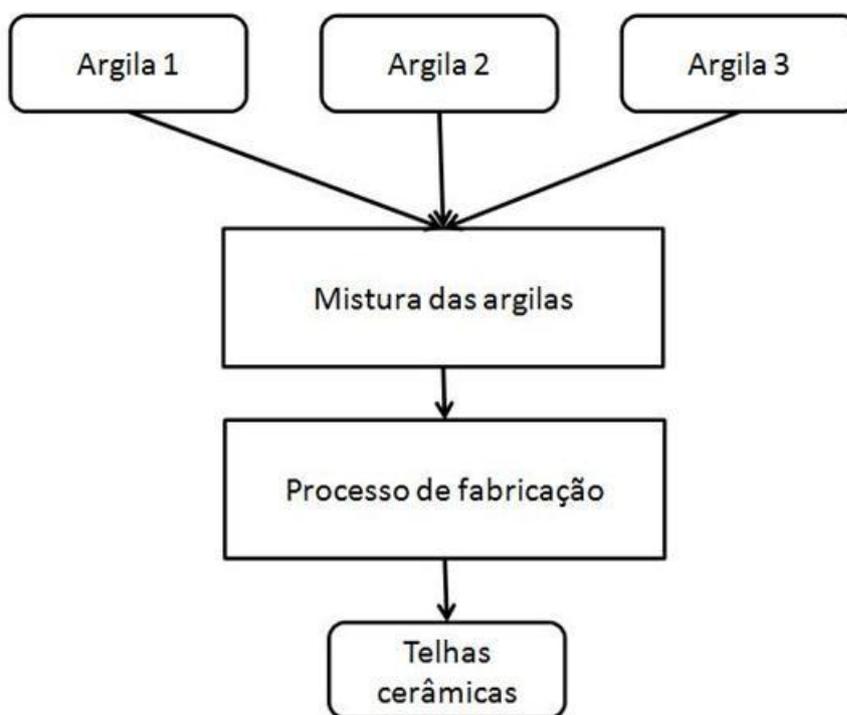


Figura 4.1 - Fluxograma do processo de fabricação atual de telhas cerâmicas.

Estas telhas são produzidas em grande escala, sendo que em 2014 foram produzidas 200.000 telhas por mês dos tipos Colonial e Americana, de acordo com informações obtidas na própria indústria cerâmica em estudo. Esta cerâmica possui 62 funcionários e utiliza um volume de argilas de 600 t de argilas/mês.

4.2 - ESCOPO DO TRABALHO

Este estudo teve como objetivo avaliar a utilização da escória proveniente da Mineradora da região de Pratápolis-MG, gerada na produção de níquel e as argilas utilizadas em cerâmica na região do sudoeste mineiro na produção de telhas cerâmicas com melhores propriedades mecânicas, mantendo o padrão industrial utilizado pela indústria da região.

O processo de fabricação de telhas proposto com adição de escória à massa argilosa é descrito conforme Figura 4.2.

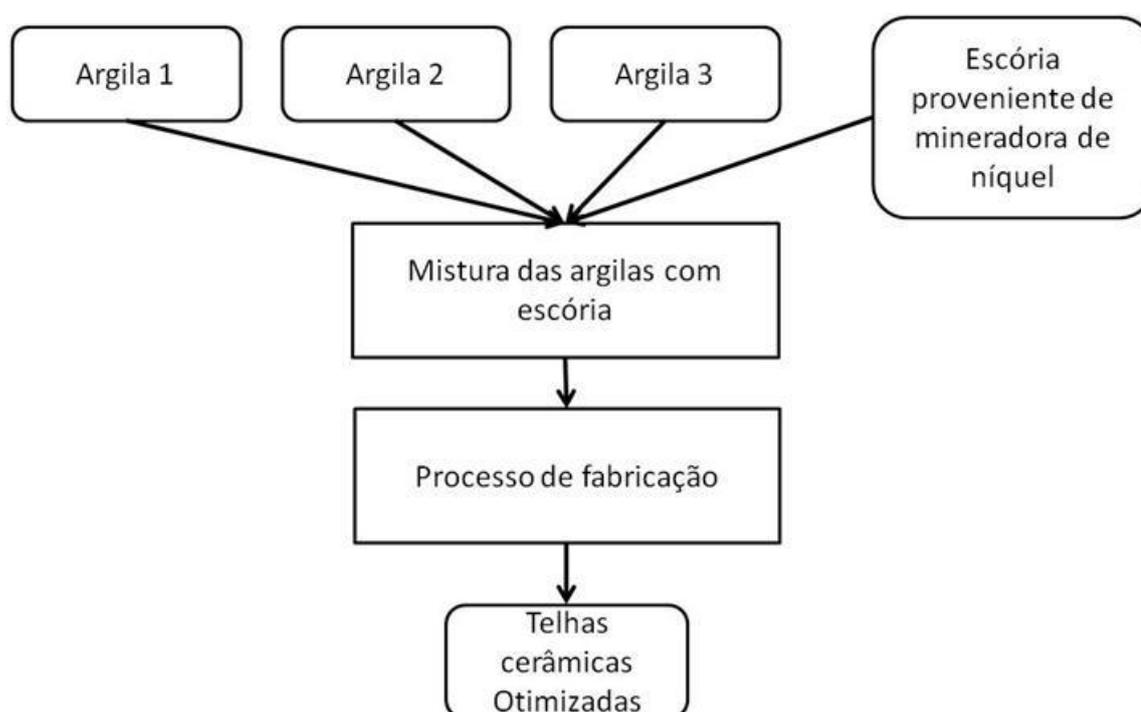


Figura 4.2 - Fluxograma do processo de fabricação proposto para telhas cerâmicas otimizadas.

A sequência deste estudo foi desenvolvida de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 4.3, estabelecendo os passos para se concluir a viabilidade da incorporação da escória na massa argilosa, e ter um produto cerâmico,

especialmente a telha cerâmica de qualidade comercial viável economicamente e com qualidade melhorada.

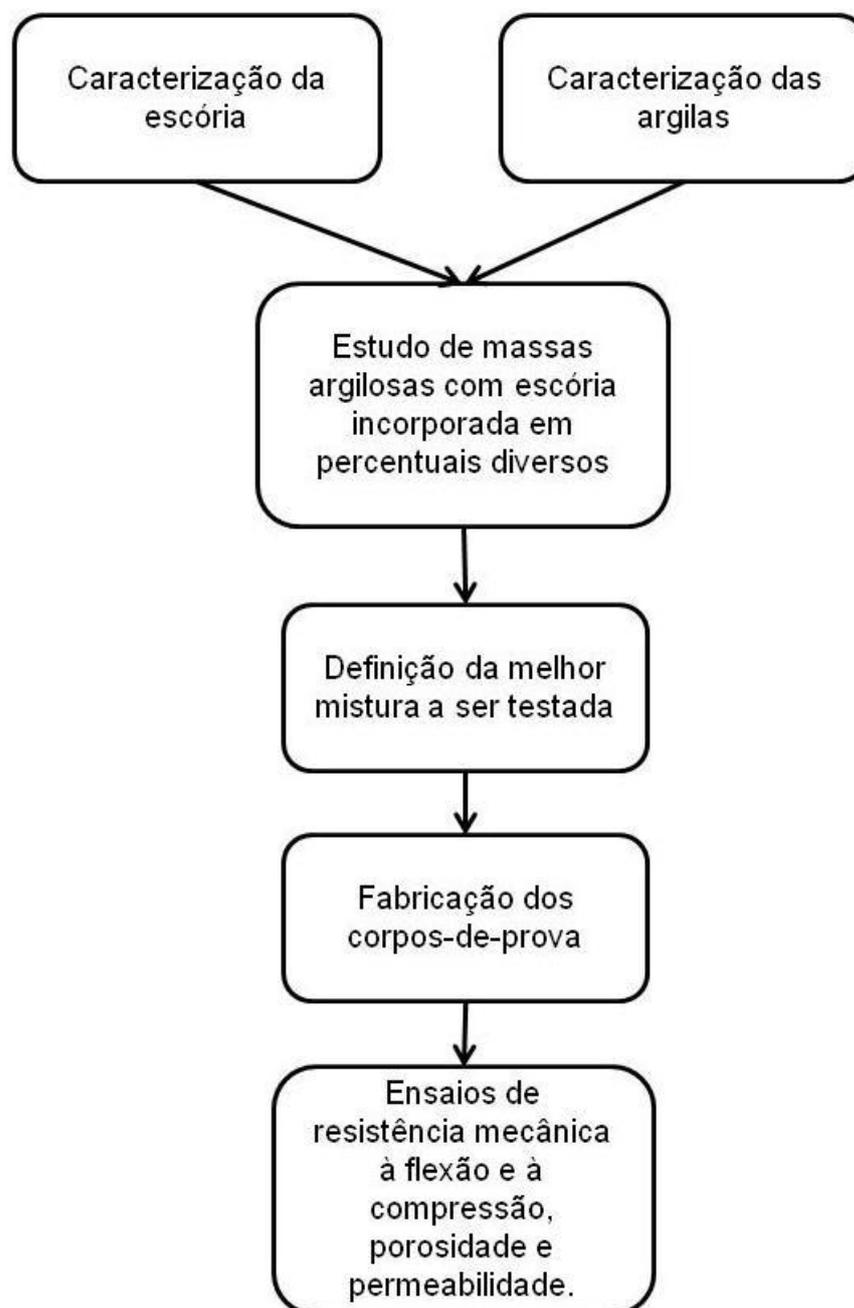


Figura 4.3 - Fluxograma das ações do estudo de incorporação da escória em argila para produção de telhas cerâmicas otimizadas.

Toda a sequência do trabalho foi elaborada de acordo com as ofertas de matérias-primas da região do sudoeste mineiro com a utilização da estrutura laboratorial da Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP, com a Universidade do

Extremo Sul Catarinense - UNESC e com a Fundação de Ensino Superior de Passos, hoje, absorvida pelo Governo do Estado de Minas Gerais através da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, num conjunto de 3 instituições de ensino superior aportando seus recursos físicos e tecnológicos para obtenção dos resultados procurados. Também foram utilizados os laboratórios experimentais da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar na caracterização das matérias-primas e da unidade do SENAI em Belo Horizonte/MG para a elaboração dos corpos-de-prova.

4.3 - DESCRIÇÃO E PROCESSO DE OBTENÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS

A indústria cerâmica e a mineradora selecionadas para o desenvolvimento deste trabalho estão localizadas na região do sudoeste mineiro, respectivamente nas cidades de Capitólio/MG e na cidade de Pratápolis/MG, distantes 90 km entre si, tendo a cidade de Passos como referência regional, com universidade e laboratórios à disposição para apoio a alguns ensaios necessários. A escória e as argilas utilizadas neste trabalho foram coletadas diretamente nos estoques das empresas em questão.

Uma vez coletadas foi desenvolvido o procedimento experimental envolvendo a Fundação de Ensino Superior de Passos, hoje Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, a Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP, a Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, a Universidade Federal de São Carlos - UFSCar e a unidade SENAI de Belo Horizonte.

4.3.1 - A escória

Com relação à escória, de acordo com detalhes apresentados na Figura 4.4, é encontrada na Mineradora Morro Azul, em Pratápolis-MG, depositada em grandes volumes em espaços específicos para esta destinação e foram coletados seguindo norma da NBR 10.007, em junho de 2013.

Após a coleta, a escória foi submetida a análises de lixiviação e solubilização de acordo com as normas NBR 10.005 e 10.006.



Figura 4.4 - A escória gerada na produção de níquel.

4.3.2 - As argilas

Acompanhando o processo de fabricação de telhas e tijolos cerâmicos em uma indústria cerâmica da cidade de Capitólio-MG, observou-se a matéria-prima que é utilizada na produção de telhas e tijolos cerâmicos. São utilizadas 3 argilas diferentes, a Mutuca Preta, a Mata Santa e a Vermelha Jacir, cada uma com suas características específicas, como cor para a Mutuca, cor e resistência para a Mata Santa e resistência para a Vermelha Jacir, respectivamente. Estas argilas são encontradas na região próxima à cerâmica havendo a preocupação com o esgotamento das argilas Mutuca e Mata Santa.

A distância média das argileiras até a indústria cerâmica é de aproximadamente 8 km, sendo que, com a possibilidade de esgotamento de alguma das argilas se faz necessário encontrar outra fonte que a substitua e levar em consideração a distância para o transporte da mesma até a indústria cerâmica, o que pode encarecer o produto final.

As argilas utilizadas na indústria cerâmica em estudo são representadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Os diferentes tipos de argilas usadas na cerâmica em estudo.

	<p>Argila 1 - Argila Preta Mutuca; tem como função básica proporcionar a cor branca à telha, após queimada.</p>
	<p>Argila 2 - Argila Preta Mata Santa; tem como função básica proporcionar cor e resistência à telha, após queimada</p>
	<p>Argila 3 - Argila Vermelha Jacir; tem como função básica proporcionar resistência à telha, após queimada</p>
	<p>Argilas 1, 2 e 3 misturadas</p>

De acordo com a indústria cerâmica em estudo, a argila 1, chamada Preta Mutuca, tem como função básica proporcionar a cor branca à telha, após queimada. A argila 2, chamada Preta Mata Santa, tem como função básica proporcionar cor e resistência à telha, após queimada. A argila 3, chamada Vermelha Jacir, tem como função básica proporcionar resistência à telha, após queimada

Em um primeiro levantamento, embora a indústria cerâmica não esteja enfrentando problemas com as distâncias para buscar cada uma das argilas, localizadas em locais diferentes, já se tem a preocupação com o esgotamento das

Argilas 2 e 3, Mata Santa e Mutuca, havendo necessidade, neste caso de procurar outras jazidas para substituir estas que se esgotarão no decorrer do tempo, as quais passarão por testes de queima, resistência e cor. A proporção de cada argila é de 1 unidade de Mutuca, com 1 unidade de Mata Santa e 3 unidades da Jacir.

A umidade da mistura, na indústria cerâmica, é calculada observando-se o processo de extrusão apenas. As 3 argilas são deixadas “descansando” por 2 anos, separadamente, para perder os elementos orgânicos existentes no ato da extração, como folhas, gravetos e pequenos animais. Posteriormente, elas são misturadas em camadas e disponibilizadas em montes para serem utilizadas no processo de fabricação das telhas.

A coleta das argilas foi realizada no pátio da indústria cerâmica, coletando-se cada argila separadamente de seu estoque individual e também coletando-se a mistura do estoque específico, mantendo toda a característica de mistura usada pela indústria em estudo.

4.3.3 - Mistura das argilas e da escória

Este estudo objetivou a obtenção da composição ideal, das argilas e da escória, fazendo a avaliação da plasticidade da mistura padrão das argilas e de várias formulações contendo o resíduo, buscando-se aquelas que se apresentavam mais adequadas à extrusão, com objetivo de conseguir adicionar o máximo de resíduo, mantendo-se as mesmas características de extrusão da mistura padrão; fazendo avaliação das condições de queima de cada formulação aprovada anteriormente e avaliação da composição escolhida em escala industrial em comparação com a mistura padrão. Foram obtidos corpos-de-prova da mistura escolhida e queimados juntamente com a mistura padrão na indústria cerâmica em escala industrial. Ao final, amostras das misturas foram caracterizadas para se obter os valores reais (não mais laboratoriais) de desempenho industrial (de processo) e de produto (técnico). Em todos os casos, foram obrigatórios os ensaios de lixiviação.

4.4 – CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As matérias-primas foram submetidas à caracterização física, química e mineralógica utilizando técnicas de caracterização como: análise granulométrica e

de plasticidade das argilas, difração de raios-X, fluorescência de raios-X, análise térmica diferencial e análise granulométrica.

4.4.1 - Análises com as argilas

Com objetivo de analisar as características das argilas utilizadas na fabricação das telhas pela Cerâmica Avante, diversos ensaios foram realizados.

4.4.1.1 - Análise de granulometria e picnometria das argilas

Foi usado um medidor de tamanho de partículas da marca Micromeritics-USA - Sedigraf mod.5000ET do DEMa/UFSCar. Para a preparação da amostra usou-se 3 g de pó, 20 mL de água destilada e 1% defloculante (darvan c). Foi realizada a agitação magnética por 5 min. A análise foi baseada na lei de Stokes por sedimentação, iniciando-se com a sedimentação das partículas grossas, médias, finas e nanométricas e através de um medidor de raios-X.

A densidade absoluta da mistura das argilas foi obtida experimentalmente em picnômetro a Hélio AccuPyc 1330 V2.01 no DEMa da UFSCar, com 5 valores de cada amostra para obtenção da média.

4.4.1.2 - Análise de plasticidade das argilas

As argilas e a mistura padrão foram secas a 60°C por 24 h em estufa de laboratório (CienLab), após destorroadas em almofariz para se obter um pó passante em malha 32 mesh ($< 500 \mu\text{m}$). Todo o restante do trabalho e das composições seguiu esse mesmo padrão de granulometria.

As argilas e a mistura padrão foram umidificadas entre 20 – 30% base seca. Para melhor homogeneização, as amostras ficaram 24 h em um recipiente fechado. O método consiste na determinação da força aplicada sobre a argila no plasticímetro de indentação (Digitron, modelo UL200) definindo-se o teor máximo de adição de água (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Plasticímetro de indentação.

A partir dos resultados obtidos no ensaio de plasticidade, foi possível determinar os limites de Atterberg, levando em consideração que o limite de liquidez (LL) marca a mudança do estado líquido para o estado plástico à medida que a argila vai perdendo umidade e adquirindo consistência, ou vice-versa, enquanto que o limite de plasticidade (LP) indica a mudança entre os estados plástico e sólido em que a argila se encontra. O LP é definido visualmente. Prepara-se várias massas de uma mesma formulação com diferentes percentuais de umidade em um recipiente cilíndrico do equipamento. Começa-se com uma percentagem de umidade suficientemente baixa (~18% para maioria das argilas), de forma que a penetração do indentador do equipamento tenha dificuldade de perfurar a superfície da mistura argilosa. Costuma-se observar trincas (pouca plasticidade desenvolvida devido à baixa umidade). Aumenta-se a umidade até que se percebe que a penetração do indentador não provoca trinca na superfície da massa argilosa contida no cilindro. Isto é empírico. Depende do observador e da correta escolha das faixas de umidade a serem testadas. Este valor mínimo de umidade em que se observa que a penetração do indentador não provoca trincas observáveis é o LP. O LP é, portanto, a mínima umidade necessária para que a formulação demonstre plasticidade. O valor usado é o da umidade (%) da amostra testada. Continua-se o teste da mesma formulação, mas com umidades maiores para se obter a curva, sempre anotando a força aplicada para que ocorra a penetração. Haverá uma umidade a partir da qual a força aplicada ficará praticamente invariável. É a parte inferior da curva e pode-se determinar pela leitura no gráfico. Este é o LL (umidade, %). O LL é a máxima

umidade que a formulação suporta. Desta forma, o índice de Plasticidade (IP) das argilas, é dado por:

$$IP = L_L - L_P \quad (4.1)$$

sendo que L_L é o limite de liquidez ou limite líquido e L_P é o limite de plasticidade ou limite plástico.

No processamento de materiais cerâmicos por extrusão, a plasticidade assume papel importante, pois quanto maior a plasticidade, menor a força aplicada pela extrusora e, portanto, menor o gasto energético, maior a produção e possivelmente menor o desgaste do equipamento, desde que dentro de um limite.

Após a definição das plasticidades para cada argila, 6 composições foram elaboradas para obtenção de corpos de prova por extrusão.

4.4.1.3 - Extrusão

As composições foram preparadas de acordo com a umidade de campo de cada matéria-prima. A umidade foi calculada pesando-se cada argila e a escória e após 2 h em forno a 120°C foram pesadas novamente. Desta forma, foi possível ajustar a umidade de cada mistura em 26% com granulometria abaixo de 0,6 cm, após destorroamento para as argilas. Os percentuais de cada matéria-prima em cada composição estão estabelecidos conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Formulações propostas em percentuais de matérias-primas.

Comp	Mata	Mutuca	Jacir	Resíduo	Total	Umidade (% bu)
M0	18,0	19,0	63,0	0,0	100,0	26,0
M1	15,0	15,0	63,0	7,0	100,0	26,0
M2	11,0	11,0	63,0	15,0	100,0	26,0
M3	6,0	6,0	63,0	25,0	100,0	26,0
M4	22,0	0,0	63,0	15,0	100,0	26,0
M5	0,0	0,0	75,0	25,0	100,0	26,0
M6	7,0	8,0	70,0	15,0	100,0	26,0

Cada composição foi preparada e homogeneizada, após adição de água até se atingir o teor de 26%, considerando-se que no manuseio as misturas perderiam

umidade, caindo para a umidade desejada de extrusão de 24% definido através do ensaio de plasticidade. As massas de cada matéria-prima estão descritas na Tabela 4.3, atendendo aos percentuais propostos.

Tabela 4.3 - Quantidade de matéria-prima por composição (kg).

Comp (n°)	Mata (kg)	Mutuca (kg)	Jacir (kg)	Resíduo (kg)	Massa total MP in natura (kg)	Massa água a ser adicionada (kg)	Massa total umidificada (kg)
M0	3,15	3,44	10,90	0,0	17,49	2,51	20,0
M1	2,63	2,72	10,90	1,10	17,34	2,66	20,0
M2	1,93	1,99	10,90	2,36	17,18	2,82	20,0
M3	1,05	1,09	10,90	3,94	16,97	3,03	20,0
M4	3,85	0,0	10,90	2,36	17,12	2,88	20,0
M5	0,0	0,0	12,97	3,94	16,91	3,09	20,0
M6	1,23	1,45	12,11	2,36	17,15	2,85	20,0
	13,84	10,68	79,58	16,07	120,17	19,83	14,0

As umidades em base seca e base úmida foram calculadas por:

$$X_{bs} = \frac{M_u}{M_s} \quad (4.2)$$

sendo que X_{bs} é a umidade em base seca, M_u é a massa do material úmido e M_s é a massa do material seco.

$$X_{bu} = \frac{M_u}{M} \quad (4.3)$$

sendo que X_{bu} é a umidade em base úmida e M é a massa do material seco + umidade.

As composições foram passadas pela extrusora do SENAI em Belo Horizonte duas vezes para que fosse obtida uma massa uniforme e homogênea. A extrusão foi realizada em uma extrusora a vácuo (SERVITECH-CT-083). Para a extrusão, foi utilizada uma massa de 20 kg de cada composição em 2 passadas pela extrusora. Neste processo foram gerados corpos-de-prova em forma de paralelepípedo, nas

dimensões aproximadas de 26 mm x 16,5 mm x 72,5 mm e cilindros de altura 150 mm e diâmetro 75 mm, conforme Figura 4.6.



Figura 4.6 - Extrusão de corpo-de-prova.

As argilas, provenientes da Cerâmica Avante, na cidade de Capitólio - MG, foram peneiradas em malha de 0,6 cm para serem trabalhadas. No SENAI-BH, foi utilizada uma extrusora experimental, conforme Figura 4.7.



Figura 4.7 - Detalhes da extrusora usada no SENAI-BH, para geração dos corpos-de-prova.

As misturas foram passadas na extrusora por 2 vezes cada mistura, gerando corpos-de-prova em forma de cilindros e em forma de paralelepípedos. As amostras cilíndricas foram cortadas com espátula, gerando bases não paralelas, conforme Figura 4.8.



Figura 4.8 - Corte dos corpos-de-prova no SENAI-BH, após extrusão das argilas.

Com a troca do bocal da extrusora, foram gerados copos de prova em formato de paralelepípedo, com medidas padronizadas de 74 mm x 24 mm x 18 mm.

As amostras em forma de paralelepípedos, foram cortadas com gabarito, gerando corpos de mesmo comprimento, conforme Figuras 4.9 e 4.10.



Figura 4.9 - Detalhe da geração de corpos-de-prova de seção retangular.



Figura 4.10 - Detalhe da extrusão de argila com bocal cilíndrico.

Para a confecção dos corpos-de-prova em formato de bolachas, para ensaios de permeabilidade, porosidade e densidade, utilizou-se a amostra extrudada em formato cilíndrico. As misturas extrudadas, foram cortadas e prensadas em aparelho desenvolvido para esta finalidade, conforme Figura 4.11. O objetivo foi deixar os corpos-de-prova com a prensagem no mesmo sentido que sofrem as telhas cerâmicas na indústria.



Figura 4.11 - Detalhes do processo de prensagem da massa extrudada para geração dos corpos-de-prova em forma de bolacha.

