



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado

"Aproveitamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água em Cerâmica Vermelha"



Autor: Luiz Carlos Cardoso Paixão
Orientador: Profa. Dra. Denise Croce Romano
Espinosa

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório



Fevereiro de 2005



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Luiz Carlos Cardoso Paixão

"Aproveitamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água em Cerâmica Vermelha"

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais da REDEMAT, como parte integrante
dos requisitos para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: "Caracterização e Seleção de Materiais"

Orientador: Profa. Dra. Denise Croce Romano Espinosa

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório

Ouro Preto, Fevereiro de 2005

Não se poderá dizer “está aqui” ou “está ali”, porque, na verdade, o reino de Deus está dentro de vós. (S. Lucas, 17, 21).

Agradecimentos

À minha orientadora Profa. Dra Denise Croce Romano Espinosa pela amizade paciência e incentivo durante a elaboração deste trabalho. Agradeço ao meu co-orientador, Prof. Dr Jorge Alberto Soares Tenório incentivo e pela sua capacidade de ajudar o próximo, que Deus lhe pague.

Aos amigos do Laboratório de Tecnologia Cerâmica do IPT – São Paulo, Dr Humberto, José Carlos, Camargo, Tina sem os quais este trabalho não teria sido realizado. Agradeço também ao Felipe, estagiário que trabalhou muito na realização dos ensaios que constam neste trabalho.

Ao laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo na pessoa da Clarice pelas análises de MEV realizadas nas amostras de lodo.

Ao departamento de química da UFOP na pessoa do Prof Dr Geraldo Magela pela análises de DRX realizadas nas amostras de Lodo.

Ao setor de Química do CETEC pelas análises de FRX realizadas nas amostras de lodo.

Aos amigos da REDMAT Andréia Vidal, Beatriz, Prof Dr Fernando Gabriel, Prof Dr Antônio Valadão, Prof Dr Robson Afonso, Prof Dr André Cota e a Ana Maria secretária da REDMAT, pessoas nas quais só encontrei palavras de incentivo, apoio e muito carinho.

À minha esposa Lucinha e meus filhos Pedro e João, meus grandes parceiros, pelo amor, compreensão e apoio durante a elaboração deste trabalho.

Sumário

<i>Lista de Tabelas</i>	4
<i>Lista de Figuras</i>	9
<i>Resumo</i>	13
<i>Abstract</i>	15
1. Introdução Teórica	16
1.1. Aproveitamento do lodo de ETA em cerâmica vermelha	16
1.2. Características da argila	17
1.2.1. Plasticidade	18
1.2.2. Limite de ATHERBERG	19
1.2.3. Resistência da argila seca	20
1.2.4. Perda de água sob ação da temperatura	20
1.2.5. Retração por secagem	21
1.2.6. Porosidade	22
1.2.7. Sinterização	23
1.3. Preparação de argilas para ensaios de laboratório	23
1.3.1. Forma e dimensão dos corpos de prova	25
1.4. Características das argilas para cerâmicas vermelhas	26
1.5. Estudos de reaproveitamento de resíduos utilizando cerâmica vermelha como matriz	26
1.6. Tratamento de água	30
1.6.1. Coagulação/Floculação	30
1.6.2. Geração de lodo nas ETA	32
1.6.3. Características de lodos das ETA	33
1.6.4. Remoção de água	36
1.7. Disposição final de lodo de ETA	37

2. Objetivos	39
3. Materiais e Métodos	40
3.1. Lodo da ETA do Sistema COPASA/RIO MANSO	41
3.1.1. Geração de lodo na ETA	42
3.1.2. Caracterização do lodo de ETA	43
3.2. Caracterização da argila	43
3.2.1. Caracterização Química	44
3.2.2. Difração de raios – X	45
3.3. Confeção dos corpos de prova	45
3.3.1. Preparação das misturas de lodo de ETA e argila	45
3.3.2. Preparação dos corpos de prova	46
3.4. Ensaios para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova	48
3.4.1. Após secagem	49
3.4.2. Após a queima	50
4. Resultados e Discussão	55
4.1. Caracterização do Lodo da ETA	55
4.1.1. Análise granulométrica	55
4.1.2. Análise Química por Fluorescência de Raios-X – FRX	57
4.1.3. Análises por difração de raios-X	58
4.1.4. Microscopia Eletrônica de Varredura	61
4.2. Ensaios para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova	66
4.2.1. Ensaios após secagem	67
4.2.2. Ensaios após queima	69
4.2.3. Microscopia Ótica	82
4.2.4. Tabelas com os resumos dos ensaios realizados	86
5. Conclusões	90