As amostras com boquilha retangular ficaram todas com aspecto bastante uniforme, conforme Figura 4.12.



Figura 4.12 - Geração de corpo-de-prova com boquilha retangular.

4.4.1.4 - Ensaio para avaliação das umidades das argilas e da mistura

Neste ensaio foram avaliadas as umidades de cada argila e da mistura, coletando-se 3 amostras de cada uma, pesando cada uma delas e após a secagem em Estufa de Secagem e Esterilização, modelo 315 SE, da Fundação de Ensino Superior de Passos, hoje Universidade do Estado de Minas Gerais, calculando-se os percentuais de umidade em base úmida e base seca, de acordo com as normas ASTM, apresentado na Figura 4.13.



Figura 4.13 - Detalhes do ensaio de umidade das argilas da cerâmica em estudo.

4.4.1.5 - Sinterização das argilas

Este ensaio foi realizado na UNESC, com objetivo de se encontrar a melhor mistura a ser testada. Foi empregado um dilatômetro óptico (Expert System Solutions S.R.L., modelo Misura HSM ODHT 1400; $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ em ar).

4.4.1.6 - Ensaio da umidade dos corpos-de-prova pós extrusão

Foi medida a umidade pós extrusão para verificar a umidade desejada com a manipulação das misturas e encontrou-se os resultados descritos conforme a Figura 4.14. O objetivo foi determinar a umidade de cada mistura no ensaio de extrusão. O procedimento adotado foi separar 3 corpos-de-prova de cada mistura, imediatamente após a extrusão, protegê-los com papel plástico para não perder a

umidade e levar ao laboratório da FESP para medida das massas após a extrusão. Após a secagem em forno a 120°C por 2 h para perda total da umidade foi calculada a umidade de cada composição.



Figura 4.14 - Detalhes dos corpos-de-prova em forno para análise de umidade pós extrusão.

4.4.2 - Ensaio com a escória

Neste capítulo foram realizados diversos ensaios com a escória, com objetivo de caracterizar a matéria-prima a ser adicionada à massa cerâmica para produção de telhas. Os ensaios estão relacionados a seguir.

4.4.2.1 - Análise de granulometria e picnometria da escória

Para análise de distribuição granulométrica da escória, foi utilizado inicialmente um conjunto de peneiras entre malhas 20 e 200 (padrão ASTM). A fração fina passante em malha 200 foi analisada em medidor de tamanho de partículas da marca Micromeritics-USA - Sedigraf mod.5000ET do DEMa (Departamento de Engenharia de Materiais) da UFSCar. Para a preparação da mostra foram usados 3 g de pó, 20 mL de água destilada e 1% defloculante (darvan c). Foi realizada a agitação magnética por 5 min. A análise foi baseada na lei de Stokes por sedimentação, iniciando-se com a sedimentação das partículas grossas, médias, finas e nanométricas e através de um raio-X.

A densidade absoluta da escória foi obtida experimentalmente em picnômetro a Helio AccuPyc 1330 V2.01 no DEMa da UFSCar com 5 valores de cada amostra para obtenção da média.

4.4.2.2 - Ensaio com espectrofotômetro de absorção atômica

Realizado em espectrofotômetro de absorção atômica da marca Perkin Elmer - Modelo Analyst 700 do Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, com objetivo de análise de composição de metais na escória, conforme Figura 4.15.



Figura 4.15 - Detalhe do equipamento para análise de composição de metais na escória com espectrofotômetro de Absorção Atômica.

4.4.2.3 - Ensaios de lixiviação e solubilização da escória

Foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização, de acordo com as normas NBR 10.004, NBR10.005, NBR 10.006 e NBR 10.007 para classificar a escória proveniente da mineradora em estudo, com objetivo de se encontrar viabilidade na aplicação nobre para este material. Os ensaios foram realizados nos laboratórios da UNAERP, conforme Figura 4.16.



Figura 4.16 - Detalhe de amostra para ensaio de solubilização da escória.

4.4.2.4 - Difração de raios-X

A composição mineralógica das matérias-primas foi determinada por análise de difração de raios-X (DRX) em um difratômetro Shimadzu XRD-6000 (radiação $\text{CuK}\alpha$, ângulo 2θ variando de 10° a 70° de $0,02^\circ$). Esta técnica é usada para identificar as fases cristalinas em uma amostra. A técnica identifica ângulos de difração dos raios-X específicos para cada tipo de cristal, servindo como identidade daquelas substâncias/compostos presentes na amostra.

4.4.2.5 – Fluorescência de raios-X

A composição química foi determinada por meio de espectroscopia por fluorescência de raios-x, em um Espectrofotômetro de raios-X da Shimadzu, modelo EDX-720, da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, conforme Figura 4.17, acoplado a um computador para o processamento de dados. Esta análise foi realizada para identificar os elementos químicos contidos na escória.

O equipamento emite um feixe de raios-X, que através de excitação dos elétrons e de acordo com a agitação dos mesmos, determinou-se os elementos contidos na escória. A amostra foi colocada no porta-amostra com filtro de nylon, em vácuo. Foi definido o diâmetro do feixe colimador em 10 mm. A análise realizada foi quali-quantitativa, com resfriamento a nitrogênio líquido.



Figura 4.17 - Espectrofotômetro da UFSCar, utilizado no ensaio de fluorescência de raios-X.

Os filtros utilizados no ensaio foram os descritos na Tabela 4.4, conforme dados obtidos na UFSCar.

Tabela 4.4 - Filtros usados no ensaio de fluorescência de raios-X para determinação dos elementos químicos da escória.

Measurement Condition							
Instrument: EDX-720		Atmosphere: Vac.		Collimator: 10 (mm)			
Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time (sec)	DT (%)
Ti-U	Rh 50	44-Auto	----	0 - 40	0.02-39.98	Live- 100	41
Na-Sc	Rh 15	597-Auto	----	0 - 20	0.01- 4.40	Live- 100	39
Rh-Cd	Rh 50	1000-Auto	MoNi	0 - 40	19.50-23.50	Live- 100	19
Zn-As,Pb	Rh 50	391-Auto	Ag	0 - 40	8.02-12.98	Live- 100	39
Cr-Fe	Rh 50	55-Auto	Ti	0 - 40	5.06- 6.92	Live- 100	39
S-K	Rh 15	1000-Auto	Al	0 - 20	2.10- 3.97	Live- 100	34

Qualitative Result
Element: Mg, Si, S, Rh, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ag, Al, Mo, Zr, Ba Pr, Nd, Sb, Sr, Sn, K

Fonte: Mariano (2014), DEMa-UFSCar.

4.4.2.6 – Sinterização da escória

A sinterização é o processo no qual a escória, uma vez compactada, foi submetida a temperaturas elevadas, ligeiramente menores que a sua temperatura de fusão. Este processo criou uma alteração na estrutura microscópica do elemento

base. Isto ocorreu devido a um ou mais métodos chamados "*mecanismos de transporte*" que podem ser consecutivos ou concorrentes. Sua finalidade foi obter uma peça sólida coerente. Durante o processo ocorrem reações no estado sólido do elemento que são ativadas termicamente. Algumas destas reações podem ocorrer espontaneamente quando a base atinge uma temperatura determinada. Um fator determinante nessas reações é a quantidade de fundentes a qual é usada no processo. O fenômeno da sinterização diz respeito às inúmeras teorias existentes e pode ser explicado como a adesão inicial das partículas metálicas, cujos pontos de contato aumentam com a temperatura sem que, nessa fase inicial, ocorra qualquer contração de volume e apenas com pequena influência na difusão superficial: à medida que aumenta a temperatura, ocorre um aumento da densidade, acompanhado de esferoidização e progressivo fechamento dos vazios; finalmente, mediante uma difusão nos contornos dos grãos, desaparecem os últimos vazios arredondados e isolados.

Na realidade, o processo de sinterização se baseia na ligação atômica entre a superfície de partículas vizinhas. Neste ensaio, procurou-se a faixa de temperatura que ocorreu a sinterização com objetivo de se verificar características interessantes sob ponto de vista de pesquisa tecnológica, para se obter um material vitrocerâmico a partir do resíduo, avaliando-se as propriedades finais e identificando potencialidades de aplicação com foco na valorização do resíduo. Para isso, uma caracterização mais ampla poderá ser feita, testando diferentes formas de aplicação: cimentos especiais, matéria-prima para revestimentos cerâmicos ou vidros e, eventualmente, cerâmica técnica.

Considerando as características térmicas do material, pretendeu-se focar a obtenção de telhas produzidas em fornos a rolos por monoqueima, tecnologia que vem se difundindo rapidamente em algumas regiões do país. A sinterização pode ser avaliada por meio da retração linear (RL, em %), calculada da seguinte forma:

$$RL = \frac{(L_f - L_i)}{L_i} \times 100 \quad (4.3)$$

sendo que L_i é a medida do comprimento inicial da amostra e L_f é a medida do comprimento final da amostra. Como a medida final costuma ser menor na sinterização (queima) de um material cerâmico, este valor acaba sendo negativo.

Este ensaio é importante para materiais cerâmicos que devem ser queimados, pois indica, dentre outras coisas, a temperatura de sinterização. Em qualquer forno industrial, por mais que se deseje ter temperaturas uniformes em toda a extensão do forno, há variações de temperatura, por menores que sejam. Se uma peça de um lado queimar mais porque a temperatura está maior naquele ponto do que no centro do forno ou do que na outra lateral, então haverá lote de peças com diferentes tamanhos, o que significará redução da qualidade das peças daquele lote. A sinterização da escória foi avaliada em um dilatômetro óptico (Expert System Solucions S.R.L. modelo Misura HSM ODHT 1400; $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ em ar).

4.4.2.7 – Análise Térmica Diferencial

O método de Análise Térmica Diferencial (ATD), está relacionado com a descoberta do termopar. Um dos pioneiros da técnica foi Le Chatelier, que em 1886 e 1887 utilizou termopares no estudo das transições que ocorriam em certas substâncias minerais. As suas observações foram realizadas pelo método de registro direto da temperatura da amostra, quando submetida ao aquecimento ou ao esfriamento. Este método foi melhorado por Robert Austen em 1891, ao realizar, pela primeira vez, uma medida diferencial com o uso de um referencial, registrando as diferenças de temperaturas entre a amostra e um padrão escolhido. Os métodos e as técnicas de registro evoluíram no tempo, sem, contudo, alterar os seus princípios básicos.

A grande vantagem do método de ATD reside na rapidez do processo experimental, pois é um processo dinâmico na quantidade de amostra utilizada, que é pequena, e na possibilidade de se determinar a histerese térmica, o que contrasta fundamentalmente com o método calorimétrico adiabático, que somente permite determinar a curva de aquecimento. Por outro lado, as informações quantitativas obtidas com o método da ATD têm sido pobres, até hoje. Toda transformação física libera ou absorve calor, causando, desta forma, uma mudança no comportamento da temperatura da amostra. A análise térmica diferencial, ATD, é capaz de determinar essas mudanças de temperatura, registrando todas as variações de entalpia, exo ou endotérmicas, causadas por qualquer mudança estrutural, magnética ou eletrônica. É um método dinâmico no qual as condições de equilíbrio não são levadas em conta; assim, as temperaturas nas quais ocorrem as mudanças não correspondem

exatamente às temperaturas de equilíbrio termodinâmico. Visto que a temperatura de transição resultante é característica da substância investigada sob determinadas condições experimentais, pode-se usar este fato na sua identificação. O fato importante para uma dada mudança não é a quantidade total de calor absorvido ou liberado, mas a taxa dQ/dt com que ocorre a absorção ou liberação de calor, durante a mudança da amostra. Isto determina a necessária sensibilidade do aparelho.

A Análise Térmica Diferencial (ATD) na escória teve como objetivo mostrar a existência de eventos exotérmicos e em qual intervalo de temperatura, para avaliar se tratava-se de uma cristalização.

Esta técnica identificou as transformações físico-químicas ocorridas na escória em função da temperatura. Estas transformações estão invariavelmente associadas à variação de energia, ditas endotérmicas (que absorvem energia para ocorrer) e exotérmicas (que liberam energia). Esta técnica permitiu avaliar estas variações de energia (e de temperatura dentro do forno) da amostra em relação a um material de referência.

Esta análise apresentou a mudança de energia térmica dos minerais e a variação da massa em função da temperatura. Esta análise foi realizada no equipamento de análise térmica simultânea DSC/TG da TA Instruments modelo SDTQ 600 (taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ em ar).

4.5 - CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS CERÂMICOS

Foram confeccionados 7 lotes de corpos-de-prova (descritos na Tabela 4.2), sendo o 1° considerado como referência, sem adição da escória. As outras misturas tiveram percentuais variados de escória adicionada à mistura das 3 argilas observando-se suas características de cor e a de compressão.

A proposta do trabalho foi destinar a escória gerada na produção do níquel à produção de telhas cerâmicas, propondo melhorias no processo de fabricação da Cerâmica Avante em Capitólio-MG, melhorando as propriedades desta telha, como resistência, impermeabilidade, peso ou outras, conforme Figura 4.18.

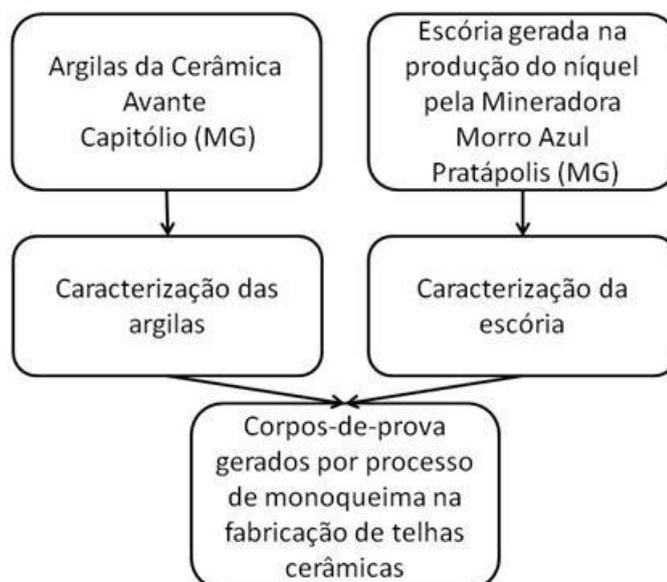


Figura 4.18 - Fluxograma para destinação da escória na produção de telhas cerâmicas por processo de monoqueima.

A granulometria ideal, por moagem e a seco, foi testada, sendo oferecida pela mineradora Morro Azul. Após a confecção dos corpos-de-prova com as composições diferentes, foi utilizada a temperatura do processo rotineiro da cerâmica. Este trabalho envolveu as Instituições de ensino superior de Passos - MG, São Carlos - SC, Ribeirão Preto - SP, Criciúma - SC, além do SENAI-BH.

4.5.1 – Imersão em água

Informações sobre as propriedades volumétricas de uma peça cerâmica podem ser obtidas por porosimetria de mercúrio ou por testes de imersão em água. O teste de absorção em água, baseado no princípio de Arquimedes, fornece informações sobre a porosidade aparente, densidade aparente, grau de absorção, densidade do sólido e densidade relativa da estrutura. Os corpos-de-prova foram gerados em 06 de julho de 2015 nos laboratórios do SENAI em Belo Horizonte.

Porosidade aparente (ε) representa a fração de vazios da estrutura que pode ser completamente preenchida com um líquido. Apenas os poros abertos são considerados neste teste, fornecendo a proporção de poros "permeáveis" da estrutura. A porosidade aparente (ε_a) é calculada por:

$$\varepsilon_a (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} 100\% \quad (4.4)$$

sendo que M_u é o peso úmido, M_s é o peso seco e M_i é o peso imerso da amostra. Peso úmido significa o peso (ou massa) da amostra com todos os seus poros preenchidos com líquido. Peso imerso é a resultante entre empuxo e força gravitacional atuando sobre a amostra em repouso em um líquido, geralmente água. No caso do empuxo ser maior que o peso, um líquido de menor densidade do que a água deveria ser usado.

Grau de absorção de água (AA) representa a capacidade da amostra absorver líquido no interior de sua estrutura. Fornece a razão massa de líquido absorvido por massa de sólidos na amostra, e é obtida por:

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} 100\% \quad (4.5)$$

Densidade aparente (ρ_a) é a densidade da amostra levando-se em conta os poros abertos em sua estrutura. É uma medida da leveza da estrutura reticulada e calculada por:

$$\rho_a = \frac{M_s}{M_u - M_i} \rho_l \quad (4.6)$$

sendo que ρ_l é a densidade do líquido usado (água destilada, em geral).

Densidade do sólido (ρ_s) é a densidade do material cerâmico que compõe a estrutura mais os poros fechados. É obtida por:

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_s - M_i} \rho_l \quad (4.7)$$

A absorção de água foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 15270 (2005) para blocos cerâmicos e para telhas foi utilizada a norma ABNT NBR 15310 (2004). Os corpos-de-prova foram colocados em forno por 2 h a 110°C antes de iniciar o processo de pesagem. Em seguida, foram pesadas e então submersas em um becker com água durante 2 h sob vácuo, conforme Figuras 4.19 e 4.20. Foram utilizados 3 corpos-de-prova de cada mistura, sendo que com 7 lotes, totalizaram 21 amostras. Todas as amostras foram identificadas de acordo com o lote e numeradas sequencialmente. Após este período, procedeu-se a pesagem dos corpos-de-prova de suas massas imersas. Após a pesagem dos corpos imersos, procedeu-se a pesagem dos mesmos corpos da massa úmida.



Figura 4.19 - Detalhes dos corpos-de-prova imersos em água com vácuo.



Figura 4.20 - Detalhes dos corpos-de-prova para obtenção das massas úmida e imersa.

O excesso de água da superfície de cada corpo-de-prova foi removido com um pano umedecido. Imediatamente, após esse procedimento, cada amostra foi pesada novamente para se obter a massa saturada, conforme Figura 4.21.



Figura 4.21 - Detalhes dos corpos-de-prova para obtenção da massa úmida.

4.5.2 - Resistência mecânica

O ensaio de resistência mecânica foi realizado através das normas ABNT NBR 15310 (2004) para as telhas e ABNT NBR 15270 (2005) para blocos de vedação. Sendo que para a telha foi realizado o ensaio de flexão de 3 pontos e para os blocos de vedação foi realizado o ensaio de compressão, segundo as normas identificadas. O ensaio de compressão e flexão foi realizado no equipamento Prensa Elétrica Universal de Ensaio da Marca INSTRON, modelo 5500R com capacidade de 25 t, da Universidade Federal de São Carlos, conforme Figura 4.22.

A tensão de ruptura à compressão e a tensão de ruptura à flexão por três pontos foram então determinadas de acordo com NBR 15.310.



Figura 4.22 - Detalhe da prensa elétrica Universal de ensaios.

4.5.2.1 - Ensaio de flexão para telhas

O ensaio de flexão é composto por dois apoios de secção circular na parte inferior do corpo-de-prova e um apoio idêntico na parte superior do corpo-de-prova posicionado em seu centro, conforme Figura 4.23. Foi utilizada uma prensa elétrica universal da marca INSTRON - modelo 5500R, com software utilizado Blue Hill, com capacidade de 25.000 kgf para ensaios de compressão e de 500 kgf para ensaios de flexão, digital com sensibilidade de 0,01 kgf/s, com velocidade de ensaio de 1,3 mm/min e distância entre apoios de 50 mm, atendendo à norma ABNT 15270,2005.



Figura 4.23 - Detalhes do ensaio de ruptura por flexão.

Para cálculo da resistência foi utilizada a Equação (4.8):

$$R_t = \frac{1,5 \times \text{Força}_{\text{aplicada}} \times \text{Comprimento}}{L \times H \times C} \quad (4.8)$$

sendo que L (Largura), H (altura) e C (comprimento) são as dimensões dos corpos-de-prova.

Enquanto a resistência à compressão é mais indicada para se avaliar os blocos cerâmicos, a resistência à flexão é a mais indicada para se avaliar a resistência das telhas. Isto tem a ver com as solicitações mecânicas em uso de cada um destes produtos. Como a telha pode ter diferentes formatos, costuma-se usar a força máxima na ruptura (em kgf) e não a resistência (MPa). De acordo com as

normas brasileiras NBR 7172/1987 e NBR 9601/1986, o valor mínimo de algumas telhas brasileiras é:

- 70 kgf para telha tipo francesa;
- 100 kgf para telha tipo capa e canal (colonial, plan, paulista);
- 130 kgf para telha tipo romana.

Uma comparação de normas é apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Requisitos das normas brasileira e estrangeiras de telhas cerâmicas.

Ensaio	Norma Francesa	Norma Alemã	Norma Americana	Norma Britânica	Norma Brasileira
	NF P31.301	DIN 456	ASTM C1167-96	(BSEN 539-2:1998)	(NBR)
Resistência à Flexão	Média > 100 kgf	Média > 150 kgf	seca: média > 178 kgf sat: média > 133 kgf	X	Francesa: 70 kgf Capacana: 100 kgf Romana: 130 kgf

Fonte: BASTOS (2003).

4.5.2.2 - Ensaio de compressão

O ensaio de compressão é composto por corpo-de-prova nas misturas estabelecidas, conforme Figura 4.24. A prensa utilizada é uma prensa universal INSTRON, modelo 5500R, da UFSCar, com software Blue Hill, com capacidade de 25.000 kgf para compressão e 500 kgf para flexão, velocidade de ensaios de 1,3 mm/min, com dispositivo de leitura digital com sensibilidade de 0,01 kgf s⁻¹ atendendo à norma ABNT 15.270 (2005).



Figura 4.24 - Detalhe do ensaio de compressão de corpo-de-prova.

As bases dos copos-de-prova foram retificadas, com altura aproximada igual ao dobro da largura. A equação utilizada para cálculo do trabalho de compressão foi:

$$\sigma = \frac{\text{Força}_{\text{aplicada}}}{\text{Área da seção}} \quad (4.9)$$

Os critérios de resistência mínima à compressão de acordo com a normatização brasileira são mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Critérios de resistência mínima à compressão de blocos e tijolos segundo a normatização brasileira.

Tipos de bloco / tijolo	NBR 7170/80			NBR 7171/92	NBR 7173/82	NBR 6163/94	NBR 8491/84		
	Tijolo maciço cerâmico			Bloco cerâmico	Bloco vazado de concreto		Tijolo maciço de solo cimento		
					Vedação		Estrutural		
Resistência mínima à compressão (MPa)	A	B	C	Classe 10 a 100 - 1,0 a 10,0	Média - 2,5	Ind -2,0	Classes 4,5 a 16,0	Média - 2,0	Ind. - 1,7

4.5.3 - Permeabilidade

A permeabilidade de elementos cerâmicos, neste caso as telhas cerâmicas, é um parâmetro importante, pois provoca um ambiente com conforto térmico maior que um elemento não permeável, desde que dentro dos limites desejáveis.

A avaliação experimental da permeabilidade das amostras cerâmicas sinterizadas foi realizada na UNAERP, sendo baseada em ensaios de escoamento de ar em regime permanente.

A amostra, uma bolacha cilíndrica, foi selada lateralmente entre 2 câmaras e submetida na entrada a uma pressão conhecida de ar (P_e), enquanto que a saída foi aberta à atmosfera (P_s), conforme ilustrado na Figura 4.25.

Esse procedimento foi repetido até a aquisição de ao menos 10 pares de dados de vazão e pressão. A curva experimental foi então utilizada para ajustar, pelo método dos mínimos quadrados, um modelo de matemático adequado para o tipo de meio poroso e de fluido escoante.

A vazão de fluido que percola a amostra (Q) foi medida na saída. O fluido percolante foi em geral ar, o que demanda menor pressão aplicada e maior sensibilidade no valor de vazão medida.

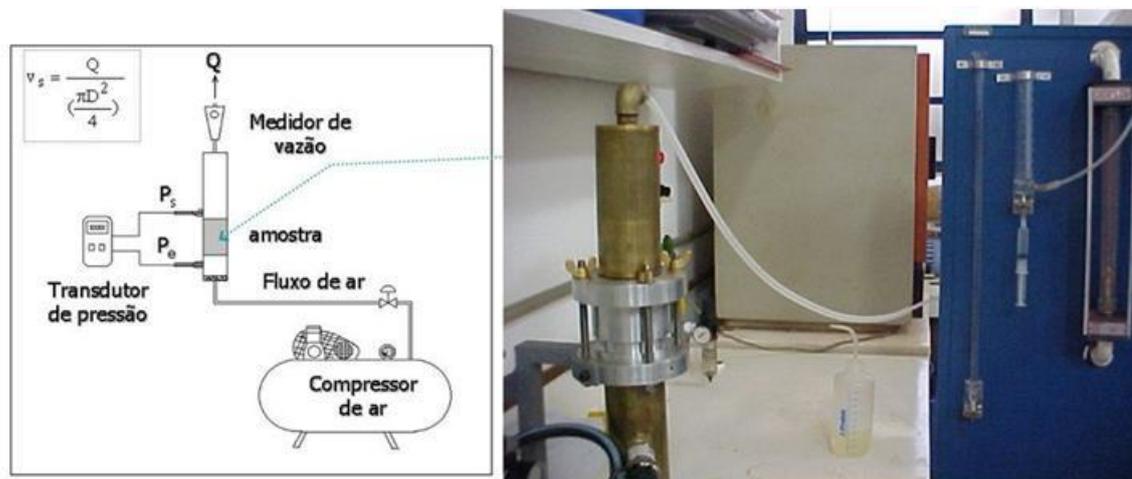


Figura 4.25 - Detalhes de ensaio de permeabilidade das amostras sinterizadas.

A equação de Forchheimer tem sido bem aceita para representar a permeabilidade de meios porosos com o escoamento de fluidos compressíveis (gases e vapores):

$$\frac{P_e^2 - P_s^2}{2P_s L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (4.10)$$

sendo que P_e é a pressão do fluido na entrada da amostra [Pa.s], P_s é a pressão do fluido na saída da amostra [Pa.s], v_s é a velocidade superficial do fluido, ($v_s = Q/A$ [m/s]), A é a área de escoamento da amostra ($A = \pi D^2/4$ [m²]), D é o diâmetro útil da amostra [m], L é a espessura da amostra [m], μ é a viscosidade do fluido [Pa.s], ρ é a densidade do fluido [kg/m³], k_1 é a constante de permeabilidade viscosa ou Darciana [m²], k_2 é a constante de permeabilidade inercial ou não-Darciana [m].

O termo linear [$\mu v_s/k_1$] na Equação (4.10) representa a perda de energia por dissipação viscosa entre as camadas de fluido, enquanto o termo quadrático [$\rho v_s^2/k_2$] representa a perda de pressão por ação inercial, causada pela alternância de aceleração e desaceleração do fluido e por sua mudança de trajetória durante a permeação pela amostra. A predominância de um termo ou outro é dependente da pressão aplicada do fluido, bem como dos valores das constantes de permeabilidade

k_1 e k_2 . Para pisos e telhas cerâmicas expostos a situações de escoamento em baixas pressões, normalmente apenas o termo linear é representativo do escoamento. Apesar disso, é muito importante a obtenção de ambas as constantes para proceder a simplificação em cada caso. Detalhes das amostras submetidas aos ensaios de permeação são mostrados na Figura 4.26.

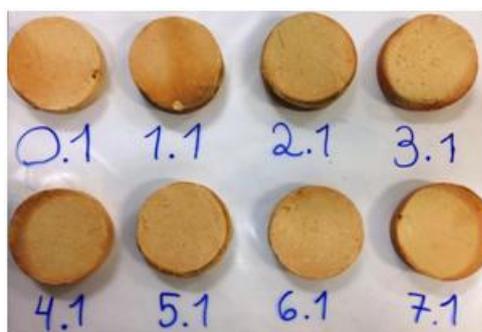


Figura 4.26 - Corpos-de-prova para ensaio de permeabilidade.

4.5.4 - Lixiviação

Fez-se necessário avaliar, em ensaios de lixiviação, se metais acima do limite máximo permitido pela NBR 10.004, foram liberados dos corpos-de-prova no ensaio de lixiviação. O teste de lixiviação foi aplicado de acordo com o descrito na NBR 10.005 (1997) da ABNT. Primeiramente, verificou-se o teor de sólidos não filtráveis da amostra. No caso de amostras sólidas, o extrato de lixiviado é montado mantendo-se a proporção de 100 g da amostra na base úmida, para 1.600 g de água deionizada. O pH da mistura é medido e se for superior a 5,2 é ajustado em $5,0 \pm 0,2$ através da adição de ácido acético $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$. A mistura é colocada sob agitação, conforme Figura 4.27.



Figura 4.27 - Detalhes dos corpos-de-prova para obtenção do extrato lixiviado.

Em períodos adequados o pH do meio é monitorado, de forma a mantê-lo em 5,0, se necessário com adição de solução de ácido acético. A agitação é encerrada após 24 h. O volume de solução de ácido acético $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ gasto é anotado e o volume final da fração líquida é completado com água ultrapurificada o suficiente para 2000 mL de solução. A solução resultante é filtrada em filtro de porosidade $0,45 \mu\text{m}$ para em seguida ser submetida às determinações químicas.

A Tabela 4.7 contém os dados a serem obtidos para preparação da solução lixiviada.

Tabela 4.7 - Dados a serem obtidos para preparação do lixiviado.

Umidade
Massa de amostra utilizada
pH inicial
pH final
Volume de Ácido Acético $0,5 \text{ mol/L}$ adicionado
Volume de água
Volume total de lixiviado

5. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos de acordo com os ensaios propostos no capítulo 4.

5.1 - ENSAIOS COM A ESCÓRIA

5.1.1 - Análise granulométrica e picnométrica da escória

A escória foi submetida à análise granulométrica, realizada nos laboratórios da UFSCar. O ensaio de peneiramento revelou que 80% do material ficou retido entre malhas 20 e 200 ($850 \mu\text{m} > d_{pi} > 75 \mu\text{m}$). A fração fina (20%) foi submetida à análise granulométrica por sedígrafo e os resultados combinados são mostrados na Figura 5.1.

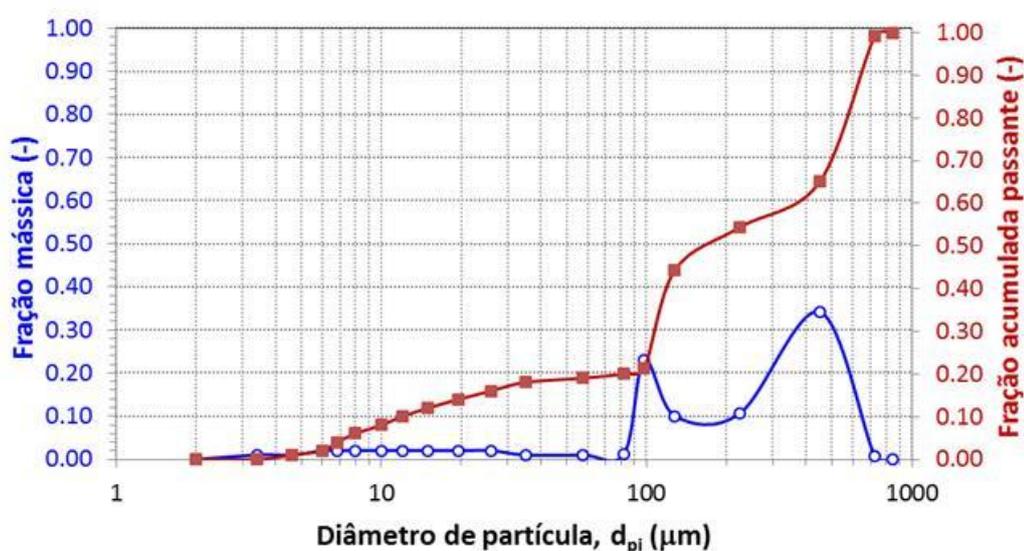


Figura 5.1 - Distribuição granulométrica da escória.

O diâmetro médio (d_{50}) das partículas de escória recebida pela mineradora para os ensaios foi de $150 \mu\text{m}$, enquanto o diâmetro médio de Sauter (d_{vs}) foi de $39 \mu\text{m}$. A densidade absoluta da escória foi de $2.551,5 \pm 17,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, obtida por picnometria a gás hélio. Desta forma, tem-se um material de densidade próxima das argilas, favorecendo a composição nas misturas para fabricação de telhas e blocos cerâmicos.

5.1.2 - Ensaio de lixiviação e solubilização da escória

Os ensaios de lixiviação e solubilização, realizados nos laboratórios da UNAERP (Figura 5.2) de acordo com as normas NBR 10.004, tiveram como objetivo verificar se a escória proveniente da Mineradora Morro Azul é ou não um material não-perigoso e inerte.



Figura 5.2 - Detalhe da análise de composição de metais na escória com equipamento de espectrofotometria de absorção atômica.

Os resultados obtidos para os elementos ferro, cromo, chumbo, zinco, magnésio, prata, cádmio, níquel e cobre, na UNAERP, estão apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 - Presença de metais em ensaios de solubilização e lixiviação na escória da Mineradora Morro Azul.

	Fe	Cr	Pb	Zn	Mg	Ag	Cd	Ni	Cu
	mg/L	ppm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	ppm	mg/L	mg/L
Solubilização	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	7,15	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Lim.Max	0,30	0,05	0,01	5,00		0,05	0,01		2,00
Lixiviação	0,26	0,02	< 0,01	0,46	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,315	< 0,01
Lim.Max		5,00	1,00			5,00	0,50		

Limites Máximos conforme os anexos F e G da NBR 10.004

Tabela 5.2 - Quantidade de metais contidos na escória de níquel em ensaio de solubilização e lixiviação.

Parâmetros	Valores Obtidos	Limites máximos
pH	9,53	
Cianeto mg/L	0,001	0,07
Cloreto mg/L	0,49	250,00
Fenóis mg/L	<0,01	0,01
Fluoreto mg/L	0,23	1,50
Nitrato mg/L	0,0426	10,00
Sódio mg/L		200,00
Sulfato mg/L	<0,01	250,00
Surfactantes mg/L	<0,01	0,50

De acordo com a NBR 10.004, em análise preliminar, ficou constatado que a escória não consta como um dos itens elencados nos anexos A e B. A escória está em estado 100% sólida e com diâmetro < 9,5 mm. Também não é inflamável, não é reativa (pH <2 ou pH > 12 - como constatado abaixo), não é corrosiva e não é patogênica.

Diante dos resultados apresentados realizados nos rejeitos de escória de ferro níquel, pode-se concluir o resíduo é classificado como **Classe II – Não Perigoso e Inerte**.

5.1.3 - Análise estrutural da escória por difratometria de raios-X

Em ensaios realizados com a escória na UNESC, percebeu-se que acima de 900°C a escória apresenta formação de cristais, comprovando a viabilidade de estudos para a melhoria das propriedades das telhas cerâmicas através do processo de monoqueima.

Em ensaio de análise química por fluorescência de raios-X, a amostra *in natura* apresentou comportamento amorfo, mas após tratamento térmico a 910°C apresentou picos de cristalização, conforme Figura 5.3.

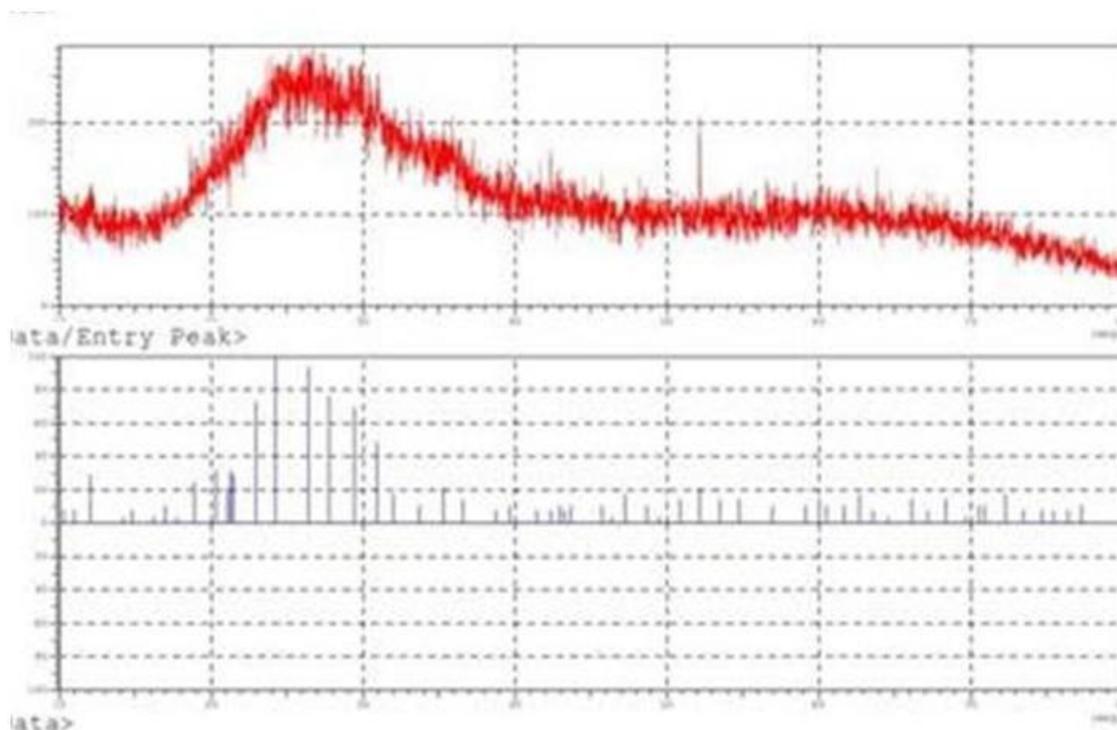


Figura 5.3 - Difratoograma de raios-X da escória *in natura*.

Na Figura 5.4, que se refere ao ensaio de DR-X da escória após tratamento térmico, percebe-se vários picos de cristalização, significando que o aumento da temperatura permitiu a organização de várias estruturas cristalinas a partir da estrutura amorfa inicial. O DSC, mais adiante, confirma isto.

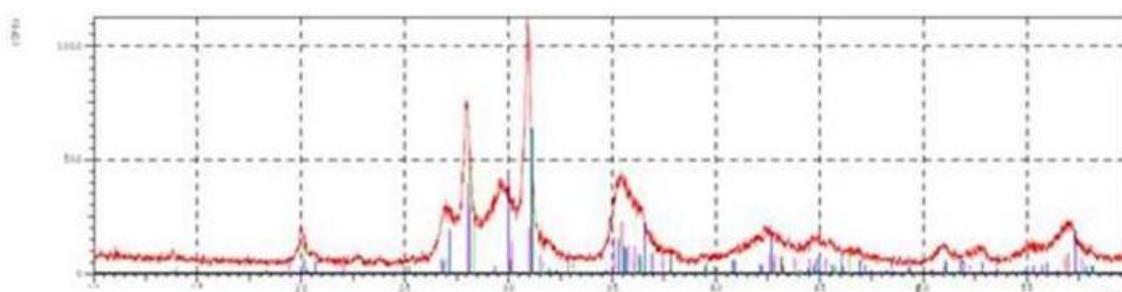


Figura 5.4 - Difratoograma de raios-X da escória após tratamento térmico.

O eixo "y" é representado pela contagem, ou seja, representa o número de sinais que foram identificados em cada ângulo. O eixo X representa o ângulo de incidência (e de difração) dos raios-X. Estes ângulos definem a natureza estrutural do composto cristalino e um certo conjunto de picos caracterizam um composto.

5.1.4 - Análise dos componentes químicos da escória

O ensaio por fluorescência de raios-X, realizado no DEMa, na UFSCar, indica a predominância de sílica, ferro e magnésio na composição química da escória, conforme Figura 5.5. Nota-se também a presença significativa de cromo.

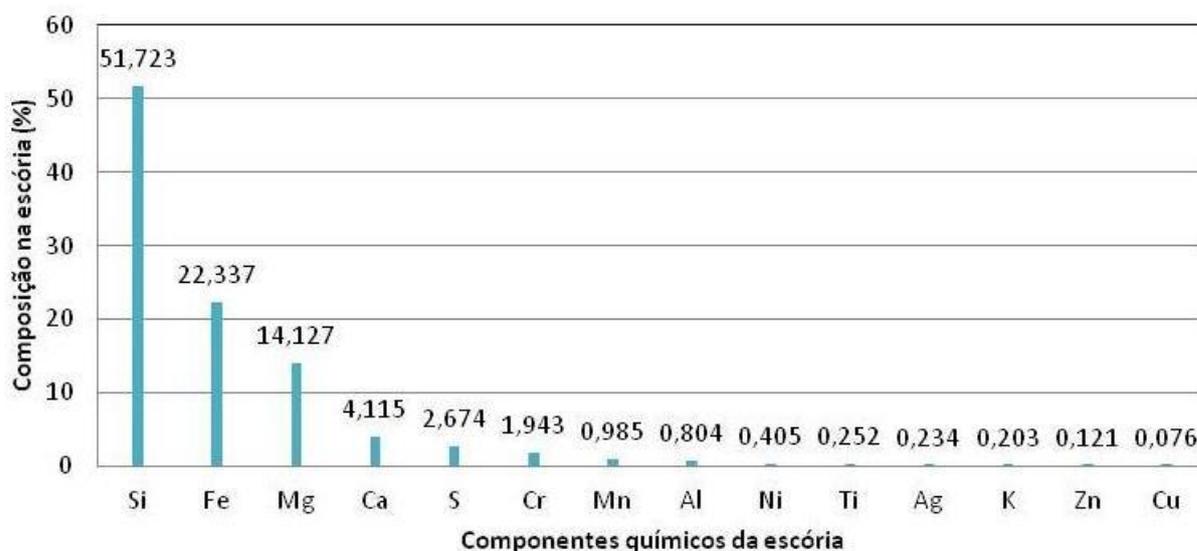


Figura 5.5 - Componentes químicos da escória da mineradora em estudo.

Percebe-se que a quantidade de níquel presente na escória é muito pequena, em torno de 0,4%, significando que o processo de extração do metal na mineradora é bastante eficiente. As quantidades de Fe, Mg e Ca são significativas, demonstrando que a escória pode e deve ter outras aplicações. Devemos observar que o cromo comparece com um percentual próximo de 4% e passa a ter um cuidado especial nas observações.

5.1.5 - Sinterização da escória

Neste ensaio, constatou-se que a escória sinteriza na faixa entre 840 e 890°C, com retração de apenas 2%, podendo ser observado na Figura 5.6.

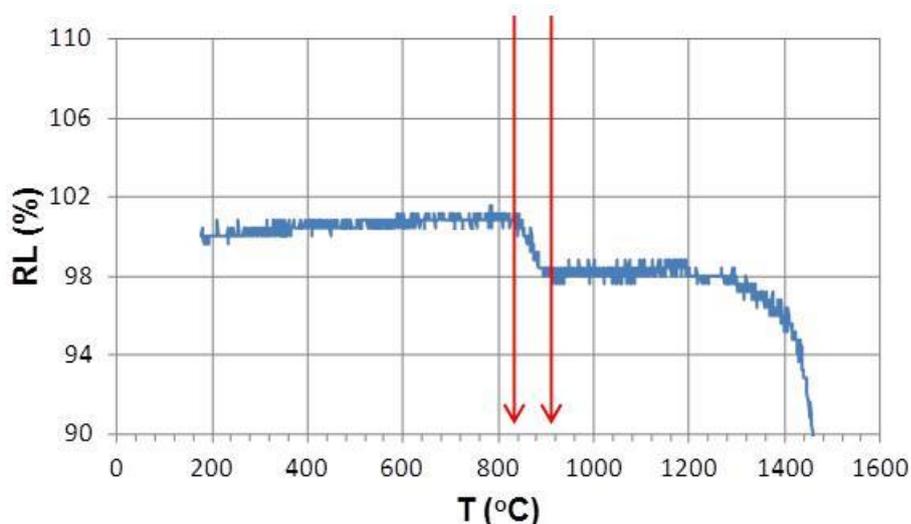


Figura 5.6 - Retração Linear da escória em função da temperatura.

Este resíduo apresentou características interessantes sob o ponto de vista da pesquisa tecnológica. O objetivo foi viabilizar estudos para obtenção de um material vitrocerâmico a partir do resíduo, avaliando-se as propriedades finais e identificando potencialidades de aplicação.

Considerando as características térmicas do material, pretendeu-se focar a obtenção de telhas produzidas em fornos a rolos por monoqueima, tecnologia que vem se difundindo rapidamente em algumas regiões do país. A retração linear (RL) é representada no eixo das ordenadas pela percentagem da medida final, isto é, 98% significa $RL = -2\%$ ou retração linear de 2%. O eixo das abscissas está representado pela temperatura.

Pode-se observar na Figura 5.6 que durante o aquecimento da amostra, há uma expansão (dilatação) até cerca de 850°C, quando forte retração começa a ocorrer. Esta RL está associada ao fenômeno da sinterização que ocorre até cerca de 930°C. Após, a amostra tem suas dimensões praticamente inalteradas em uma extensa faixa de temperatura, cerca de 350°C, quando começa a fundir por volta de 1300°C.

Este ensaio é importante para materiais cerâmicos que devem ser queimados, pois indica, dentre outras coisas, a temperatura de sinterização. Neste caso, a temperatura a ser escolhida deve ser qualquer uma entre 950°C e 1300°C, faixa em que as dimensões praticamente não variam. Industrialmente isto é muito importante. Em qualquer forno industrial, por mais que se deseje ter temperaturas uniformes em toda a extensão do forno, há variações de T. Se uma peça de um lado

queimar mais porque a temperatura está maior naquele ponto do que no centro do forno ou do que na outra lateral, então tem-se um lote de peças com diferentes tamanhos, o que significará redução da qualidade das peças daquele lote.

Neste caso, se for escolhida a temperatura de 1000°C, com flutuações de até 50°C dentro do forno ainda fariam, de acordo com o gráfico de RL x T, com que todas as peças tivessem o mesmo tamanho final (mesma retração).

5.1.6 - Análise térmica diferencial da escória

A Análise Térmica Diferencial (ATD) demonstrou que há dois eventos exotérmicos a aproximadamente 862 e 911°C, que seriam referentes à faixa de cristalização, conforme Figura 5.7.

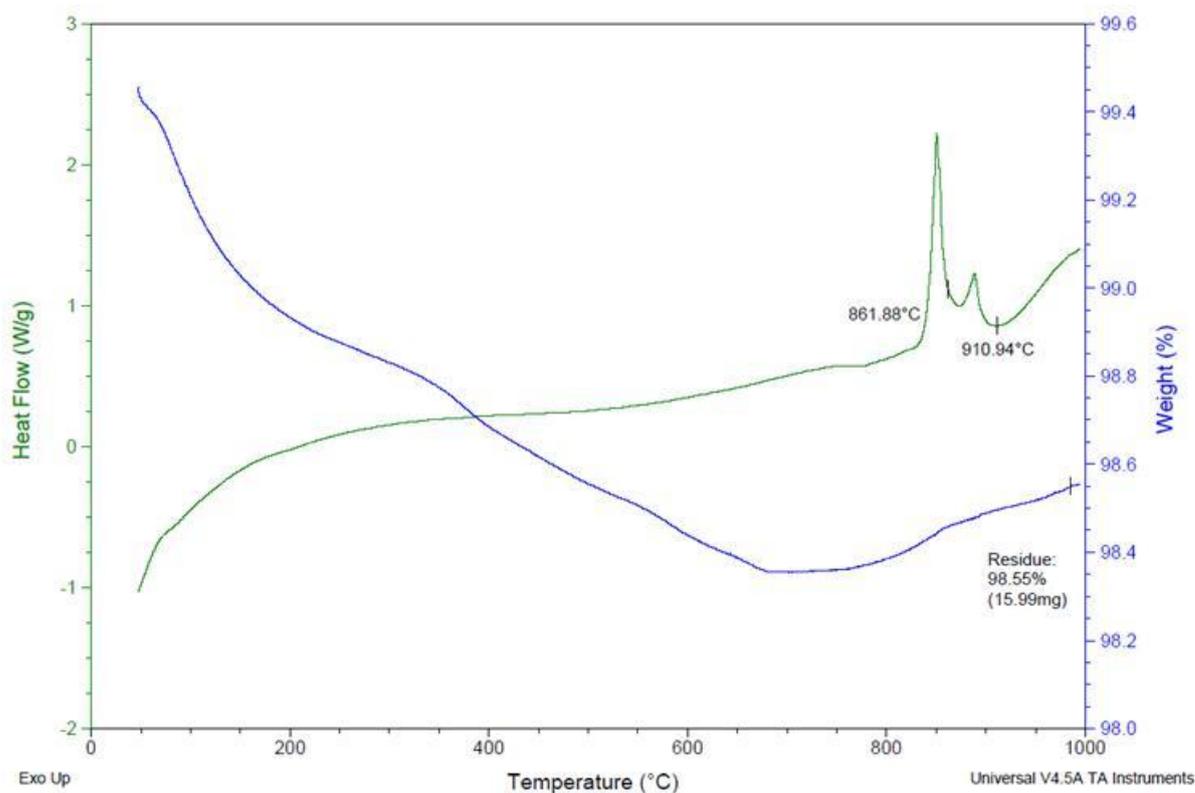


Figura 5.7 - Comportamento da escória de níquel em Análise Térmica Diferencial.