<i>Anexo A</i>	<u>91</u>
<i>Anexo B</i>	<u>95</u>
<i>Anexo C</i>	<u>99</u>
<i>Anexo D</i>	<u>103</u>
<i>Anexo E</i>	<u>107</u>
<i>Anexo F</i>	<u>112</u>
<i>Referências Bibliográficas</i>	<u>118</u>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1-1 - Composição média da massa cerâmica preparada para a produção de tijolos e telhas. Fonte: (CEMIG 1993)^[22]</i>	21
<i>Tabela 1-2 - Características de um lodo de ETA e de uma argila usada para fabricação de produtos de cerâmica vermelha^[4]</i>	27
<i>Tabela 1-3 - Concentração de metais presentes na fase sólida de um lodo de ETA do estado de São Paulo. De acordo com a tabela observa-se que de fato as concentrações de alumínio variam de acordo com o tipo de floculante utilizado(sais de alumínio ou sais de ferro). O mesmo ocorrendo com as concentrações de ferro presentes na fase sólida dos lodos da ETA^[42].</i>	35
<i>Tabela 1-4 - Algumas características físicas e químicas de lodo de ETA onde foi utilizado cloreto férrico como coagulante^[41].</i>	36
<i>Tabela 3-1 - Lixiviação do lodo da ETA do Sistema COPASA/Rio Manso^[46]</i>	42
<i>Tabela 3-2 - Solubilização do lodo de ETA do sistema COPASA/Rio Manso^[46]</i>	43
<i>Tabela 3-3 - Resultado da análise química.</i>	44
<i>Tabela 4-1 - Concentrações de lodo nas misturas com argila.</i>	55
<i>Tabela 4-2 - Resultado da análise granulométrica do lodo de ETA.</i>	56
<i>Tabela 4-3 - Análise química por fluorescência de raios-X da amostra de lodo da ETA - Bruto-moído</i>	57
<i>Tabela 4-4 - Análise química por fluorescência de raios-X da amostra de lodo da ETA lodo calcinado</i>	57
<i>Tabela 4-5 - Fases identificadas no espectro de DRX do lodo de ETA bruto</i>	58
<i>Tabela 4-6 - Fases identificadas no espectro de DRX do lodo de ETA calcinado.</i>	59

<i>Tabela 4-7 - Tensão de ruptura à flexão (TRF) em função da concentração de lodo na massa de argila</i>	67
<i>Tabela 4-8 - Contração linear após a secagem em função da concentração de lodo na massa de argila</i>	69
<i>Tabela 4-9 - Resumo dos resultados realizados com argila sem mistura.</i>	87
<i>Tabela 4-10 - Resumo dos resultados realizados com 98% de argila e 2% de lodo da ETA.</i>	87
<i>Tabela 4-11 - Resumo dos resultados realizados com 95% de argila e 5% de lodo da ETA moído # 20.</i>	88
<i>Tabela 4-12 - Resumo dos resultados realizados com 95% de argila e 5% de lodo da ETA calcinado.</i>	88
<i>Tabela 4-13 - Resumo dos resultados realizados com 95% de argila e 5% de lodo da ETA bruto.</i>	89
<i>Tabela 4-14 - Resumo dos resultados realizados com 90% de argila e 10% de lodo da ETA bruto.</i>	89
<i>Tabela 5-1 - Ensaio de secagem a 110°C/24horas Cor: marrom</i>	91
<i>Tabela 5-2 - Dados da queima a 950°C durante 3 horas</i>	92
<i>Tabela 5-3 – Continuação dos dados da queima a 950°C durante 3 horas Cor: Vermelho</i>	92
<i>Tabela 5-4 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas</i>	93
<i>Tabela 5-5 – Continuação dos dados da queima a 1000°C durante 3 horas Cor: Vermelho</i>	93
<i>Tabela 5-6 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas</i>	94
<i>Tabela 5-7 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas Cor: vermelho escuro</i>	94
<i>Tabela 5-8 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom</i>	95