Esta técnica identificou as transformações físico-químicas ocorridas em um material em função da temperatura. Neste gráfico há dois eixos de ordenadas. O da direita representa a perda de massa (análise termogravimétrica), enquanto que o da esquerda a variação de fluxo de calor (DSC, que neste caso é calculado, não medido). Na curva verde pode-se observar que a cerca de 770°C há uma pequena

modificação da curva, indicando a transição vítrea do material. Materiais com características de vidro (amorfo) apresentam este comportamento. Significa a temperatura em que o material passa de um estado rígido para o estado plástico-viscoso. Cada vidro, devido a sua composição química, apresenta uma T_g específica. Após esta temperatura, no gráfico, elementos químicos dissolvidos na rede vítrea (amorfa) do material ganham suficiente mobilidade para conseguir se organizar em estruturas mais estáveis, chamada cristalização. Neste gráfico, cristais são formados, relacionados às fases identificadas no DRX, a cerca de 850 e 900°C.

5.2 - ENSAIOS COM AS ARGILAS

Foram realizados ensaios de granulometria, plasticidade, umidade e sinterização das argilas com intuito de comparação e formulação ideal das misturas.

5.2.1 - Análise granulométrica e picnométrica das argilas

Este ensaio indica a distribuição granulométrica das argilas, conforme representado graficamente na Figura 5.8.

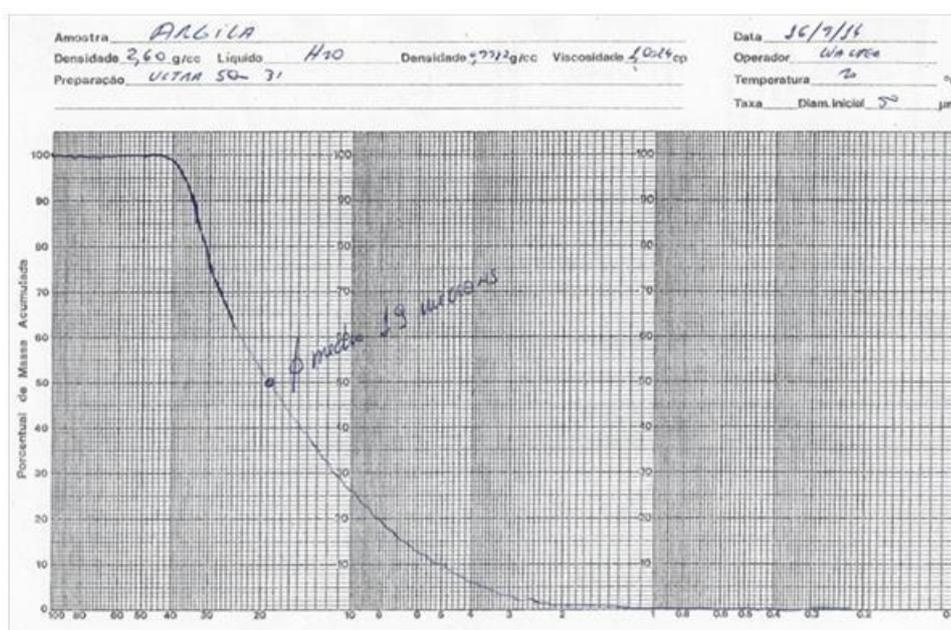


Figura 5.8 - Distribuição granulométrica da mistura das argilas feita em sedígrafo.

Percebe-se que as argilas são compostas de partículas bastante finas, com média de 19 μm com densidade absoluta de $2.600,3 \pm 7,3 \text{ kg.m}^{-3}$. Desta forma, tem-

se um material de boa plasticidade para a finalidade desejada na fabricação de telhas e blocos cerâmicos.

5.2.2 - Plasticidade das argilas e da mistura

Este ensaio indica a plasticidade de cada uma das argilas utilizadas na produção de telhas e blocos na Cerâmica Avante, observado na Figura 5.9.

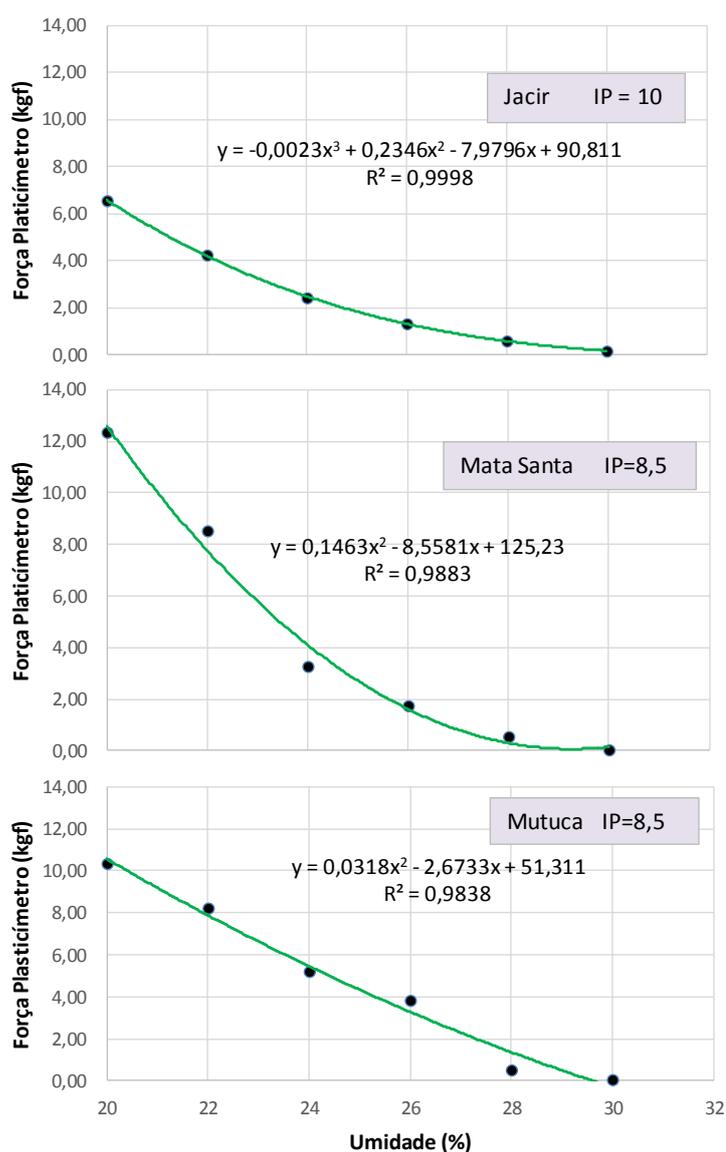


Figura 5.9 - A plasticidade das argilas Jacir, Mata Santa e Mutuca com percentuais diferentes de umidade.

Como esperado, à medida que se aumenta a umidade de cada uma das matérias-primas, a força necessária para deformá-la diminui, indicando que a

plasticidade aumenta em função do aumento da umidade. Foi fixada uma umidade e observada a força aplicada, que quanto menor, maior a plasticidade. Por exemplo, a plasticidade é maior para a Jacir, enquanto que as argilas Mata Santa e Mutuca apresentam mesma plasticidade. Desta forma, se o objetivo for obter uma mistura de maior plasticidade, deve-se aumentar o percentual da argila Jacir comparativamente às outras argilas. O comportamento da plasticidade das misturas M1, M2 e M3, de acordo com a Tabela 4.3, é mostrado na Figura 5.10.

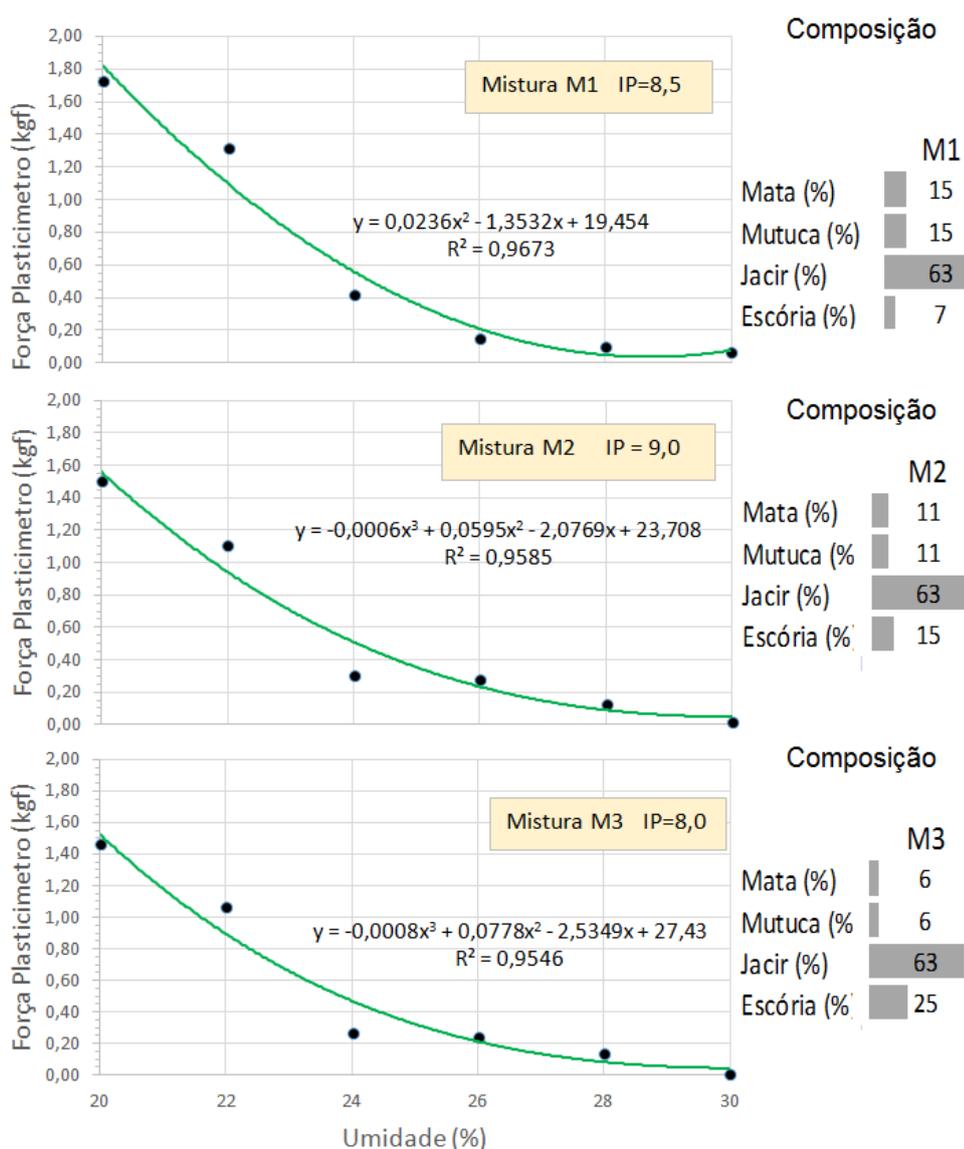


Figura 5.10 - Plasticidade das misturas M1, M2 e M3 com percentuais diferentes de umidade.

O comportamento da plasticidade das misturas M4, M5 e M6, de acordo com a Tabela 4.3, é mostrado na Figura 5.11.

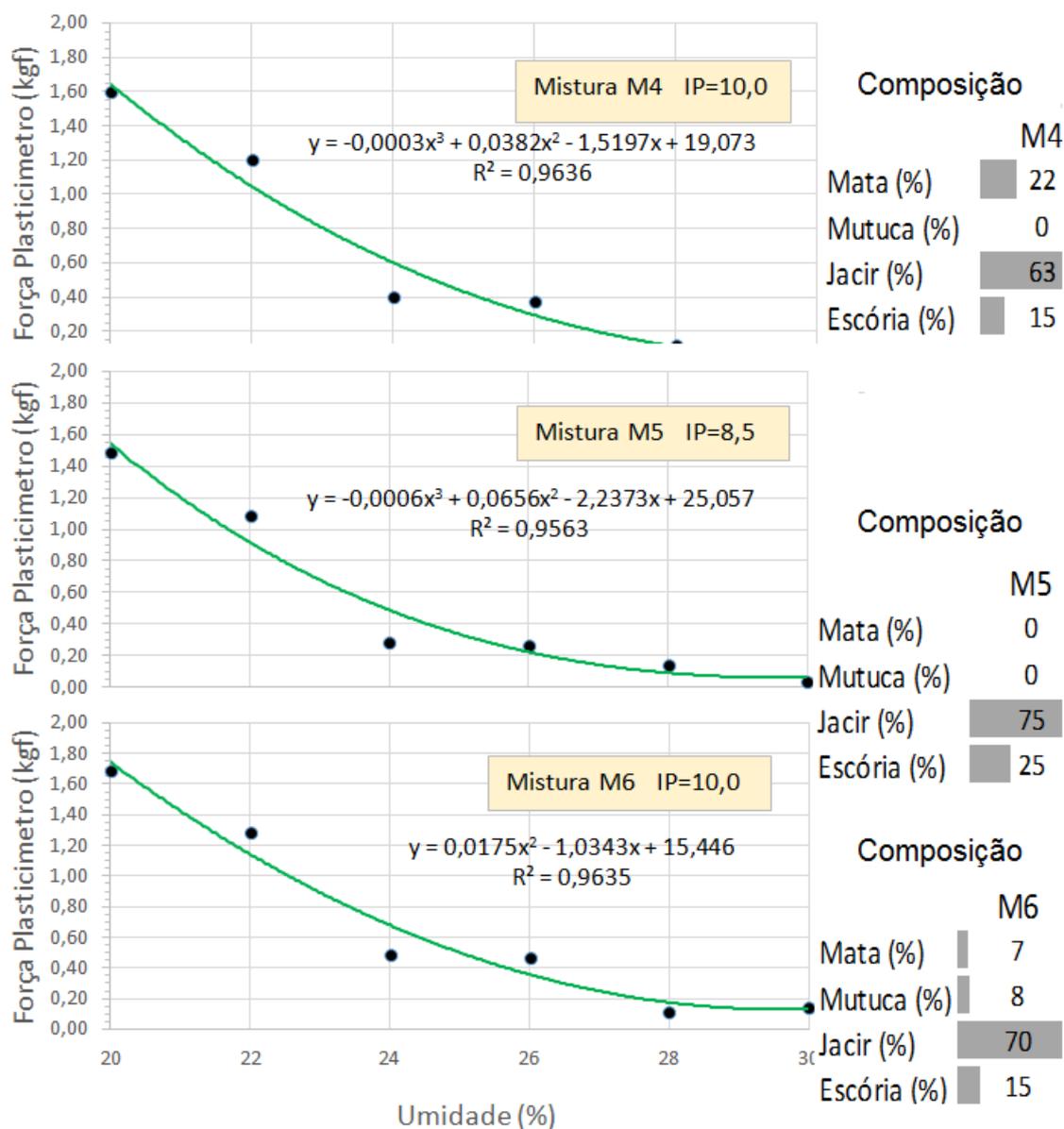


Figura 5.11 - Plasticidade das misturas M4, M5 e M6 com percentuais diferentes de umidade.

Percebe-se que a plasticidade das misturas M4 e M6 é maior que a das outras misturas, onde o percentual de escória foi de 15%, e com alto percentual de argila Jacir.

A partir de 28% de umidade a força aplicada tende à constância, indicando que não adianta mais aumentar a umidade porque não haverá ganho de plasticidade e ainda haverá mais água para se extrair na secagem.

5.2.3 - Ensaio para avaliação da umidade das argilas e da mistura

Para se estabelecer a quantidade de água a ser adicionada em cada composição para uma umidade desejada de 25% a 26% antes da extrusão, foi calculada a umidade de cada matéria-prima in natura, conforme Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Umidade de cada matéria-prima in natura em base úmida e base seca.

Componente	Xbu (%)	Xbs (%)
Argila Mata Santa	15,5	18,3
Argila Mutuca	18,2	22,3
Argila Jacir	14,4	16,9
Escória	6,0	6,4

A umidade varia de acordo com as condições de chuva e umidade no local de armazenagem das argilas e da escória. Em tempos de chuva, logicamente, a umidade das argilas é maior, como ocorreu na época da coleta. No entanto, a umidade da escória é significativamente menor, pois, sendo um material pouco poroso, sua absorção de umidade é menor.

5.2.4 - Ensaio de sinterização das argilas

Os ensaios de sinterização das argilas, realizados na UNESC, apresentaram os resultados estabelecidos nas Figuras 5.12 e 5.13.

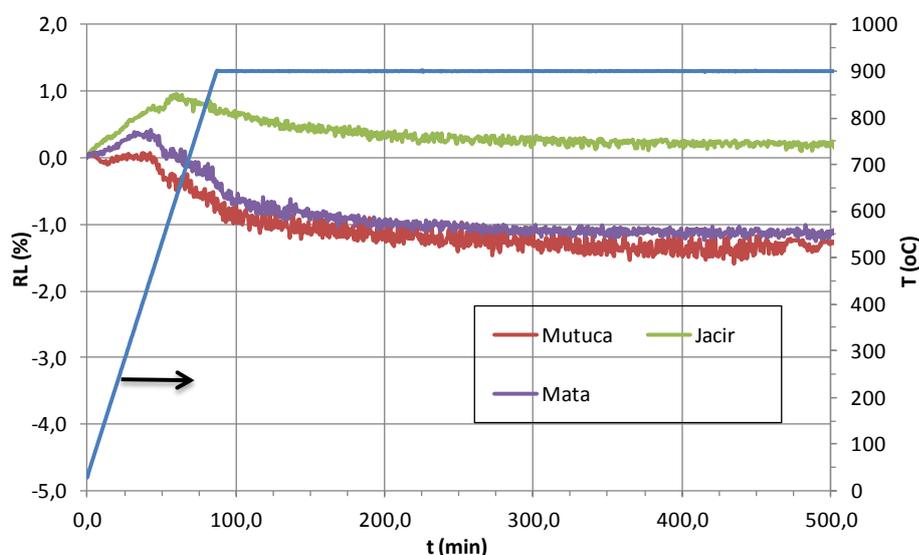


Figura 5.12 - Curvas de sinterização das argilas individualizadas.

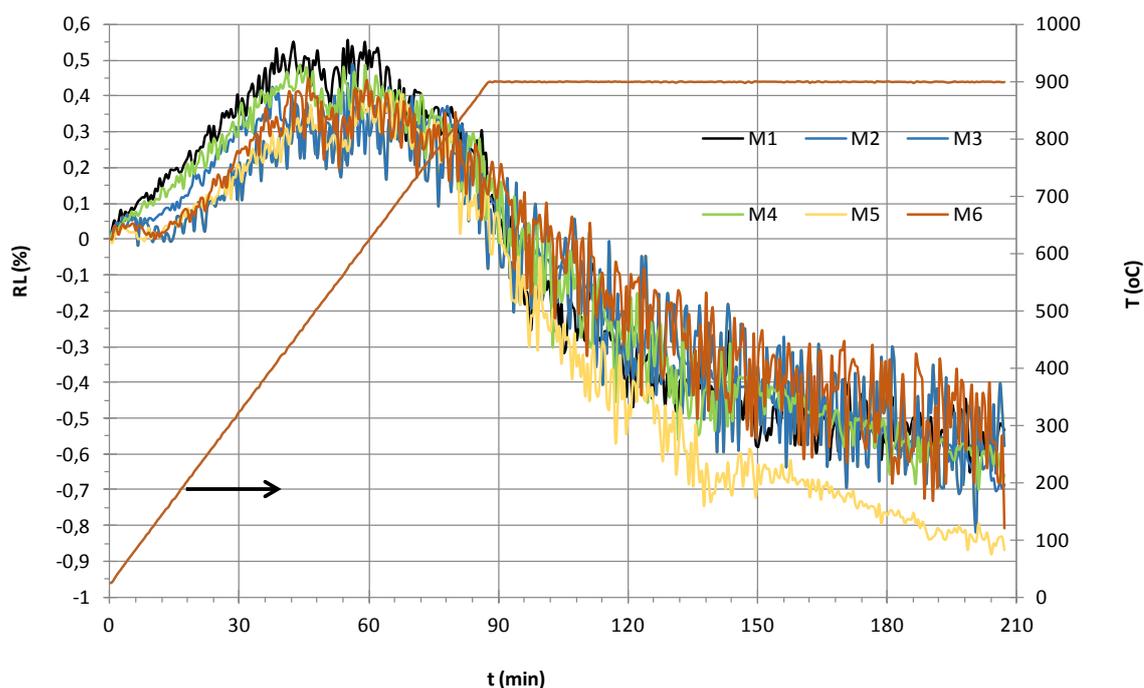


Figura 5.13 - Curvas de sinterização das misturas das argilas.

Pode-se perceber que a mistura M5 foi a que apresentou a maior retração linear, após 70 min de sinterização. Esta mistura, de acordo com a Tabela 4.2, é aquela sem as argilas Mata Santa e Mutuca. No período de 30 a 60 min percebe-se que a mistura M1 foi a que apresentou menor retração, sendo que esta mistura foi a que contém o menor percentual de escória.

5.3 - ENSAIOS COM A MASSA ARGILOSA E A ESCÓRIA PARA PRODUÇÃO DE TELHAS CERÂMICAS

Os corpos-de-prova foram confeccionados com as 3 argilas utilizadas na Cerâmica Avante e adicionou-se percentuais diferentes de escória em cada amostra, partindo da amostra M0 na qual não foi adicionada a escória, tornando-se o corpo-de-prova de referência.

A argila e a escória foram pesadas conforme Tabela 5.4 e misturadas em betoneira, para em seguida receber água de modo a ter uma mistura com 26% de umidade, para poder passar na maromba e gerar os corpos-de-prova.

Tabela 5.4 - Quantidade de matéria-prima por composição (g).

	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Mata	3.377,6	2.814,6	2.064,1	1.125,9	4.128,1	0,0	1.313,5
Mutuca	3.789,5	2.991,7	2.193,9	1.196,7	0,0	0,0	1.595,6
Jacir	12.036,2	12.036,2	12.036,2	12.036,2	12.036,2	14.328,8	13.373,6
Escória	0,0	1.102,0	2.361,5	3.935,8	2.361,5	3.935,8	2.361,5
Água	796,7	1.055,5	1.344,3	1.705,4	1.474,2	1.735,4	1.355,8
	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0	20.000,0

A Figura 5.14 contém o comparativo das massas de cada argila e da escória junto às composições propostas.

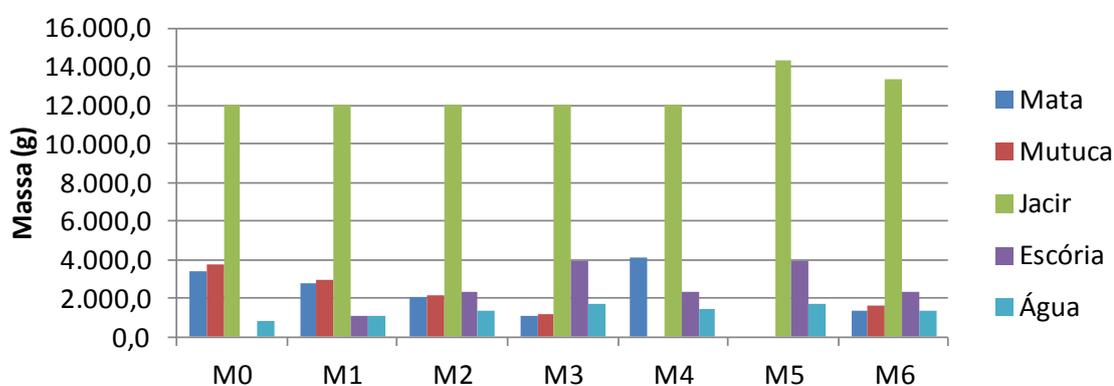


Figura 5.14 - Massa preparada de corpos-de-prova com percentuais variados de escoria adicionada à mistura de argilas.

5.3.1 - Ensaio de umidade dos corpos-de-prova pós extrusão

Para cálculo da umidade dos corpos-de-prova após a extrusão, foram separados 3 corpos-de-prova de cada mistura e envolvidos em plástico para não perder a umidade, sendo levados ao laboratório da FESP para pesagem de suas massas antes da secagem. Em seguida, os mesmos foram colocados em forno a 120°C por 2 h, com pesagem depois do aquecimento com resultados mostrados na Tabela 5.6, comprovando que as umidades de cada mistura estavam próximas do desejado de 24%. As massas após a extrusão e após secagem, além da umidade final de cada amostra são mostradas na Figura 5.15.

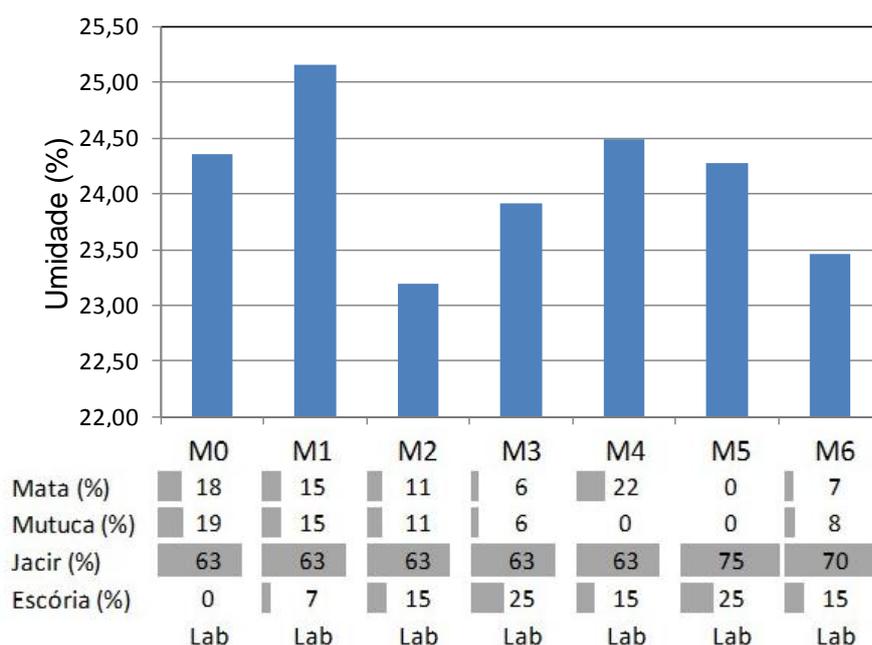


Figura 5.15 - Umidade das misturas das argilas pós extrusão.

Constatou-se que, mesmo tendo as misturas sido preparadas com umidade de 26%, após o manuseio e o processo de extrusão em duas passadas, os corpos-de-prova foram gerados com umidade próxima da desejada de 24%.

5.3.2 - Processo de queima dos corpos-de-prova

Após a confecção, os corpos-de-prova foram queimados na Cerâmica Avante em Capitólio-MG de acordo com a curva de queima apresentada na Figura 5.16.

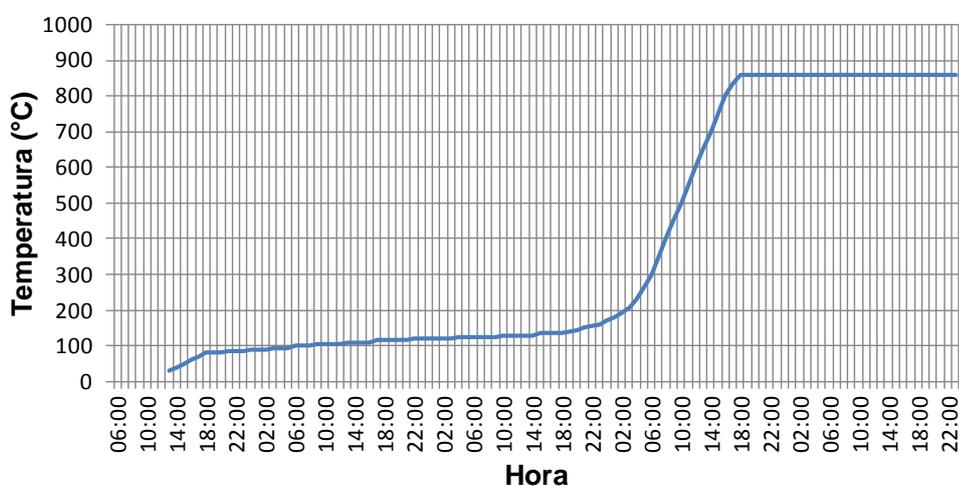


Figura 5.16 - Curva de aquecimento do forno da Cerâmica Avante quando da queima dos corpos-de-prova.

Percebe-se que o máximo de temperatura adotado pela cerâmica em sua produção industrial se aproxima da curva de retração linear da escória e da faixa de sinterização das misturas das argilas apresentadas nas Figuras 5.6 e 5.13.

No processo de queima dos corpos-de-prova, optou-se pela queima juntamente com os produtos da cerâmica, e não na faixa de 950°C a 1300°C, estabelecido pelo ensaio de sinterização da escória, de forma que fossem obtidos produtos com os mesmos parâmetros de aquecimento da cerâmica atualmente. Desta forma, com as etapas de aquecimento e queima aplicados na fabricação das telhas comercializadas pela empresa foram gerados os corpos-de-prova da Figura 5.17.



Figura 5.17 - Corpos-de-prova queimados na indústria Cerâmica Avante.

É possível perceber que o acabamento das peças foi alterado de acordo com o percentual de escória adicionado na argila. As peças aparentemente ficaram mais ásperas com o adicionamento da escória, para as quais foram ensaios de permeabilidade para se ter uma conclusão científica.

5.3.3 - Ensaio de absorção em água

Os ensaios para determinação de parâmetros volumétricos das misturas após o tratamento térmico foram realizados no Laboratório de Solos da FESP, com 3 corpos-de-prova de cada lote. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.18 a 5.21.

Percebe-se na Figura 5.18 que a densidade da fração sólida das misturas M3 e M5 foi maior que a da composição sem escória (M0), o que indica que o teor de 25% de escória favoreceu o empacotamento e a densificação por sinterização das

misturas. É importante ressaltar que esse parâmetro obtido por imersão em água leva em conta os poros fechados na matriz sólida. Assim, uma alteração de densidade do sólido é devida não apenas a alteração na composição cerâmica mas também pela presença de poros oclusos. Nesse sentido, observa-se que a mistura industrial (M7), sem escória, também apresentou densidade elevada, o que pode ser devido a um melhor processo de mistura das matérias-primas na maromba industrial.

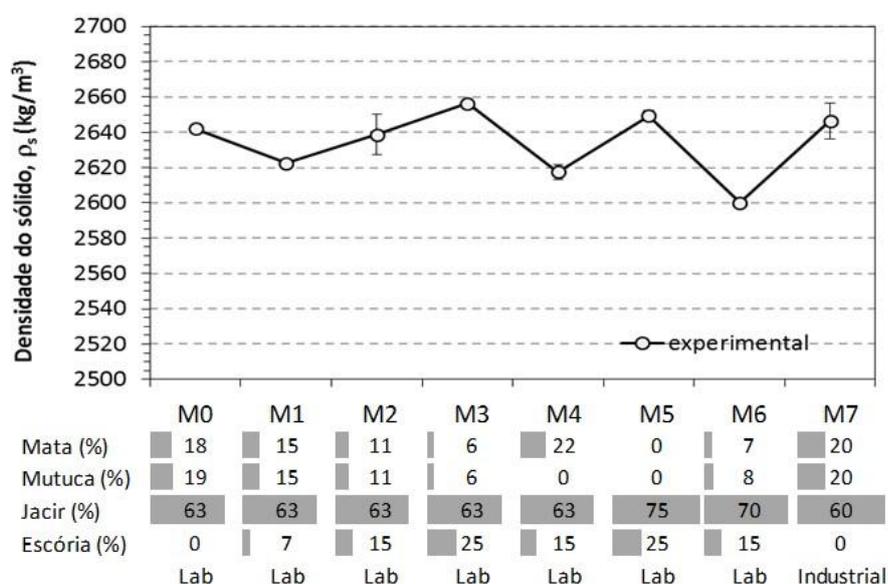


Figura 5.18 - Densidade dos corpos-de-prova em função das diferentes composições.

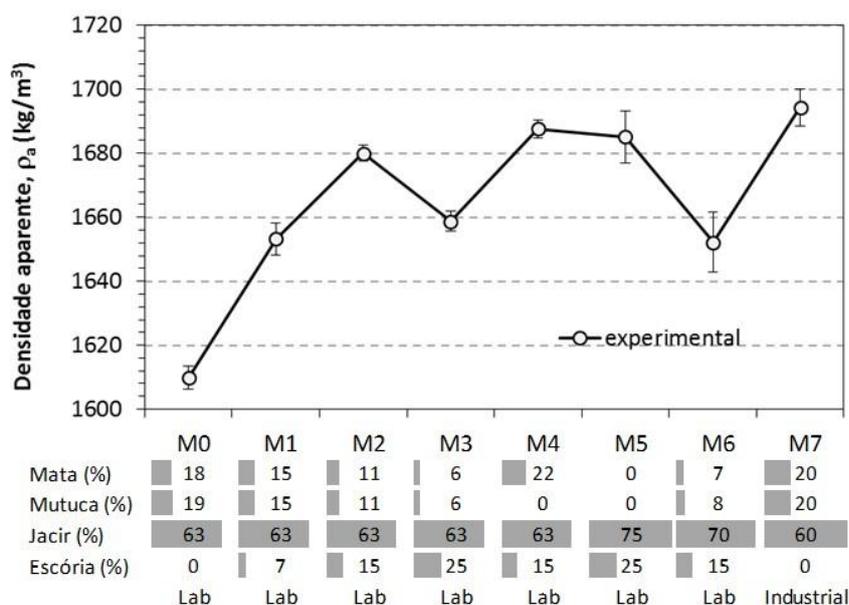


Figura 5.19 - Densidade aparente dos corpos-de-prova em função das diferentes composições.

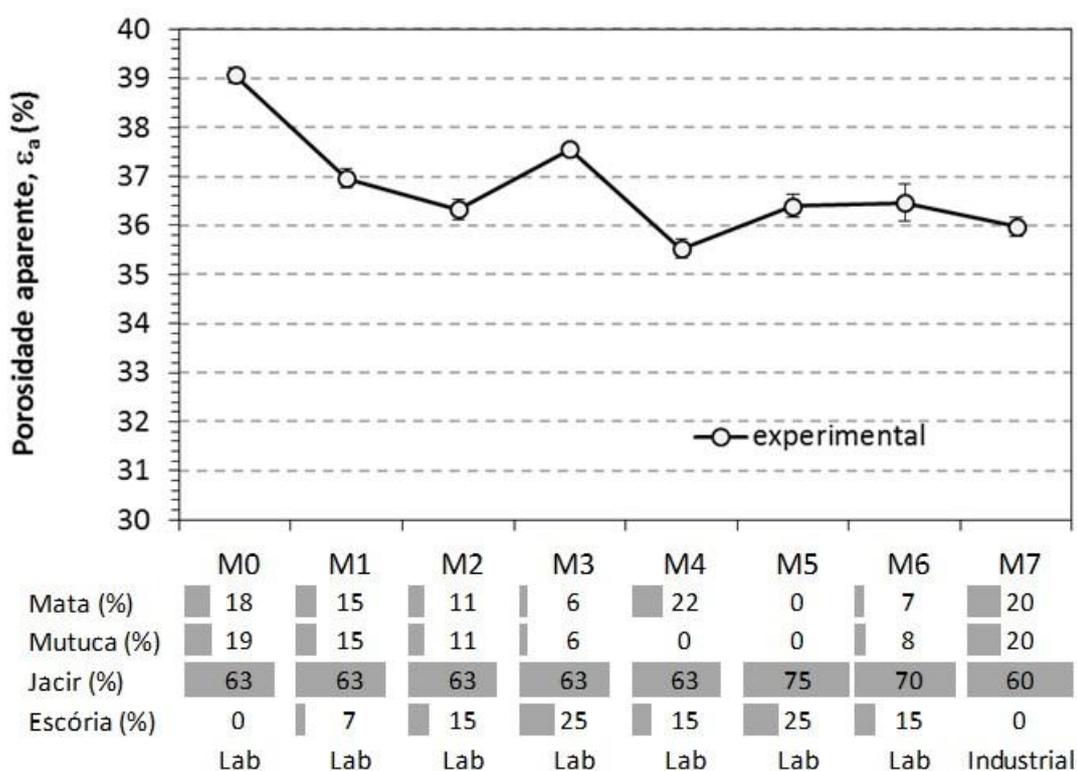


Figura 5.20 - Porosidade aparente dos corpos-de-prova em função das diferentes composições.

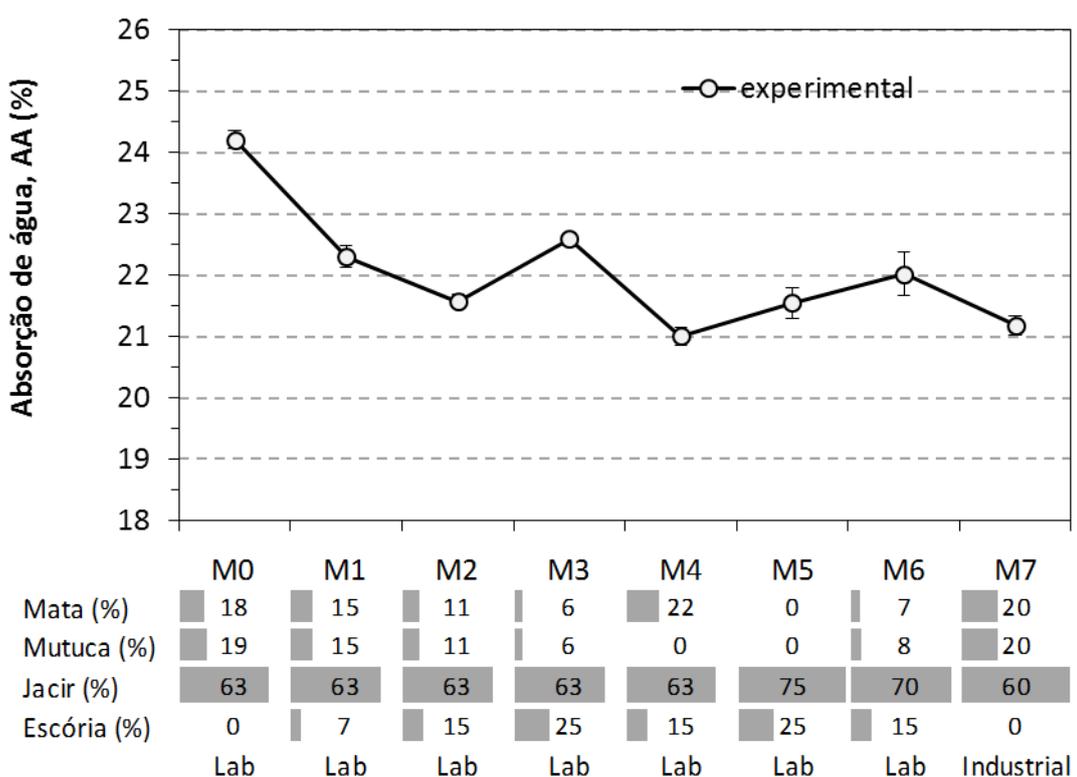


Figura 5.21 - Absorção de umidade dos corpos-de-prova em função das diferentes composições.

Na Figura 5.20, observa-se que a densidade aparente das composições preparadas em laboratório com escória foi mais alta do que a composição sem escória. A densidade aparente leva em conta não apenas os poros oclusos (fechados), mas também aqueles abertos e susceptíveis à penetração de água. Assim, um aumento na densidade aparente está relacionado à diminuição da fração de poros abertos na estrutura pelo melhor empacotamento. Conseqüentemente, uma tendência decrescente na porosidade aparente e na absorção de água é observada nas Figuras 5.20 e 5.21.

Novamente, a composição com melhor grau de empacotamento foi a industrial (M7), provavelmente pelo melhor processamento no misturador e na extrusão. Entre as formulações de laboratório (M0 a M6), observa-se que M4 apresentou desempenho próximo ao da composição industrial (M7) e também muito melhor à da composição sem escória (M0). Os valores obtidos de absorção estão dentro da faixa estabelecida pela norma NBR 7171/1992: $8\% \leq AA \leq 25\%$.

5.3.4 - Ensaio de ruptura por flexão dos corpos-de-prova

Ensaio de resistência mecânica com corpos-de-prova em forma de paralelepípedo foram realizados com as composições descritas na Tabela 4.2. O ensaio de carga de ruptura à flexão simples (FR) ou flexão a três pontos foi realizado em prensa hidráulica elétrica no Laboratório de Materiais da UFSCar, de acordo com a NBR 15.310, utilizando dispositivo que permitiu aplicação de carga contínua a uma razão máxima de 50 N/s (5 kgf/s), com dispositivo de leitura de carga digital, com sensibilidade de 0,01 kgf.

A tensão da força empregada para ruptura dos corpos-de-prova das diversas composições propostas é mostrada na Figura 5.22. Percebe-se que a força de ruptura para misturas (M1 a M6) foram todas maiores que a força para ruptura por flexão da mistura "M0", correspondente à composição sem adição de escória e equivalente à mistura utilizada na cerâmica em estudo. Conclui-se neste ensaio que houve um aumento na tensão de resistência à ruptura por flexão quando a escória foi adicionada.

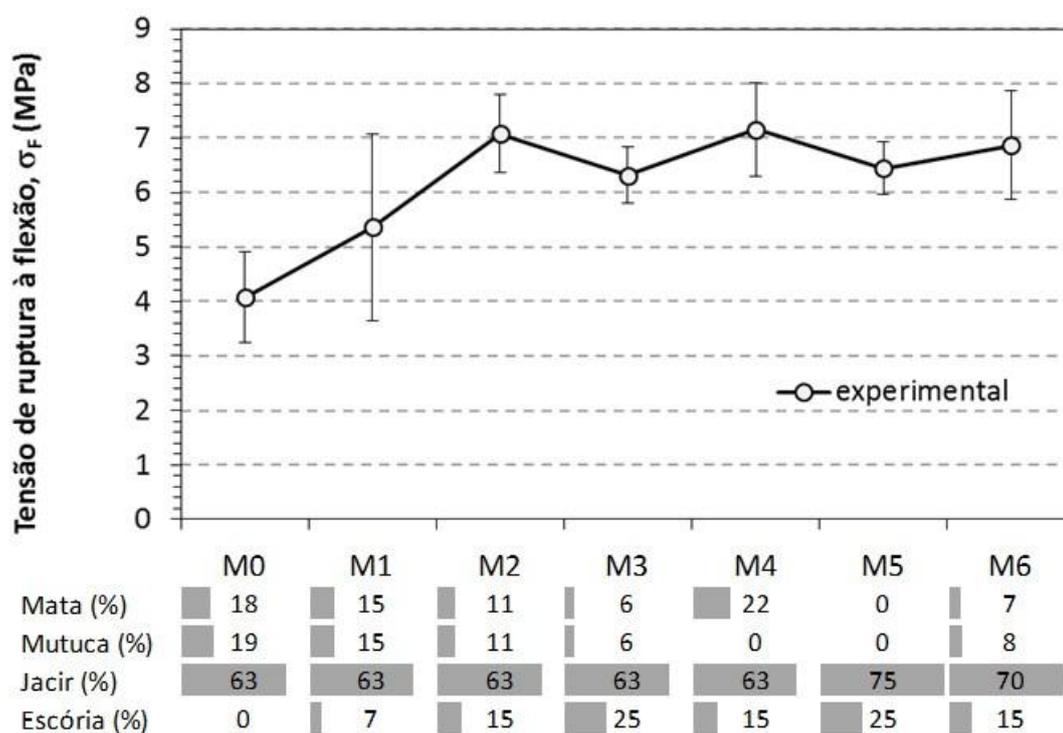


Figura 5.22 - A variação da tensão de ruptura à flexão dos corpos-de-prova em função das diferentes composições.

5.3.5 - Ensaio de ruptura por compressão dos corpos-de-prova

O ensaio de compressão foi realizado em prensa hidráulica elétrica no Laboratório de Materiais da UFSCar, utilizando dispositivo que permitiu aplicação de carga contínua a uma razão máxima de 50 N/s (5 kgf/s), com dispositivo de leitura de carga digital, com sensibilidade de 0,01 kgf, atendendo à norma NBR 15.310.

Na Figura 5.23 é apresentado o comportamento dos corpos-de-prova sob tensão de ruptura à compressão das diversas composições propostas. Na Figura 5.24 é apresentado o comportamento do Módulo de Young dos corpos-de-prova sob tensão de ruptura à compressão das diversas composições propostas.

Percebe-se na Figura 5.23 que a tensão à ruptura por compressão aumentou nas misturas M1 e M2 quando comparada à mistura M0. A presença da escória na mistura pode ser o fator fundamental para este aumento da tensão de ruptura por compressão, adicionado ao fato de ter as misturas das argilas Mata Santa e Jacir, em mesma proporção em ambas as misturas.

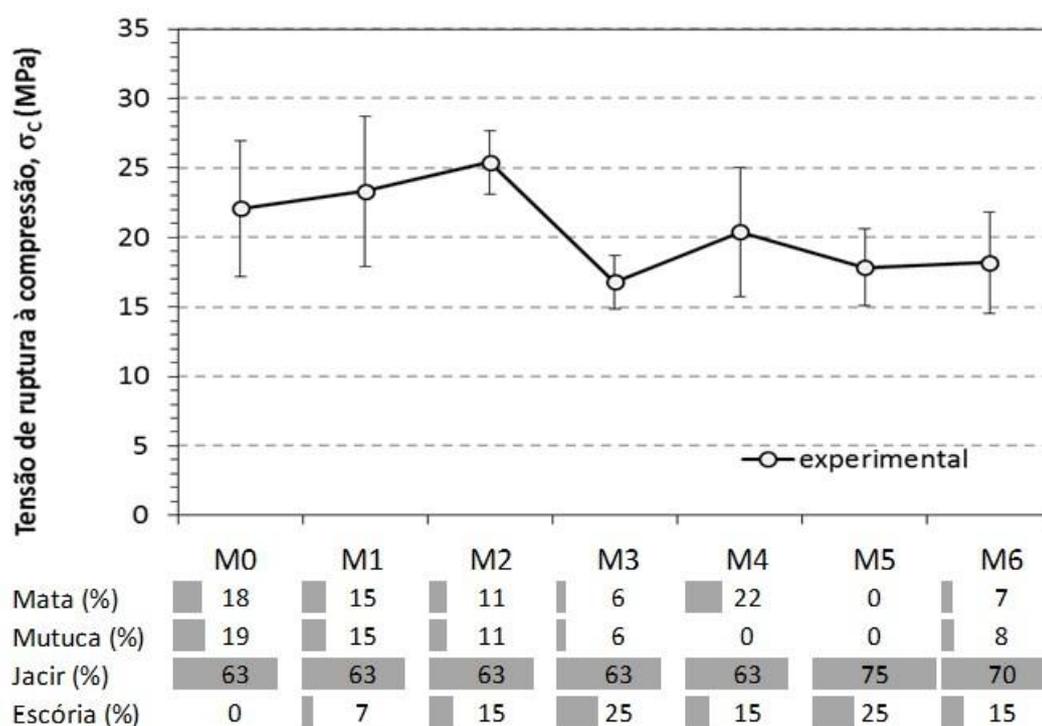


Figura 5.23 - Tensão de ruptura à compressão dos corpos-de-prova em função das diferentes composições.