<i>Tabela 5-9 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C</i>	96
<i>Tabela 5-10 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor:Marrom</i>	96
<i>Tabela 5-11 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C</i>	97
<i>Tabela 5-12 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C. Cor: vermelho</i>	97
<i>Tabela 5-13 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C</i>	98
<i>Tabela 5-14 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor:vermelho escuro</i>	98
<i>Tabela 5-15 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom</i>	99
<i>Tabela 5-16 - Dados da queima a 950°C durante 3 horas</i>	100
<i>Tabela 5-17 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor:vermelho</i>	100
<i>Tabela 5-18 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas</i>	101
<i>Tabela 5-19 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C. Cor:vermelho</i>	101
<i>Tabela 5-20 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas</i>	102
<i>Tabela 5-21 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor:vermelho escuro</i>	102
<i>Tabela 5-22 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom</i>	103

<i>Tabela 5-23 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor: vermelho</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 5-24 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor: vermelho</i>	<i>104</i>
<i>Tabela 5-25 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 5-26 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C. Cor: vermelho</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 5-27 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 5-28 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor:vermelho escuro</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 5-29 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 5-30 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor:vermelho</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 5-31 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 5-32 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 5-33 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C Cor:vermelho</i>	<i>109</i>
<i>Tabela 5-34 - Dados da terceira queima a 1050°C durante 3 horas</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 5-35 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor: vermelho escuro</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 5-36 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom</i>	<i>112</i>

<i>Tabela 5-37 – Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C</i>	<i>113</i>
<i>Tabela 5-38 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor: vermelho</i>	<i>113</i>
<i>Tabela 5-39 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas</i>	<i>114</i>
<i>Tabela 5-40 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C Cor: vermelho</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 5-41 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 5-42 - Ensaio realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor: vermelho escuro</i>	<i>117</i>

Lista de Figuras

<i>Figura 1-1 - Distribuição de água no floco do lodo^[43].</i>	37
<i>Figura 3-1 - Molde metálico com a mistura de lodo de ETA e argila.</i>	47
<i>Figura 3-2 - Corpos de prova já confeccionados.</i>	48
<i>Figura 3-3 - Dispositivo para realização do ensaio para determinação da TRF.</i>	49
<i>Figura 4-1 - Porcentagem de lodo passante nas peneiras, de acordo com as aberturas</i>	56
<i>Figura 4-2 - Espectro de DRX de lodo bruto.</i>	59
<i>Figura 4-3 - Espectro de DRX de lodo calcinado.</i>	60
<i>Figura 4-4 – Imagem de elétrons secundários. Aspecto geral da morfologia das partículas do lodo de ETA após a secagem. Verifica-se que o material é essencialmente constituído de partículas facetadas, com faces aproximadamente planas. As partículas apresentam estreita faixa de tamanhos de partícula.</i>	61
<i>Figura 4-5 – Imagem de elétrons secundários. Aspecto de uma partícula típica do lodo de ETA após a secagem.</i>	62
<i>Figura 4-6 – (a) Imagem de elétrons secundários. Detalhe da partícula da Figura 4-5, ou seja, uma partícula menor em cima de um fundo heterogêneo escuro. (b) Espectro de EDS do material aderido à superfície da partícula. (c) Espectro de EDS da base da partícula. Os dois espectros de EDS são bastante semelhantes, tendo sido identificados os seguintes elementos: O, Al, Ca, Si e Fe.</i>	62
<i>Figura 4-7 – (a) Imagem de elétrons secundários. Detalhe da partícula da Figura 4-5, ou seja, uma partícula menor em cima de um fundo heterogêneo escuro. (b) Espectro de EDS de uma partícula aderida. (c) Espectro de EDS de uma partícula aderida. (d) Espectro de EDS da base da partícula.</i>	63