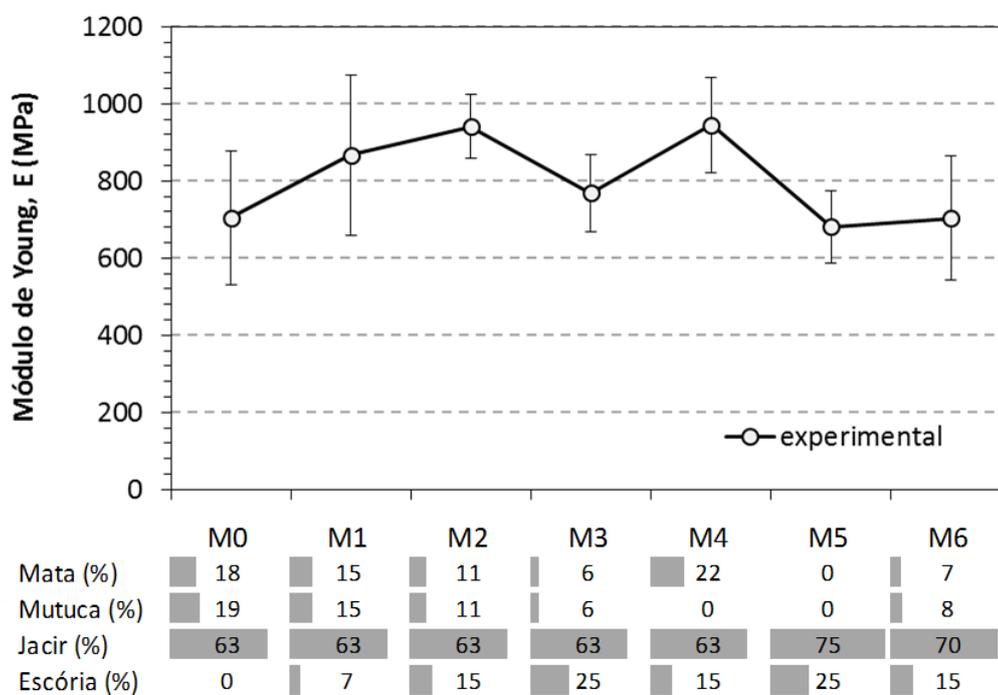


Figura 5.24 - Módulo Young para os corpos-de-prova em função das diferentes composições.

Na avaliação do módulo de Young, percebe-se que houve aumento para as misturas, com ligeira redução nas misturas M5 e M6. De acordo com a NBR 7171/1992, há 7 classes de blocos cerâmicos de alvenaria, conforme Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Classes de resistência de blocos cerâmicos de alvenaria (NBR 7171).

Classe	Resistência à compressão na área bruta (MPa)
10	1,0
15	1,5
25	2,5
45	4,5
60	6,0
70	7,0
100	10,0

Pode-se observar que os valores obtidos no trabalho, independentemente da classe escolhida, estão acima de 10 MPa. Ampliando-se o tipo de aplicação, os valores obtidos são ainda melhores.

5.3.6 - Ensaio de permeabilidade

Os resultados para os coeficientes de permeabilidade dos ensaios realizados com escoamento de ar são mostrados na Figura 5.25 e na Tabela 5.6. Observa-se que as composições contendo escória foram menos permeáveis que a composição sem escória (M0). A composição M4, com 15% de escória 22% de argila Mata Santa e 63% de argila Jacir foi a menos permeável e com resultado compatível com a maior resistência mecânica e menor porosidade e absorção de água. É preciso considerar, nas amostras mais permeáveis, a possibilidade de ocorrência de microtrincas, que facilitam o escoamento de ar e não representam o bulk da estrutura.

Os valores dos coeficientes k_1 e k_2 foram plotados em mapa de permeabilidade proposto por Innocentini (2005), que classifica os meios porosos consolidados conforme tipo de aplicação. Nota-se que composições M0 e M1 apresentaram nível de permeabilidade muito superior ao tipicamente obtidos para concretos refratários e cerâmicas de baixa porosidade.

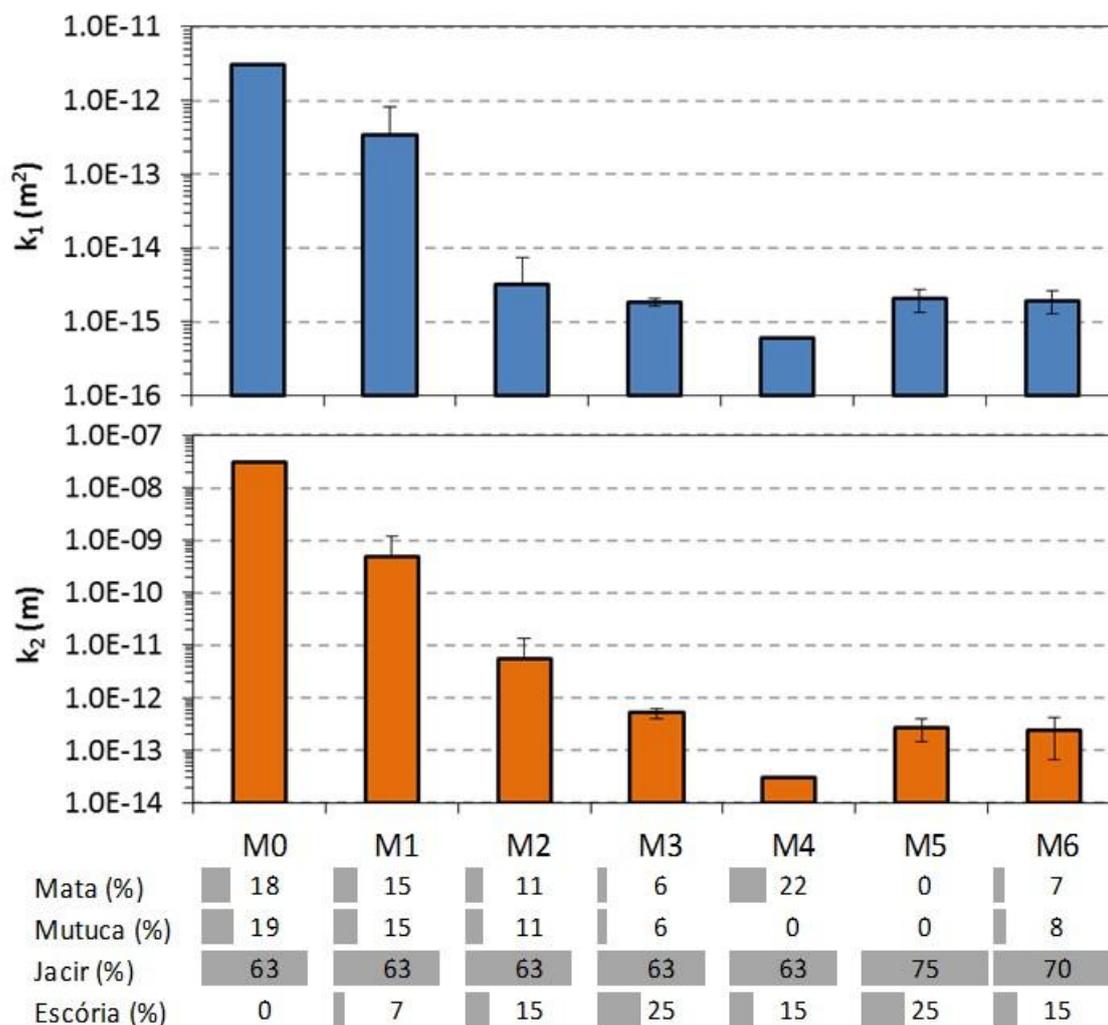


Figura 5.25 - Permeabilidade dos corpos-de-prova de cada mistura proposta.

Tabela 5.6 - Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade.

Amostra	Média		Desvio padrão	
	k_1 (m^2)	k_2 (m)	k_1 (m^2)	k_2 (m)
M0	3.08E-12	3.06E-08	-	-
M1	3.44E-13	5.02E-10	4.73E-13	6.87E-10
M2	3.28E-15	5.69E-12	4.11E-15	8.01E-12
M3	1.86E-15	5.17E-13	2.41E-16	1.20E-13
M4	6.09E-16	3.13E-14	-	-
M5	2.06E-15	2.77E-13	7.44E-16	1.31E-13
M6	1.94E-15	2.39E-13	6.54E-16	1.74E-13

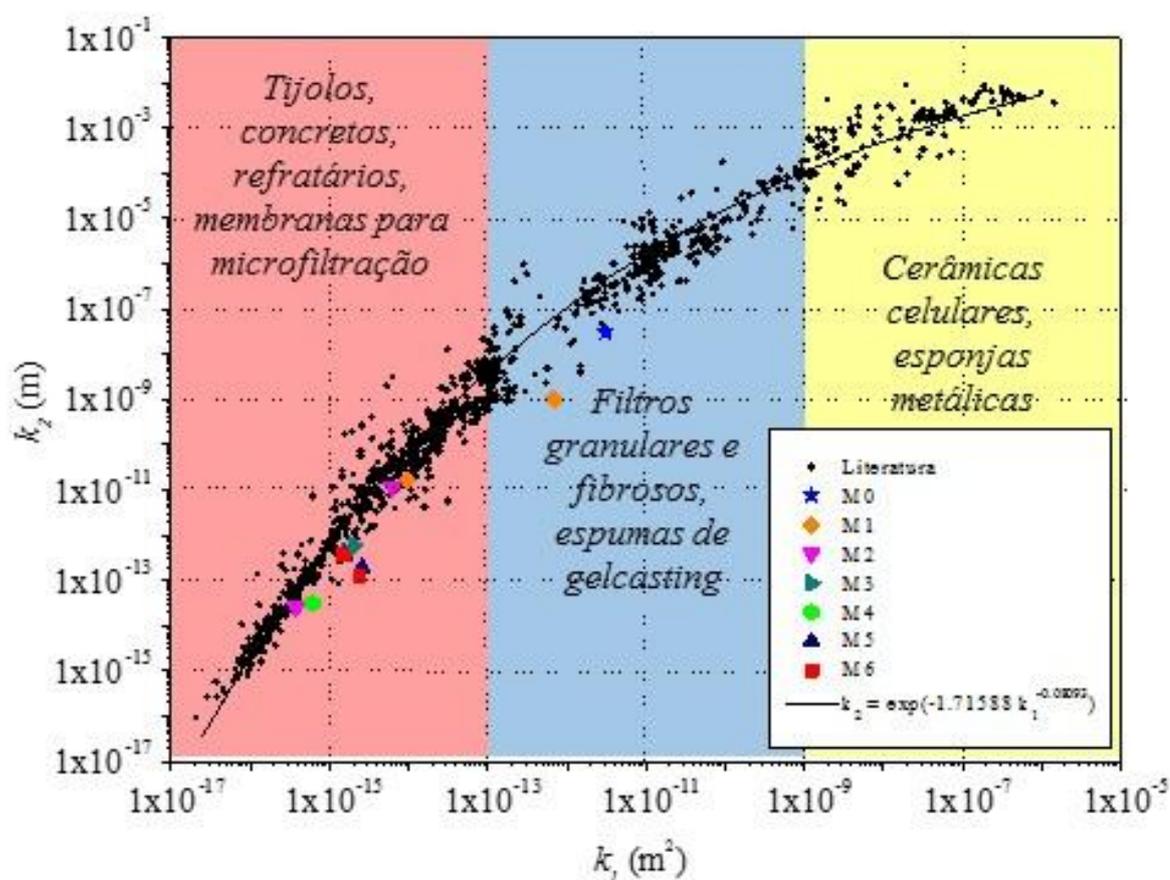


Figura 5.26 – Mapa de permeabilidade com localização das composições estudadas neste trabalho.

5.3.7 - Ensaio de lixiviação dos corpos-de-prova

O ensaio de lixiviação realizado na UNAERP resultou nos dados apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Dados obtidos no ensaio de lixiviação dos corpos-de-prova.

Ensaio Lixiviado	Limite Máximo (mg/L)							
	M0 (mg/L)	M1 (mg/L)	M2 (mg/L)	M3 (mg/L)	M4 (mg/L)	M5 (mg/L)	M6 (mg/L)	
Cadmio	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,5
Chumbo	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	5,0
Cromo Total	0,06	0,08	0,11	0,42	0,10	0,12	0,13	5,0
Fluoreto	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	150,0
Prata	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	5,0

Desta forma, não se encontrou nenhum metal com concentração significativa e maior que o permitido pelas normas brasileiras.

6. CONCLUSÕES

O cenário da produção de produtos cerâmicos como as telhas e os tijolos pelas indústrias da região do sudoeste mineiro não é diferente do restante do país, com empresas pouco profissionalizadas e com processo industrial antigo. Em paralelo, a geração de resíduos pelas mineradoras de níquel, na região de estudo e em todas as regiões produtivas é elevada, demandando soluções mais inteligentes, ao contrário do simples armazenamento do resíduo nos pátios das mineradoras.

Com este cenário, é de grande valia dar uma destinação mais nobre ao subproduto da mineradora, melhorando as propriedades dos produtos das cerâmicas vermelhas, aliando um material abundante a um produto de enorme aceitação no mercado da construção civil. Portanto, neste contexto, as principais conclusões específicas deste trabalho foram:

- A escória apresentou diâmetro médio que favorece a composição nas misturas com as argilas apresentando metais sempre abaixo dos limites das normas brasileiras nos ensaios de lixiviação e solubilização. Apresentou comportamento amorfo com picos de cristalização após tratamento térmico a 910°C, demonstrando características vitrocerâmicas. Tem predominância de sílica, ferro e magnésio na composição química e sinteriza em uma faixa entre 840°C e 890°C, coincidindo com a temperatura do forno industrial na queima dos produtos cerâmicos.
- Nos ensaios com as argilas, percebeu-se que são compostas de partículas bastante finas, de boa plasticidade para a fabricação de telhas e blocos cerâmicos. A argila Jacir tem maior plasticidade que as argilas Mata Santa e Mutuca. As umidades das argilas variam de acordo com as condições climáticas da região, e conseqüentemente o adição de água ocorre observando estas condições. No ensaio de sinterização das argilas, a Jacir apresentou retração linear positiva enquanto que as outras argilas apresentaram retrações lineares negativas.
- As misturas M4 e M5 apresentaram maior plasticidade, com adição de 15% de escória e com alto percentual da argila Jacir. A mistura M5 foi a que apresentou a maior retração linear. A densidade da fração sólida das misturas com escória foi maior que a da composição sem escória, indicando que o teor de escória favoreceu o empacotamento e a densificação por sinterização das

misturas. A densidade aparente das composições com escória foi mais alta que a composição sem escória.

- Nos ensaios de ruptura por flexão, percebeu-se que todas as misturas apresentaram forças maiores que a mistura sem escória, comprovando ganho nesta propriedade. Nos ensaios de ruptura por compressão, percebe-se que a força aumentou nas misturas M1 e M2, enquanto que as outras misturas houve uma diminuição quando comparada com a M0, sem escória.
- No ensaio de permeabilidade, percebeu-se que as misturas com escória se apresentaram menos permeáveis que a mistura sem escória, demonstrando que a escória ao ser sinterizada na queima, ocupou os espaços entre as partículas.
- Nos ensaios de lixiviação percebeu-se que nenhum metal foi encontrado na solução em quantidade significativa e também maior que o limite permitido pela NBR 10.004.

Do ponto de vista geral, os resultados obtidos estão de acordo com os esperados para as formulações propostas. Com base no comportamento de plasticidade e de queima de cada matéria-prima e da formulação padrão, composições melhoradas foram propostas, cobrindo-se um intervalo de variação composicional coerente com a melhoria desejada. Houve melhora na densidade, na porosidade e conseqüentemente nas propriedades mecânicas.

De todas as composições testadas, a M5, com 75% de argila Jacir e 25% de escória foi a que apresentou melhor ganho, tendo retração linear positiva, apresentando maior densidade de sólido, maior densidade aparente, menor índice de absorção de água e maior tensão de ruptura por flexão comparativamente à mistura sem escória. Há que se salientar que esta mistura não utiliza as argilas Mata Santa e Mutuca.

Como o consumo de argilas mensalmente, pela cerâmica é relativamente alto, com esta mistura proposta haverá a economia de 25% de argila com a substituição das outras argilas pela escória, além do ganho nas propriedades acima descritas.

7. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A importância da destinação da escória de forma mais nobre vem das oscilações dos preços das commodities, como o níquel, que colocam toda comunidade dependente do vigor da mineradora. A melhoria das propriedades de produtos cerâmicos básicos como telhas e blocos, coloca um diferencial nos produtos que imediatamente proporciona geração de empregos e renda a partir da colocação no mercado de um produto diferenciado.

Há que se perceber que a evolução tecnológica em todo mundo provoca mudanças nas alternativas de geração de energia. As coberturas residenciais, comerciais e industriais estão se tornando suporte de placas receptoras de calor, para aquecimento de água e geração de energia elétrica. A melhora da resistência à flexão contribui para este novo modelo construtivo, conforme Figura 7.1.



Figura 7.1 - Telhado com painéis de células fotovoltaicas

Devido à grande importância que uma mineradora tem na comunidade em que está inserida e devido à grande empregabilidade que uma cerâmica proporciona à mesma comunidade, este trabalho tem também uma importância social, além da científica, pois possibilita a destinação de um resíduo criando um diferencial em outro produto.

Desta forma, é importante avaliar outras quantidades de adição de escória de níquel, alterando-se a temperatura máxima de queima, para verificação das consequências na sinterização da escória quando adicionada à mistura de argilas. Este aumento de temperatura poderá ser compensado com a diminuição do tempo de queima, gerando economia substancial para a indústria cerâmica.

Embora esteja sendo adicionado um resíduo, sem custo, de uma mineradora, é importante perceber que haverá necessidade de transporte deste material até a indústria cerâmica, acarretando custos adicionais que devem ser mensurados, propiciando um estudo detalhado da viabilidade financeira desta utilização de resíduo. O mesmo deve ser compensado pela alteração das características das propriedades físicas da telha e/ou dos produtos cerâmicos da indústria, pois a partir de um produto diferenciado, pode-se justificar o relativo aumento de custo gerado pelo transporte do resíduo.

8. REFERÊNCIAS

ABC. Associação Brasileira de Cerâmica. **Cerâmica do Brasil - Anuário Brasileiro de Cerâmica**. Associação Brasileira de Cerâmica, São Paulo, 2002.

ABNT NBR 10.004. Associação Brasileira de Normas e Técnicas. **Classificação de resíduos sólidos**, 2004.

ABNT NBR 10.005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**, 2004.

ABNT NBR10.006. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**, 2004.

ABNT NBR 10.007. **Amostragem de resíduos sólidos**, 2004.

ABNT NBR 15.310. **Componentes Cerâmicos - Telhas - Terminologia, Requisitos e Métodos de Ensaio**, 2009.

ALBUQUERQUE, A.J.P.C. **A reciclagem de resíduos sólidos na construção civil**. Rio de Janeiro, 2004. 72 p. Proposta de tese, apresentada para obtenção de especialização na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ALBUQUERQUE, A.C. **Utilização da Escória de Alto Forno moída no concreto convencional e compactado com rolo**. Artigo, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, V.2, n.1, p. 35-39, 2005.

ALMEIDA, A.M.M.; SILVEIRA, R.C. Manual de Operação – **Fornos Elétricos de Redução**. Relatório Técnico. 122 p. Belo Horizonte, RCS Consultoria e Participações, 1990.

ALVES, F. Mineração mais que dobra participação no PIB Nacional. **Revista Brasil Mineral**. Ano 22, n. 240, 2005.

ANDRADE, P.S. **Avaliação do impacto ambiental da utilização de resíduos de estações de tratamento de água em indústrias de cerâmica vermelha: estudo de caso.** Dissertação de mestrado. Mestrado em engenharia civil- área de concentração: Saneamento e meio ambiente. Unicamp. Campinas 2005.

ANFACER. Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmicas - **Boletim - Revista Digital.** São Paulo, 2006.

ANGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ANGULO, S.C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V.M. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil.** Artigo, Universidade de São Paulo, USP. 13 p. São Paulo, 2000.

ANICER - Associação Nacional das Indústrias Cerâmicas. In: SENAI. **O Perfil da Indústria Cerâmica no Rio Grande do Sul.** Relatório de Pesquisa. Porto Alegre: SENAI/FIERGS, 2007, 41f.

ASTM - **American Society for Testing and Materials.** Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test) D2872, 1999.

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado.** Barcelona, 1996. 222p. Tese (Doutorado) - Universidade Politécnica da Catalunya.

BASTOS, F.A. **Avaliação do Processo de Fabricação de Telhas e Blocos Cerâmicos, Visando a Certificação do Produto,** 2003. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BERNI, M.D.; BAJAY, S. V.; GORLA, F.D. Relatório Setorial - Setor Cerâmica - **Oportunidades de eficiência Energética para a Indústria**, Brasília, 2010.

BITTENCOURT, A.L.B. **Otimização de escória do forno elétrico da Caraíba Metais S.A.**, 1992. 187f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia). Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BOAVENTURA, L. **Utilização de rejeitos na fabricação de blocos de vedação**. Centro Universitário Newton Paiva. Belo Horizonte. 2012

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Níquel - Novos Parâmetros de Desenvolvimento**. BNDS, Brasília, 2000.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário mineral**. Brasília: DNPM, 2001.

_____. **Balanço mineral**. Brasília: DNPM, 2001.

_____. **Balanço mineral**. Brasília: DNPM, 2013.

_____. **Economia mineral**. Brasília: DNPM, 2001.

_____. **Informe Mineral**. Brasília: DNPM, 2001.

_____. **Perfil analítico do níquel**. Brasília: DNPM, 2001.

_____. **Preços de metais**. Brasília: DNPM, 2001.

_____. **Mineral Commodity Summaries**. 2013.

_____. Diretoria de Geologia e Mineração. Agência de Desenvolvimento Industrial e Mineral. **Diagnóstico do setor mineral goiano**. Brasília: DGM, 2002.

CAMPOS, H.K.; RESENDE, M.D.; SINARA, M.C. Programa para correção das deposições e reciclagem de resíduos em Belo Horizonte. **In:** Seminário Reciclagem de resíduos para a redução de custos na Construção Habitacional. Belo Horizonte, 1994. p.56-65.

CAMPREGHER N., **Estudo de viabilidade da incorporação do lodo da estação de tratamento de efluentes da indústria de papel, celulose e aparas em material cerâmico**, 2005, Disponível em <http://www.tede.ufsc.br/teses/PENQ0173.pdf>. Acesso em 12 de julho de 2011.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. 24° **Balanco Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG**. Superintendência de Tecnologia e Alternativas Energéticas, Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/.../Documents/24%20Balanco%20energetico.pdf>>

CINCOTTO, M.A. Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado. **Boletim IPT**, São Paulo, v. 2, n. 65, 1994.

CHIARA, G.D.; BORRONI, M.; CHIARA, A.D. **Curso de formação para profissionais da cerâmica vermelha: a tecnologia do processo de produção na indústria de cerâmica vermelha**. Org. pelo ICE: Instituto Italiano para o Comércio Exterior e pela ACIMAC: Associazione Costruttori Italiane Machine Attrezzature Per Ceramica. Florianópolis, ACIMAC, 2000. 206 p/Apostila/.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2013**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=2263>>. Acesso em: 15 maio. 2013.

DOMÍNGUEZ, E.A; ULLMAN, R. **Ecological bricks, made with clays and steel dust pollutants**. Applied Clay Science, Volume 11, Issues 2–4, December 1996, Pages 237-249

DORSTHORST, B.J.H; HENDRIKS, C.F. Re-use of construction and demolition waste in the EU. In: CIB Symposium: Construction and Environment – theory into practice., São Paulo, 2000. **Proceedings**. São Paulo, EPUSP, 2000.

ETENE. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste - **Revista BNB Conjuntura Econômica**. Fortaleza, CE, 2010

FERREIRA, D.; MESQUITA, H.; LIMA, R. **Níquel**. Trabalho de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará. Belém, PA, 2008.

FERREIRA, L.C. **Potencial da utilização de resíduos industriais na formulação da massa de cerâmica vermelha para a fabricação de blocos de vedação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. 49 p. Curitiba, 2012.

FRANCKLIN JUNIOR, I.; DE ALMEIDA, F.A.S. **Verificação das propriedades de concretos produzidos com agregados de escória de níquel provenientes de mineração do município de Pratápolis-MG**. 52º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON, out 2010.

GODINHO, K.O. **Incorporação de resíduos de vidro em cerâmica vermelha**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia e ciências dos materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, RJ. 2004

GOMES, C.F. **Argilas - o que são e para que servem**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 475p., 1988.

HAMASSAKI, L.T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. Uso do entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL. São Paulo, 1997. **Anais**. São Paulo (EPUSP), 1997. p.11-20.

HOLANDA, J.N.F.; SANTOS, R.S.; SOUZA, G.P. **Caracterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero e sua utilização**

em cerâmica estrutural. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, 2002.

IBAMA. **Manual de Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração: Técnicas de Vegetação.** Brasília/DF, 1990.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeção de População.** Site institucional. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>., 2010.

INFOMINE - BRASIL INFOMINE - Inteligência e Tecnologia em Mineração. Site institucional. Disponível em <http://brasil.infomine.com/publications/>, 2015

INNOCENTINI, M.D.M.; SEPULVEDA P.; ORTEGA F., Permeability, Chapter 4.2 in the book **Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications**, Michael Scheffler (Editor), Paolo Colombo (Editor), ISBN: 3-527-31320-6 (2005).

INSG – International Nickel Study Group, 2010. Site institucional. Disponível em <http://www.insg.org/>. Acessados as estatísticas do níquel e outros informes.

INSTITUTO AÇO BRASIL **Panorama de Escória de Aciaria no Brasil.** Seminário Internacional de Aplicação da Escória de Aciaria. Belo Horizonte/MG – Brasil – nov 2010.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de procedimentos para a indústria de cerâmica vermelha (estrutural).** Relatório nº 24422. São Paulo. 186 p., 2004.

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

LEVY, S.M. **Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização com agregados para argamassas e concretos.** São Paulo, 1997. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LIMA, R.L.; ZAMPIERON, J.V. **Avaliação da escória de níquel como possível matéria prima para pigmento cerâmico.** Ciência et Praxis v. 2, n. 4, 2009.

LOUZADA, D.M. **Contribuição ao estudo da aplicação das escórias siderúrgicas na fabricação de blocos de concreto.** 1991, 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.

LOYOLA, L.C. (1998) Programa de capacitação de recursos humanos na indústria cerâmica do estado do Paraná. Curitiba.

MAGALHÃES, L.F. Americano do Brasil e o novo ciclo da mineração em Goiás. **Conjuntura Econômica Goiana**, Goiânia, n. 3, 2004, p. 34-36.

MAIA, F.S. **Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do polo cerâmico de Campos dos Goytacazes.** Campos dos Goytacazes, 2012. 97 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

MANO, E.S. **Caracterização Tecnológica de Produtos de Beneficiamento de Minério de Ni-Cu-Co de Fortaleza de Minas, MG.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 91 p. São Paulo, 2002.

MARCIANO, E.; KIHARA, Y. Looking green. **World Cement**. Abril, 1997.p.82-88.

MARIANO, W.A. (Comunicação pessoal com técnico do DEMa da UFSCar), 2014

MARQUES, J.C. Escória de alto forno: Estudo visando seu emprego no preparo de argamassas e concretos. Boletim Técnico - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1994.

MÁS, E. **Diagnóstico das matérias-primas e metodologia da extração das matérias-primas**. Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha. São Paulo, Polo Produções, 2002, 3 v.

MASUERO, A.B. **Estabilização das escórias de aciaria elétricas com vistas a sua utilização como material para construção civil**. Porto Alegre, 1998. 52 p. Proposta de tese, apresentada para pré-qualificação de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

MENEZES, R.R.; ALMEIDA, R.R.; SANTANA, L.N.L.; NEVES, G.A.; LIRA, H.L.; FERREIRA, H.C. **Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos**. Revista Cerâmica. Fascículo **53**. 2007. Pag.192-199

MONTEIRO, C.; FRANCO, M.; PINATTI, A.; BARBOSA, F.; SOUSA, R.; CARVALHO, F. (2007) **Noções Básicas do Processo Produtivo de Cerâmica Vermelha**, Centro de Tecnologia da Cerâmica “Wildson, Gonçalves” - SENAI, Teresina - Piauí, Brasil.

MOURÃO, M.B. (org.). **Introdução à Siderurgia**. 1a. ed. 428p. São Paulo, ABM, 2007

MORALES, G.; ANGULO, S.C. **Produção de concreto de cimento portland utilizando entulho de obra reciclado**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7. Salvador, 2000. **Anais**. Salvador, ANTAC, 2000.

MULDER, E.; BROUWER, J.P.; BLAAKMEER, J.; FRENAY, J.W. **Immobilisation of PAH in waste materials**. In: Waste Materials in Constructions. Inglaterra, 2000. **Proceedings**. Inglaterra, 2000. p. 953-62.

NIZZOLA, D.L. **A moldagem e sua influência nas sucessivas fases no processo de fabricação cerâmica**. São Paulo, v. 31, n. 190, p. 207-217, nov, 1985

NORTON, F.H. **Introdução à Tecnologia Cerâmica**. Reading Massachusetts, Adisson Wesley Publishing Company, Inc. 1973. 324p.

OLIVEIRA, G.E. **Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha.** LAMAV-CCT, Universidade Estadual do Norte Fluminense Campos dos Goytacazes, RJ., 1993.

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA J. N. Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, Rio de Janeiro, v. 50, p. 75-80, 2004.

PATIRE NETO, A. **Curso Básico de Cerâmica.** São Paulo, Associação Brasileira de Cerâmica e Escola SENAI Mario Amato, 1994. 43 p.

PASCHOAL, J.A.A. **Estudos de parâmetros de qualidade para a cerâmica estrutural vermelha.** São Carlos, 2003. 93 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos.

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de Construção.** 4 ed. Proto Alegre, Globo, 2007. 435 p.

PIERONI, J. P. **Proposta de recuperação das áreas degradadas pela extração de níquel, na mineração Morro Azul, Pratápolis/MG.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. 102 p. Rio Claro/SP, 2013.

PINTO, T.P. A nova legislação para resíduos da construção, **Revista Técnica**, São Paulo, v. 82, p.62-64, jan. 2004.

POLISSENI, A.E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício.** Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F.G. **Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha.** Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 2,n. 01-02,p. 31-35, jan/abr. 1997.

QUEBAUD, M.R.; BUYLE-BODIN, F. A reciclagem de materiais de demolição: utilização dos agregados reciclados no concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO(CBC), 5. São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, 1999. 14p.

REIS, J.P. **Incorporação de resíduos industriais em massa cerâmica usada na fabricação de tijolos**. Dissertação de mestrado Programa CCT/UEDESC. Joinville, 2007

RICHTER, D. **Uma Rota de Recuperação de Metal a Partir de Escória Secundária da Produção de Ferro-Níquel**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. 122 p. São Paulo, 2009.

ROSEMBERG, S.J. **Nickel and Its Alloys**. 1st ed. 156 p. National Bureau of Standards Monograph n° 106, National Bureau of Standards, Washington, 1968.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de Argilas**. São Paulo, Edgar Blucher, 1989. p 393-405

SANTOS, G.P.P. **Um Estudo sobre a Utilização da Escória de Ferro-níquel em Pavimento Rodoviário**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia. 125 p. Rio de Janeiro, 2013.

SELHORST, M. Ensino de Normas Técnicas para verificação de qualidade de produtos de cerâmica vermelha utilizando sistema especialista. 2001. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SILVA, E.B. **Viabilidade do uso de escória do concentrado de níquel fundido em alto forno como agregado miúdo para concreto**. Faculdade de Engenharia de Passos – FESP/UEMG – Campus de Passos. Monografia, 2006, 81p. SJOSTROM,

SINDICER; SINCOTAP - Sindicato das Indústrias Cerâmicas. Relatório de Pesquisa. Minas Gerais, 2015.

SPADER, R.Z. **Introdução de novos materiais em massas de telhas cerâmicas.** Trabalho de Conclusão de curso – Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC. 69 p. Criciúma, 2009.

TAVARES, D.S.; ODA, S.; MOTTA, L.M.G. **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciária) em pavimentação asfáltica.** Artigo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. 14 p. Rio de Janeiro, 2010.

TOLEDO, E.B.S. **Método de utilização de areia de fundição e resíduos de poeira de jateamento para produzir cerâmica vermelha.** Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia e ciências dos materiais. UFPR. Curitiba, 2006

VAN VLACK, L.H. **Propriedades dos materiais cerâmicos.** São Paulo, Edgar Blucher, 1973. 318p.

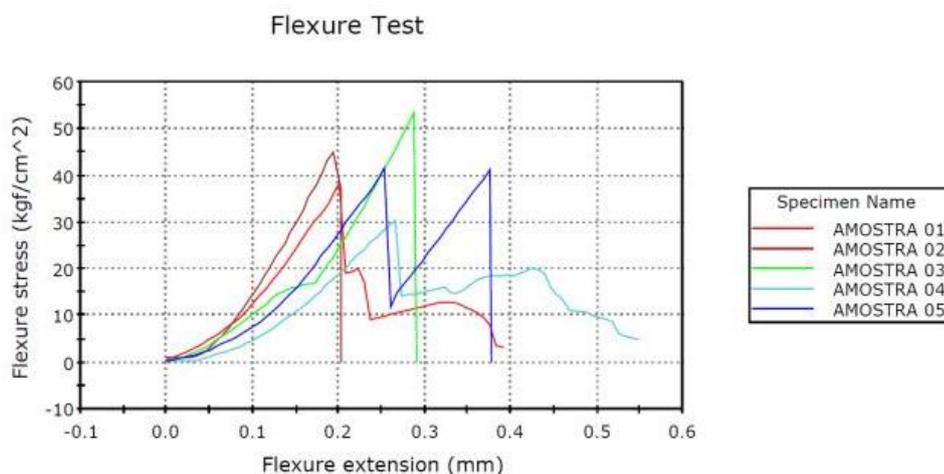
VIEIRA, C.M.F.; PINHEIRO, R.M. (2011) Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha *Cerâmica* 57: 319-323.

VIEIRA, C.M.F.; EMILIANO, J.V. **Incorporação de Rocha Sedimentar em Pó em Massas para Telhas Cerâmicas,** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF. Rio de Janeiro, 2013

ZWAN, J.T. Application of waste materials – a success now, a success in the future. In: WASTE MATERIALS IN CONSTRUCTIONS: PUTTING THEORY INTO PRACTICE. Great Britain, 1997. **Proceedings.** Great Britain, 1997. p.869-81.

APÊNDICE 1

DADOS DOS ENSAIOS DE RUPTURA POR FLEXÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

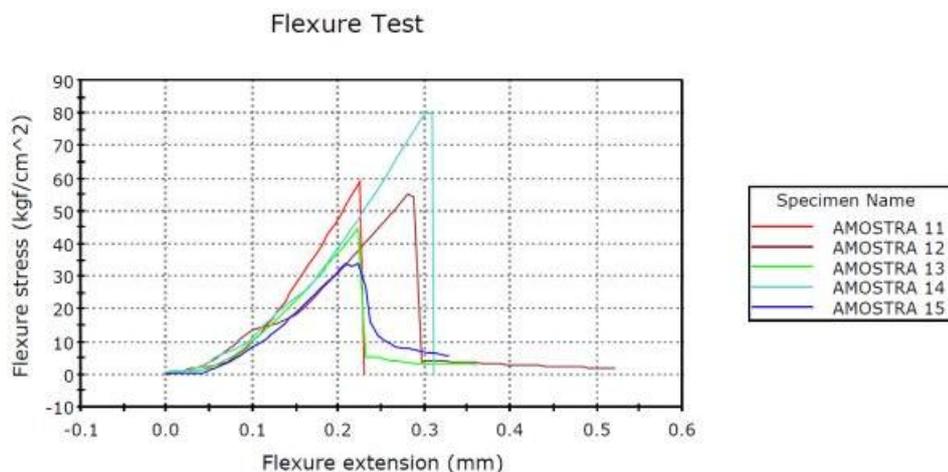


	Specimen label	Maximum Load (kgf)	Stress at Maximum Load (kgf/cm ²)	Modulus (Automatic) (MPa)	Extension at Maximum load (mm)
1	AMOSTRA 01	35,64	38,17	695,23	0,20
2	AMOSTRA 02	41,19	44,67	854,00	0,19
3	AMOSTRA 03	49,19	53,38	880,74	0,29
4	AMOSTRA 04	27,92	30,29	453,04	0,27
5	AMOSTRA 05	39,19	41,36	638,81	0,25
	Mean	38,62	41,57	704,36	0,24
	Standard Deviation	7,77949	8,48357	173,95472	0,04083
	Coefficient of Variation	20,14157	20,40546	24,69668	16,95361
	Minimum	27,92	30,29	453,04	0,19
	Maximum	49,19	53,38	880,74	0,29

Figura A1.1 - Ensaio de ruptura com flexão da amostra "0X".

Tabela A1.1 - Medidas obtidas em ensaio de tração à flexão da amostra "0X".

Amostra	L	C	A	Flexão (kgf)
0.1	16,48	69,83	25,78	35,64
0.2	16,36	68,89	25,84	41,19
0.3	16,36	70,25	25,82	49,19
0.4	16,38	69,47	25,76	27,92
0.5	16,60	70,16	25,79	39,19
Média				38,63

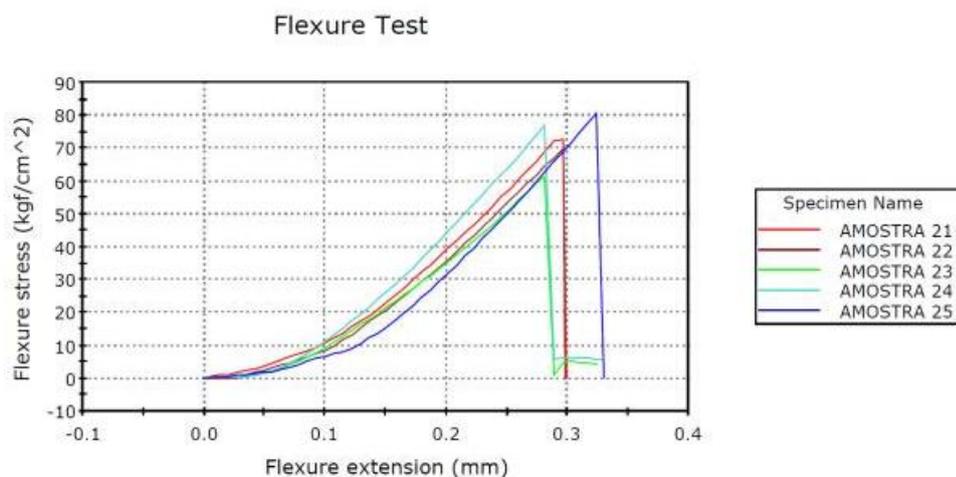


	Specimen label	Maximum Load (kgf)	Stress at Maximum Load (kgf/cm ²)	Modulus (Automatic) (MPa)	Extension at Maximum load (mm)
1	AMOSTRA 11	55,17	58,74	1099,15	0,22
2	AMOSTRA 12	55,05	55,11	737,27	0,28
3	AMOSTRA 13	42,12	44,76	785,59	0,22
4	AMOSTRA 14	73,94	80,63	1075,84	0,30
5	AMOSTRA 15	33,38	33,98	639,25	0,21
	Mean	51,93	54,65	867,42	0,25
	Standard Deviation	15,37034	17,44071	207,86756	0,04071
	Coefficient of Variation	29,59637	31,91634	23,96386	16,42163
	Minimum	33,38	33,98	639,25	0,21
	Maximum	73,94	80,63	1099,15	0,30

Figura A1.2 - Ensaio de ruptura com flexão da amostra "1X".

Tabela A1.2 - Medidas obtidas em ensaio de tração à flexão da amostra "1X".

Amostra	L	C	A	Flexão (kgf)
1.1	16,47	70,82	25,97	55,17
1.2	16,72	71,86	26,80	55,05
1.3	16,53	71,13	25,83	42,12
1.5	16,41	71,11	25,54	73,94
1.5	16,66	71,15	26,54	33,38
Média				51,93

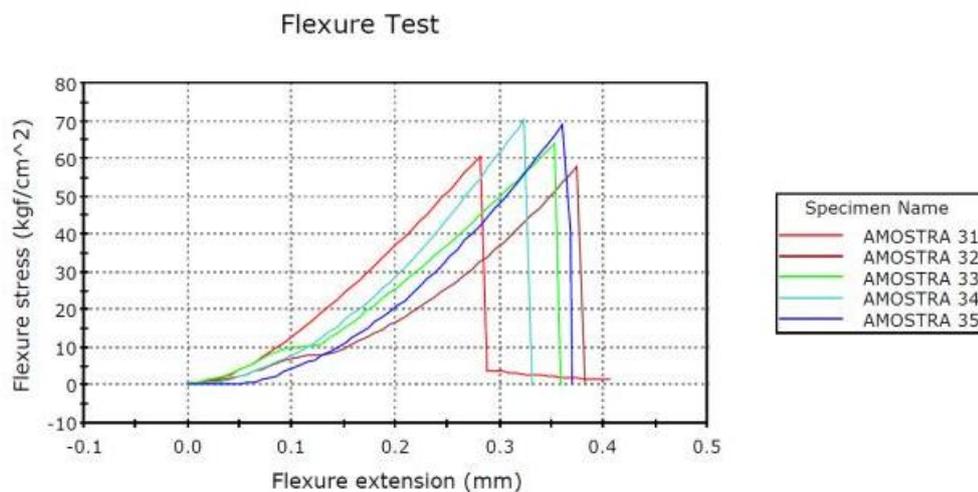


	Specimen label	Maximum Load (kgf)	Stress at Maximum Load (kgf/cm ²)	Modulus (Automatic) (MPa)	Extension at Maximum load (mm)
1	AMOSTRA 21	70,47	72,56	887,04	0,30
2	AMOSTRA 22	67,63	69,64	885,28	0,30
3	AMOSTRA 23	59,67	61,44	868,65	0,28
4	AMOSTRA 24	74,46	76,67	1022,82	0,28
5	AMOSTRA 25	78,30	80,62	1038,19	0,32
	Mean	70,11	72,19	940,40	0,30
	Standard Deviation	7,09320	7,30368	82,74992	0,01762
	Coefficient of Variation	10,11763	10,11763	8,79947	5,95498
	Minimum	59,67	61,44	868,65	0,28
	Maximum	78,30	80,62	1038,19	0,32

Figura A1.3 - Ensaio de ruptura com flexão da amostra "2X".

Tabela A1.3 - Medidas obtidas em ensaio de tração à flexão da amostra "2X".

Amostra	L	C	A	Flexão (kgf)
2.1	16,68	71,34	26,18	70,47
2.2	16,53	71,39	25,83	67,63
2.3	16,44	70,93	25,84	59,67
2.4	16,43	70,99	25,91	74,46
2.5	16,38	71,67	26,18	78,30
Média				70,11

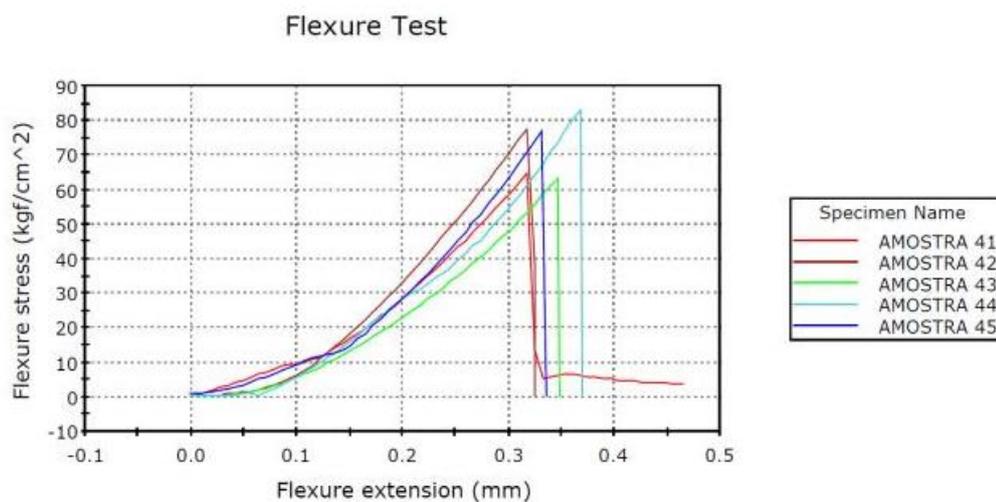


	Specimen label	Maximum Load (kgf)	Stress at Maximum Load (kgf/cm ²)	Modulus (Automatic) (MPa)	Extension at Maximum load (mm)
1	AMOSTRA 31	60,07	60,64	728,15	0,28
2	AMOSTRA 32	57,67	58,07	714,45	0,37
3	AMOSTRA 33	62,23	64,03	655,89	0,35
4	AMOSTRA 34	65,47	70,28	891,12	0,32
5	AMOSTRA 35	65,83	68,94	855,87	0,36
	Mean	62,25	64,39	769,10	0,34
	Standard Deviation	3,49740	5,23247	99,87356	0,03710
	Coefficient of Variation	5,61796	8,12567	12,98585	10,93672
	Minimum	57,67	58,07	655,89	0,28
	Maximum	65,83	70,28	891,12	0,37

Figura A1.4 - Ensaio de ruptura com flexão da amostra "3X".

Tabela A1.4 - Medidas obtidas em ensaio de tração à flexão da amostra "3X".

Amostra	L	C	A	Flexão (kgf)
3.1	16,91	71,75	25,98	60,07
3.2	16,74	70,97	26,58	57,67
3.3	16,65	71,80	26,29	62,23
3.4	16,44	71,32	25,85	65,47
3.5	16,60	71,70	25,99	65,83
Média				62,25

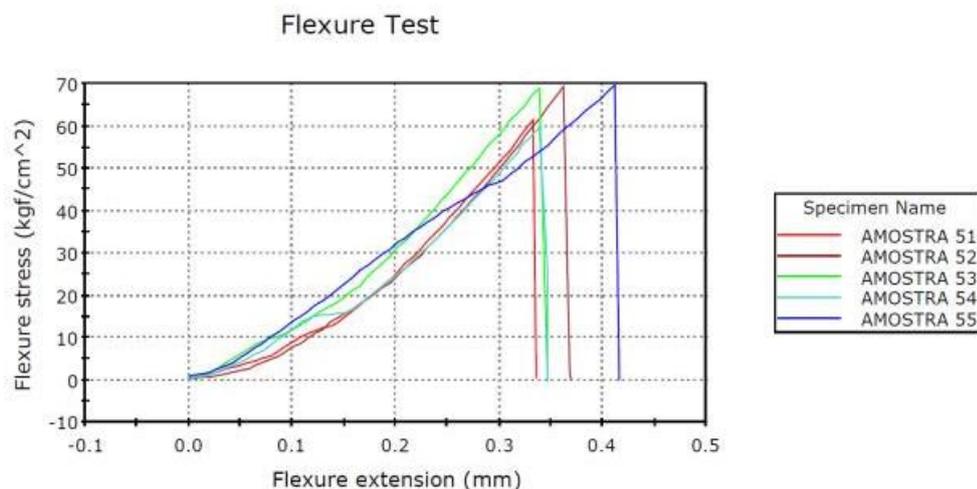


	Specimen label	Maximum Load (kgf)	Stress at Maximum Load (kgf/cm ²)	Modulus (Automatic) (MPa)	Extension at Maximum load (mm)
1	AMOSTRA 41	61,20	64,60	823,13	0,32
2	AMOSTRA 42	76,45	77,37	985,47	0,32
3	AMOSTRA 43	60,13	63,05	803,09	0,35
4	AMOSTRA 44	78,05	82,93	1058,22	0,37
5	AMOSTRA 45	70,09	77,01	1054,93	0,33
Mean		69,18	72,99	944,97	0,34
Standard Deviation		8,33660	8,70749	124,02890	0,02159
Coefficient of Variation		12,04978	11,92982	13,12519	6,41916
Minimum		60,13	63,05	803,09	0,32
Maximum		78,05	82,93	1058,22	0,37

Figura A1.5 - Ensaio de ruptura com flexão da amostra "4X".

Tabela A1.5 - Medidas obtidas em ensaio de tração à flexão da amostra "4X".