<i>Figura 4-8 – Imagem de elétrons secundários. Aspecto geral da morfologia das partículas do lodo de ETA calcinado. Verifica-se que o material é essencialmente constituído de partículas facetadas, com faces aproximadamente planas. A distribuição do tamanho de partícula não é tão homogênea como na figura 1, notam-se partículas de tamanhos bastante distintos.</i>	64
<i>Figura 4-9 – Imagem de elétrons secundários. Partícula típica do lodo calcinado. Observa-se a presença de material sobre a superfície da partícula.</i>	65
<i>Figura 4-10 – (a) Imagem de elétrons secundários. Detalhe da partícula mostrada na Figura 4-9(b) Espectro de EDS. (c) Espectro de EDS. (d) Espectro de EDS. (e) Espectro de EDS.</i>	66
<i>Figura 4-11 - Variação da TRF em função da adição de lodo na mistura de argila. A figura mostra que o aumento da concentração de lodo diminui os valores da TRF dos corpos de prova.</i>	67
<i>Figura 4-12 - CLS em função da adição de lodo na mistura de argila. A figura mostra que a adição de lodo de ETA á argila diminui os valores da CLS dos corpos de prova.</i>	68
<i>Figura 4-13 - Variação da CLQ em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.</i>	70
<i>Figura 4-14 - Variação da CLQ em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.</i>	71
<i>Figura 4-15 - Variação da CLT em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.</i>	72
<i>Figura 4-16 – Variação da CLT em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.</i>	73
<i>Figura 4-17 - Variação da TRF em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.</i>	74
<i>Figura 4-18 - Variação da TRF em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.</i>	75

<i>Figura 4-19 - Variação da absorção de água (AA) em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.</i>	76
<i>Figura 4-20 - Variação da AA em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.</i>	77
<i>Figura 4-21 - Variação da porosidade aparente (PA) em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.</i>	78
<i>Figura 4-22 - Variação da PA em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.</i>	78
<i>Figura 4-23 - Variação da massa específica aparente (MEA) em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.</i>	79
<i>Figura 4-24 - Variação da MEA em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.</i>	80
<i>Figura 4-25 - Variação da perda ao fogo (PF) em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.</i>	81
<i>Figura 4-26 - Variação da perda ao fogo (PF) em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.</i>	82
<i>Figura 4-27 – Imagem de microscopia ótica da superfície de uma corpo de prova feito com a mistura C₂ (argila com adição de 2% de lodo) queimado a 950°C. Aumento: 40x. As setas identificadas com a letra b mostram partículas de Fe₂O₃ e as setas identificadas com a letra a mostram partículas de silício. É importante observar que existe uma folga entre a pedra e a estrutura da argila.</i>	83
<i>Figura 4-28 - Imagem de microscopia ótica da região da fratura de amostra proveniente do ensaio para determinação de TRF. O corpo de prova preparado com a mistura C_{5C} (argila com adição de 5% de lodo calcinado) queimado a 950°C. Aumento: 40x. As setas mostram os buracos que ficaram na matriz quando o Fe₂O₃ foi arrancado durante o ensaio de tensão de ruptura à flexão (TRF) ficando o buraco.</i>	84

*Figura 4-29 - Imagem de microscopia ótica da região da fratura de amostra proveniente do ensaio para determinação de TRF. O corpo de prova preparado com a mistura C_{5C} (argila com adição de 5% de lodo calcinado) queimado a 1000°C. Aumento: 40x. As setas evidenciam partículas de o silício, que é um componente da argila.*_____85

Resumo

As estações de tratamento de água (ETA) vêm buscando soluções de reciclagem para os resíduos gerados no processo de tratamento de água – esses resíduos são denominados de lodo ETA. Atualmente, as soluções são a disposição em aterros sanitários ou simplesmente lançá-los na rede de esgoto. Um setor que apresenta um enorme potencial para contribuir na solução de problemas ambientais originários nos mais diversos processos industriais é o da cerâmica vermelha. De fato, trabalhos reportados na literatura têm mostrado que é possível a reciclagem de resíduos industriais como constituintes de massas cerâmicas para a fabricação de produtos cerâmicos para a construção civil. A reutilização do lodo das ETA pode ser realizada com a incorporação de lodo em matriz de cerâmica vermelha. Através desta mistura, confeccionam-se corpos de prova para realização de diversos ensaios, com o objetivo de estabelecer misturas que possibilitem a reutilização deste lodo na matriz de blocos cerâmicos para a indústria da construção civil. É possível medir após secagem e queima, as seguintes características: cor após queima, retração linear ou volumétrica, módulo de tensão ou ruptura à flexão, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, perda ao fogo. A COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais – com sede em Belo Horizonte – MG, possui uma estação de tratamento de água localizada no município de Brumadinho-MG a captação de água deste sistema é no lago originário da bacia do Rio Manso. A produção média de água tratada é de $3,80\text{m}^3/\text{s}$. A estação de tratamento de água é do tipo convencional e produz 50m^3 de lodo por dia. Para atingir os objetivos do presente estudo utilizaram-se misturas de argila com diferentes teores de lodo da ETA: 0%, 2%, 5% e 10%; além disso, foram feitas misturas de argila com 5% de lodo calcinado e 5% de lodo moído. Os corpos de prova foram conformados por prensagem e submetidos às seguintes temperaturas de queima: 950°C , 1000°C e 1050°C . As amostras de lodo foram caracterizadas por difração de raios X, fluorescência de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e os corpos de prova foram observados por microscopia ótica. Nas condições experimentais deste trabalho concluiu-se que o lodo adicionado na matriz da massa de argila contribuiu para a redução de suas propriedades plásticas, que as propriedades Físico-Mecânicas dos corpos de prova confeccionados com a mistura de lodo e argila são influenciadas pelas temperaturas de queima e que os valores de retração linear de secagem, da contração linear total e da contração linear após a queima, da tensão de ruptura à flexão (TRF), da perda ao fogo, estão

dentro dos valores especificados para a fabricação de produtos de cerâmicas vermelhas para o uso na construção civil.

Palavras-chave: Lodo de ETA, reciclagem, cerâmica vermelha, tijolo cerâmico.

Abstract

The water treatment stations (WTA) have been researching solutions for the recycling of the residue generated in the water treatment process – this residue is called WTA mud. Presently, the adopted solutions are the releasing of the residue into sanitary landfills or into the sewer system. The red ceramics presents an enormous potential to contribute for the solution of the environmental problems originated in several industrial processes. In fact, studies report the true possibility of transforming industrial residue into constituents of ceramic mass for the manufacturing of ceramic products aiming the civil construction through recycling. The reusing of the residue of the WTAs through the incorporation of the mud to a matrix of red ceramics. With this mixture, probe material for the realization of several assays can be made, aiming the development of mixtures that allow the reutilization of the mud in the matrix of ceramic blocks with application in the civil construction industry. After the burning and the drying, it's possible to assess the following characteristics: color after burning, linear or volumetric retraction, module of tension or rupture at flexion, water absorption, apparent porosity, apparent specific mass, loss after exposure to fire. COPASA – Minas Gerais State Sanitation Company – seated in Belo Horizonte (MG) has a WTA in the municipality of Brumadinho (MG) and this system's water captation is made in a lake originary from the Manso River basin. The average production of treated water is of 3,80m³/s. The WTA is a conventional one and produces 50m³ of mud per day. To reach the objectives of the present study, there were made mixtures of clay with different concentrations of WTA mud residue: 0%, 2%, 5% and 10%; there were also made mixtures with 5% of calcinated mud and 5% of grinded mud. The probe material was pressed and submitted to the following burning temperatures: 950°C, 1000°C and 1050°C. The samples of mud were characterized by X-ray diffraction, X-ray fluorescence and Scanning Electronic Microscopy and the probe material was observed in na optical microscope. In the experimental conditions of this study, it was concluded that the mud added to the matrix of the clay mass contributed to the reduction of its plastic properties. The Physical-Mechanical properties of the probe material made with the mixture of mud and clay suffer influence from the temperature of burning. The values of the drying linear retraction, of the total linear contraction and of the linear contraction after burning, of the tensions of rupture at flexion (TRF) and of the loss after exposure to fire meet the standard values for the making of red ceramics the using in civil construction.