Amostra	L	C	A	Flexão (kgf)
4.1	16,65	70,51	25,63	61,20
4.2	16,89	70,74	25,98	76,45
4.3	16,68	71,43	25,71	60,13
4.4	16,49	70,92	25,96	78,05
4.5	16,32	71,47	25,63	70,09
Média				69,18

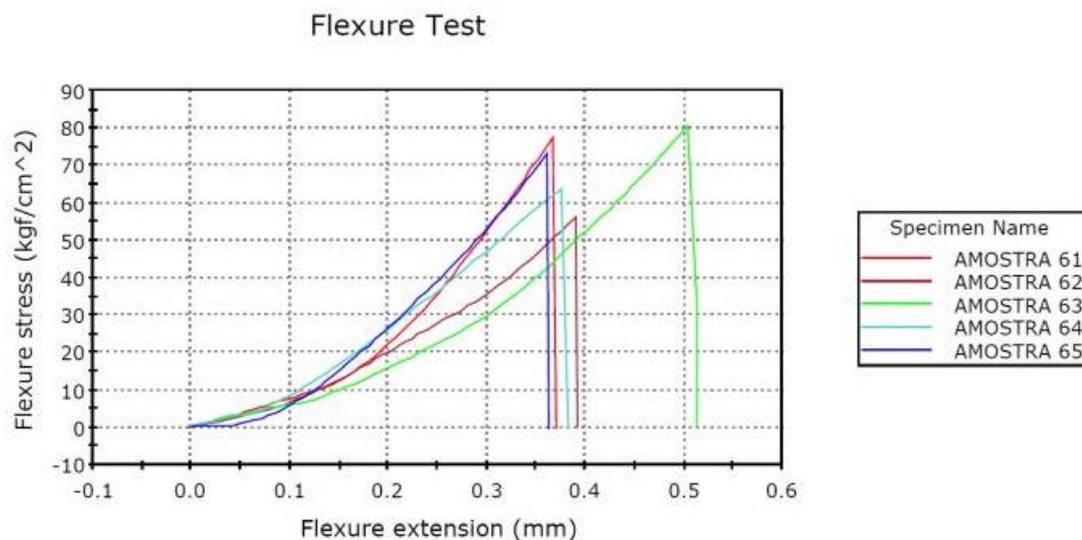


	Specimen label	Maximum Load (kgf)	Stress at Maximum Load (kgf/cm ²)	Modulus (Automatic) (MPa)	Extension at Maximum load (mm)
1	AMOSTRA 51	59,12	61,16	721,93	0,33
2	AMOSTRA 52	66,97	69,16	783,84	0,36
3	AMOSTRA 53	67,34	68,98	689,94	0,34
4	AMOSTRA 54	55,78	59,42	681,15	0,34
5	AMOSTRA 55	65,92	69,52	528,79	0,41
Mean		63,03	65,65	681,13	0,36
Standard Deviation		5,25302	4,93475	94,20456	0,03296
Coefficient of Variation		8,33464	7,51695	13,83064	9,23707
Minimum		55,78	59,42	528,79	0,33
Maximum		67,34	69,52	783,84	0,41

Figura A1.6 - Ensaio de ruptura com flexão da amostra "5X".

Tabela A1.6 - Medidas obtidas em ensaio de tração à flexão da amostra "5X".

Amostra	L	C	A	Flexão (kgf)
5.1	16,76	71,67	25,81	59,12
5.2	16,52	72,25	26,61	66,97
5.3	16,81	71,23	25,91	67,34
5.4	16,50	71,45	25,86	55,78
5.5	16,60	71,15	25,81	65,92
Média				63,03



	Specimen label	Maximum Load (kgf)	Stress at Maximum Load (kgf/cm ²)	Modulus (Automatic) (MPa)	Extension at Maximum load (mm)
1	AMOSTRA 61	73,53	77,25	922,83	0,37
2	AMOSTRA 62	54,88	55,84	574,49	0,39
3	AMOSTRA 63	78,14	80,60	681,75	0,51
4	AMOSTRA 64	62,41	63,48	535,82	0,38
5	AMOSTRA 65	72,09	73,00	802,33	0,36
	Mean	68,21	70,03	703,44	0,40
	Standard Deviation	9,40082	10,21004	160,55069	0,05987
	Coefficient of Variation	13,78209	14,57855	22,82361	14,97321
	Minimum	54,88	55,84	535,82	0,36
	Maximum	78,14	80,60	922,83	0,51

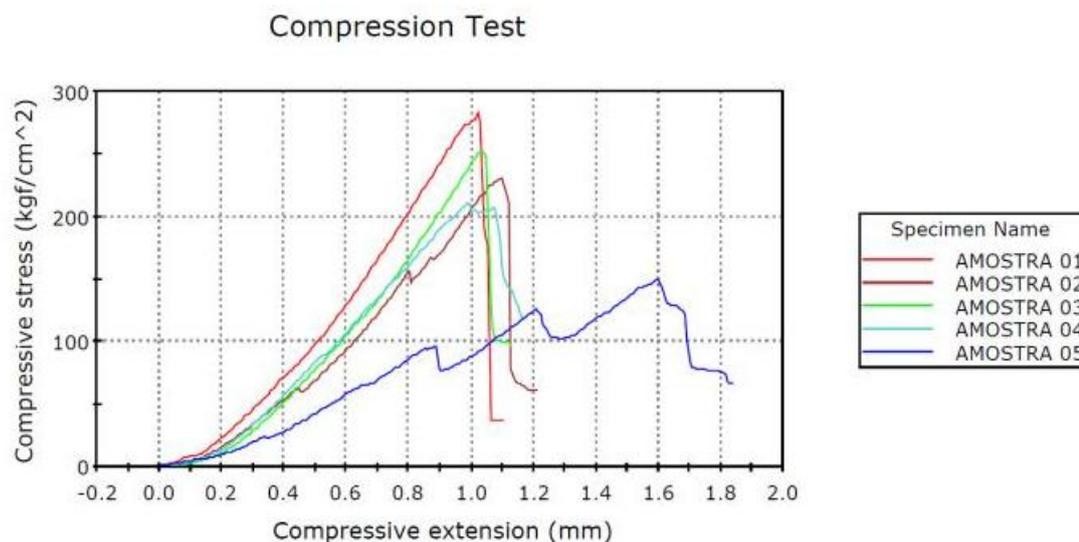
Figura A1.7 - Ensaio de ruptura com flexão da amostra "6X".

Tabela A1.7 - Medidas obtidas em ensaio de tração à flexão da amostra "6X".

Amostra	L	C	A	Flexão (kgf)
6.1	16,58	71,32	25,97	73,53
6.2	16,83	71,97	26,02	54,88
6.3	16,71	71,26	26,04	78,14
6.4	16,77	71,69	26,22	62,41
6.5	16,82	71,45	26,18	72,09
Média				68,21

APÊNDICE 2

DADOS DOS ENSAIOS DE RUPTURA POR COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA



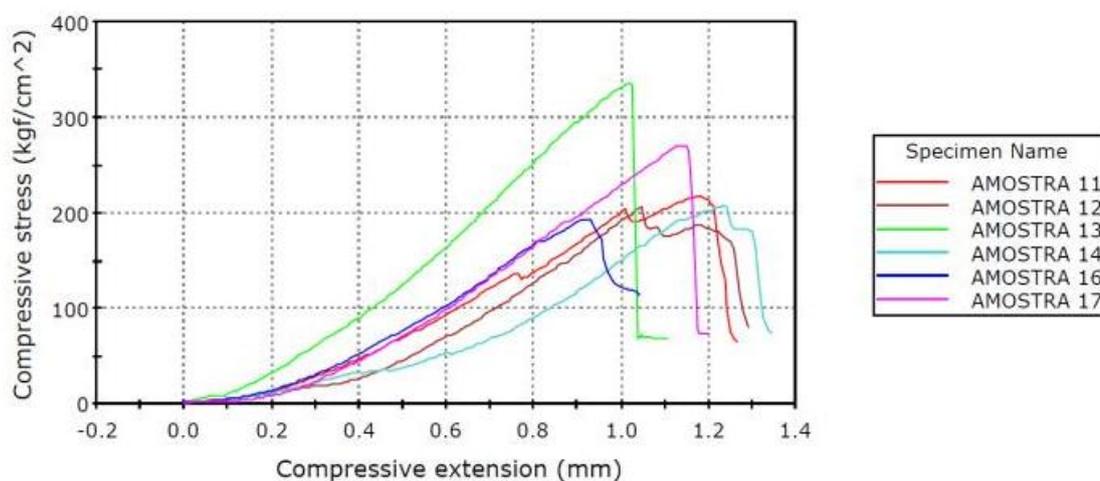
	Specimen label	Maximum load (kgf)	Stress at Maximum load (kgf/cm ²)
1	AMOSTRA 01	1278,20	282,70
2	AMOSTRA 02	1006,62	230,82
3	AMOSTRA 03	1089,21	251,86
4	AMOSTRA 04	917,20	210,45
5	AMOSTRA 05	652,15	149,75
Mean		988,67	225,12
Standard Deviation		230,54839	49,89528
Coefficient of Variation		23,31893	22,16434
Minimum		652,15	149,75
Maximum		1278,20	282,70

Figura A2.1 - Ensaio de compressão dos corpos-de-prova da amostra "0X".

Tabela A2.1 - Medidas obtidas em ensaio de compressão da amostra "0X".

Amostra	L	C	A	Compressão (kgf)
0.1	26,03	30,02	17,37	1278,20
0.2	26,13	30,97	16,69	1006,62
0.3	26,37	30,29	16,40	1089,21
0.4	26,02	30,78	16,75	917,20
0.5	25,86	30,70	16,84	652,15
Média				988,68

Compression Test



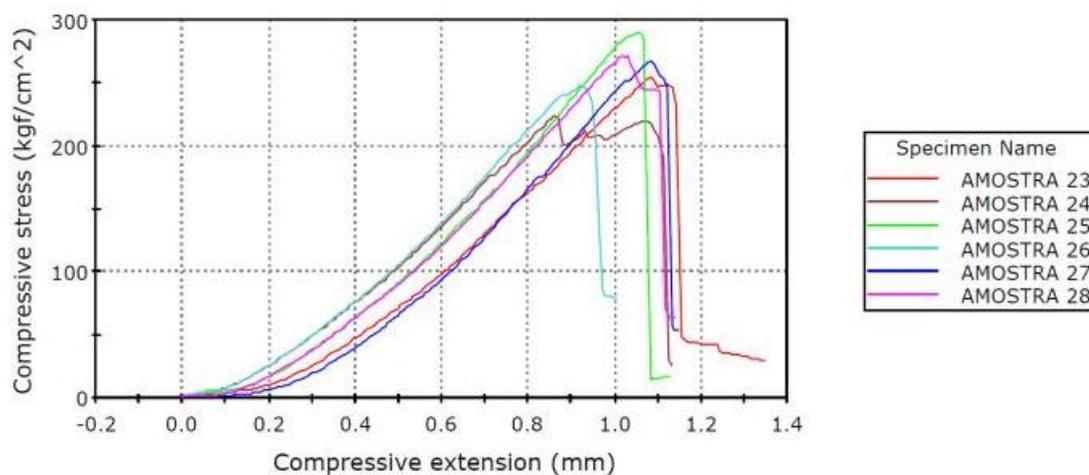
	Specimen label	Maximum load (kgf)	Stress at Maximum load (kgf/cm ²)
1	AMOSTRA 11	956,11	216,33
2	AMOSTRA 12	907,68	204,89
3	AMOSTRA 13	1448,38	335,57
4	AMOSTRA 14	916,44	206,95
5	AMOSTRA 16	846,54	193,14
6	AMOSTRA 17	1210,05	270,39
Mean		1047,53	237,88
Standard Deviation		233,49243	54,97663
Coefficient of Variation		22,28974	23,11142
Minimum		846,54	193,14
Maximum		1448,38	335,57

Figura A2.2 - Ensaio de compressão dos corpos-de-prova da amostra "1X".

Tabela A2.2 - Medidas obtidas em ensaio de compressão da amostra "1X".

Amostra	L	C	A	Compressão (kgf)
1.1	26,23	31,36	16,85	956,11
1.2	26,37	30,59	16,80	907,68
1.3	26,27	31,18	16,43	1448,38
1.4	26,25	31,03	16,87	916,44
1.5	26,59	31,46	16,29	846,54
1.6	26,58	31,08	16,49	1210,05
Média				1047,53

Compression Test



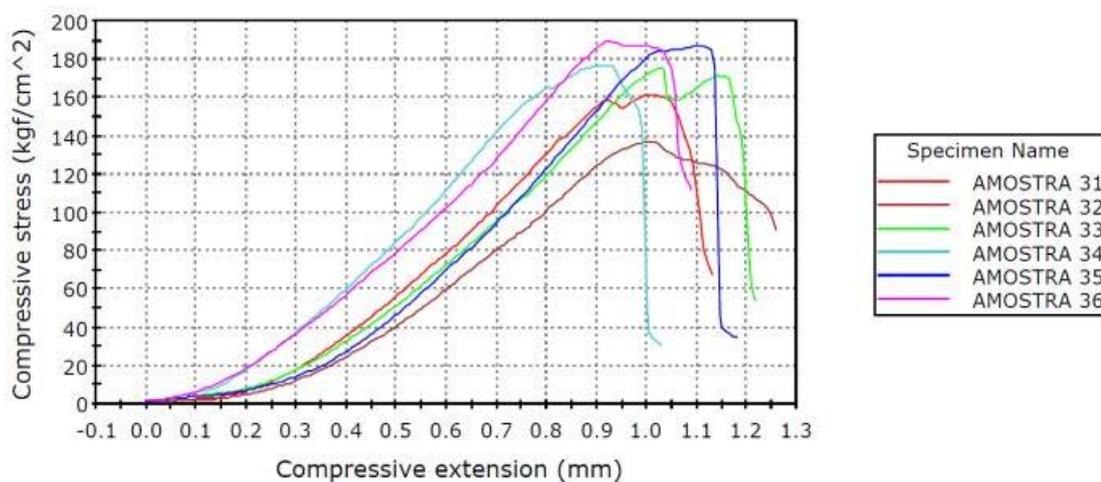
	Specimen label	Maximum load (kgf)	Stress at Maximum load (kgf/cm ²)
1	AMOSTRA 23	1146,34	254,57
2	AMOSTRA 24	963,92	223,04
3	AMOSTRA 25	1240,68	290,14
4	AMOSTRA 26	1078,05	247,20
5	AMOSTRA 27	1122,01	267,66
6	AMOSTRA 28	1201,47	271,43
	Mean	1125,41	259,01
	Standard Deviation	97,82070	23,02997
	Coefficient of Variation	8,69201	8,89166
	Minimum	963,92	223,04
	Maximum	1240,68	290,14

Figura A2.3 - Ensaio de compressão dos corpos-de-prova da amostra "2X".

Tabela A2.3 - Medidas obtidas em ensaio de compressão da amostra "2X".

Amostra	L	C	A	Compressão (kgf)
2.3	26,52	30,90	16,98	1146,34
2.4	25,91	31,04	16,68	963,92
2.5	25,90	30,49	16,51	1240,68
2.6	26,24	30,77	16,62	1078,05
2.7	25,39	30,96	16,51	1122,01
2.8	25,87	30,44	17,11	1201,47
Média				1125,41

Compression Test

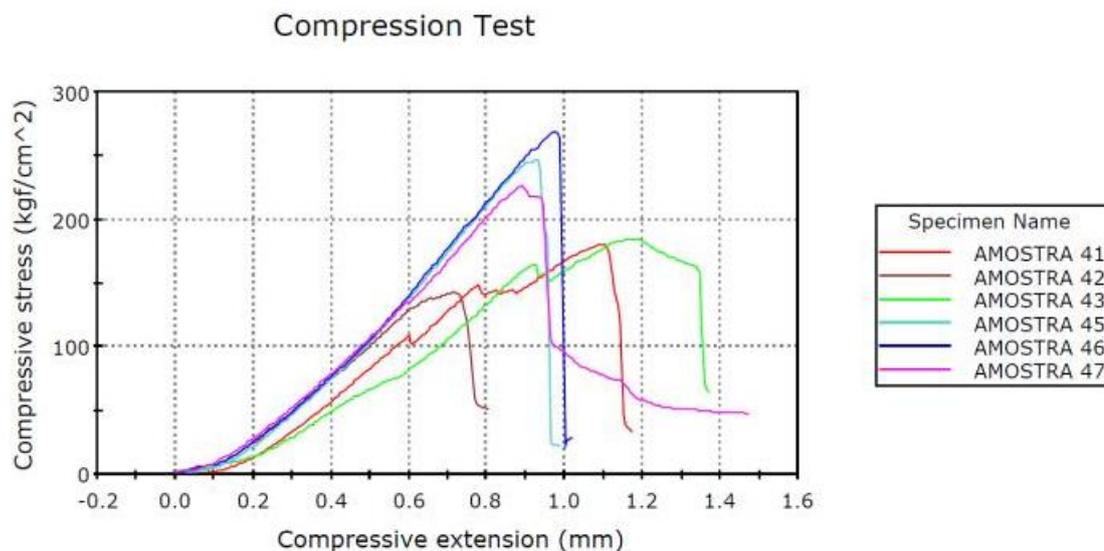


	Specimen label	Maximum load (kgf)	Stress at Maximum load (kgf/cm ²)
1	AMOSTRA 31	728,75	161,62
2	AMOSTRA 32	594,55	136,85
3	AMOSTRA 33	760,75	175,06
4	AMOSTRA 34	776,77	176,88
5	AMOSTRA 35	826,29	186,92
6	AMOSTRA 36	836,66	189,91
Mean		753,96	171,21
Standard Deviation		87,95911	19,57716
Coefficient of Variation		11,66621	11,43487
Minimum		594,55	136,85
Maximum		836,66	189,91

Figura A2.4 - Ensaio de compressão dos corpos-de-prova da amostra "3X".

Tabela A2.4 - Medidas obtidas em ensaio de compressão da amostra "3X".

Amostra	L	C	A	Compressão (kgf)
3.1	26,76	31,25	16,85	728,75
3.2	26,22	30,27	16,57	594,55
3.3	25,96	30,83	16,74	760,75
3.4	25,94	30,45	16,93	776,77
3.5	26,55	31,47	16,65	826,29
3.6	26,27	31,32	16,77	836,66
Média				753,96

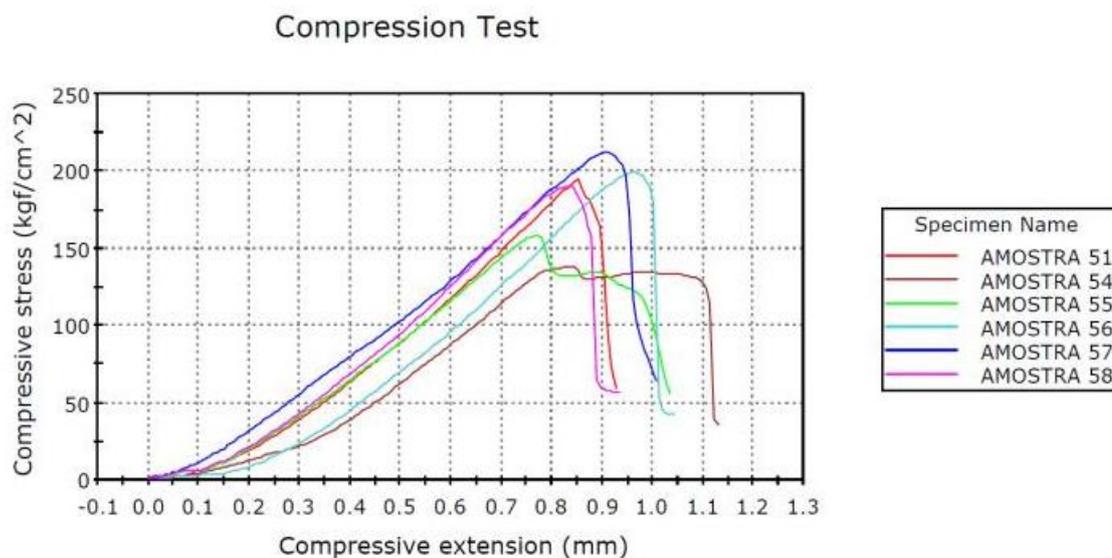


	Specimen label	Maximum load (kgf)	Stress at Maximum load (kgf/cm ²)
1	AMOSTRA 41	773,04	180,00
2	AMOSTRA 42	607,35	142,47
3	AMOSTRA 43	810,71	184,35
4	AMOSTRA 45	1113,28	246,67
5	AMOSTRA 46	1201,04	268,73
6	AMOSTRA 47	946,20	226,06
Mean		908,61	208,05
Standard Deviation		222,50366	47,21634
Coefficient of Variation		24,48845	22,69494
Minimum		607,35	142,47
Maximum		1201,04	268,73

Figura A2.5 - Ensaio de compressão dos corpos-de-prova da amostra "4X".

Tabela A2.5 - Medidas obtidas em ensaio de compressão da amostra "4X".

Amostra	L	C	A	Compressão (kgf)
4.1	26,14	30,64	16,43	773,04
4.2	25,93	31,12	16,44	607,35
4.3	26,27	30,38	16,74	810,71
4.4	26,05	30,49	16,78	1113,28
4.5	27,09	30,97	16,66	1201,04
4.6	26,54	30,93	16,84	946,20
Média				908,60



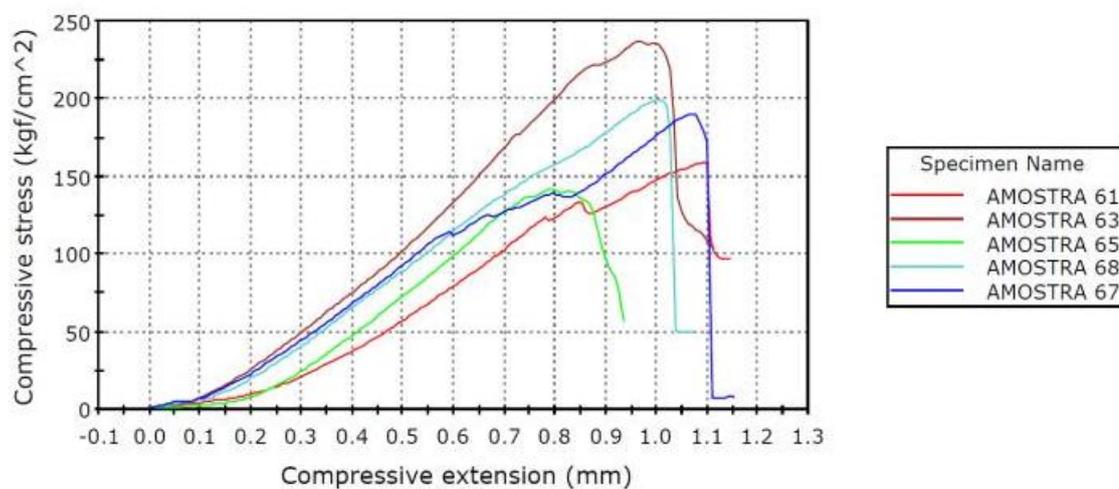
	Specimen label	Maximum load (kgf)	Stress at Maximum load (kgf/cm ²)
1	AMOSTRA 51	852,28	194,38
2	AMOSTRA 54	591,03	138,09
3	AMOSTRA 55	699,69	157,75
4	AMOSTRA 56	865,22	198,96
5	AMOSTRA 57	923,64	212,43
6	AMOSTRA 58	844,92	190,44
Mean		796,13	182,01
Standard Deviation		124,84379	28,12136
Coefficient of Variation		15,68135	15,45062
Minimum		591,03	138,09
Maximum		923,64	212,43

Figura A2.6 - Ensaio de compressão dos corpos-de-prova da amostra "5X".

Tabela A2.6 - Medidas obtidas em ensaio de compressão da amostra "5X".

Amostra	L	C	A	Compressão (kgf)
5.1	25,96	30,35	16,89	852,28
5.4	26,05	30,49	16,43	591,03
5.5	26,37	30,78	16,82	699,69
5.6	25,87	29,81	16,81	865,22
5.7	26,24	30,12	16,57	923,64
5.8	26,44	30,54	16,78	844,92
Média				796,13

Compression Test



	Specimen label	Maximum load (kgf)	Stress at Maximum load (kgf/cm ²)
1	AMOSTRA 61	690,96	159,04
2	AMOSTRA 63	1058,36	237,62
3	AMOSTRA 65	616,17	141,58
4	AMOSTRA 68	871,33	199,02
5	AMOSTRA 67	845,23	190,34
Mean		816,41	185,52
Standard Deviation		171,91753	37,25388
Coefficient of Variation		21,05775	20,08083
Minimum		616,17	141,58
Maximum		1058,36	237,62

Figura A2.7 - Ensaio de compressão dos corpos-de-prova da amostra "6X".

Tabela A2.7 - Medidas obtidas em ensaio de compressão da amostra "6X".

Amostra	L	C	A	Compressão (kgf)
6.1	26,22	31,19	16,57	690,96
6.3	26,34	30,73	16,91	1058,36
6.5	26,06	31,02	16,70	616,17
6.7	26,26	30,33	16,91	845,23
6.8	26,06	30,85	16,80	871,33
Média				816,41