Key Words: WTA residue, recycling, red ceramics, ceramic brick.

1. Introdução Teórica

1.1. Aproveitamento do lodo de ETA em cerâmica vermelha

As estações de tratamento de água – denominadas ETA - vêm buscando soluções de reciclagem para os resíduos gerados no processo de tratamento de água – esses resíduos são denominados de lodo ETA. Atualmente as soluções são a disposição em aterros sanitários ou simplesmente lançá-los na rede de esgoto.

Na atualidade, os problemas ligados à poluição e ao descarte de resíduos industriais são de grande importância e preocupam tanto o setor industrial quanto a sociedade como um todo^[1]. As estações de tratamento de água geram enormes quantidades de lodo sendo necessário buscar alternativas para o reaproveitamento destes resíduos de forma a não agredir o meio ambiente.

Neste contexto, um setor que apresenta um enorme potencial para contribuir na solução de problemas ambientais originários nos mais diversos processos industriais é o da cerâmica vermelha. De fato, trabalhos reportados na literatura^[1,2,3,4,5,6,7] têm mostrado que é perfeitamente possível a reciclagem de resíduos industriais como constituintes de massas cerâmicas para a fabricação de produtos cerâmicos para a construção civil.

A proposta do aproveitamento do resíduo vem de encontro com as normas do órgão estadual de proteção ao meio ambiente, FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente, que exige o aproveitamento de resíduos, evitando a sua disposição, mesmo que em aterros sanitários [8,9,10].

Os aterros sanitários utilizados para este fim disponibilizam de muita área, provocando desmatamento prejudicando o equilíbrio ecológico da região, uma vez que ao receber o lodo de ETA a área dificilmente recupera sua composição de fauna e flora anterior.

A reutilização dos resíduos de ETA pode ser realizada com a incorporação de lodo em matriz de cerâmica vermelha^[11]. Através desta mistura confecciona-se corpos de prova para realização de diversos ensaios, com o objetivo de estabelecer misturas que possibilitem a reutilização deste lodo na matriz de blocos cerâmicos para a indústria da construção civil.

Esta possibilidade pode viabilizar a reutilização destes resíduos, resolvendo um problema de descarte em área da estação de tratamento, diminuindo as atividades extrativas de argila, que

na maioria dos casos causa danos ambientais, por não envolver por parte das empresas de blocos cerâmicos projetos de recuperação de áreas.

No Brasil há enormes jazidas de argilas, com importância em diversas áreas, principalmente na indústria de cerâmica vermelha. Este tipo de indústria abrange a fabricação de produtos à base de argilas. Produtos tais como, tijolos, blocos cerâmicos, lajotas e telhas são destinados à indústria de construção civil, compreendendo hoje cerca de 13.000 pequenas e médias unidades produtivas dispersas em todo o país^[1].

Diversos são os estudos que visam a utilização de cerâmica vermelha como matriz para adicionar resíduos, evitando sua disposição em meio ambiente. Podem-se citar alguns, que são:

- Utilização de pó de aciaria em massa de cerâmica vermelha^[12]
- Obtenção de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico^[13]
- Reciclagem do lodo da Estação de tratamento de efluentes de uma Indústria de Revestimentos Cerâmicos. Ensaio laboratoriais^[14]
- Incorporação de resíduos sólidos galvânicos em massa de cerâmica vermelha^[15]
- Tratamento de lodo rico em alumínio através de reciclagem^[16,17]
- Reciclagem de resíduos provenientes do setor petrolífero com massas argilosas e comportamento de sinterização^[18,19,20,21]
- Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha^[1]

1.2. Características da argila

A argila é um material extraído diretamente da natureza, terroso de granulação fina que ao ser umedecida com água, geralmente, adquire uma certa plasticidade. Quimicamente as argilas são formadas principalmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, denominados de argilominerais. Em menor quantidade as argilas podem conter substâncias orgânicas, partículas de quartzo, pirita, mica, dolomita, calcita e outros minerais residuais, podendo conter minerais amorfos. Os minerais argilosos mais comuns que são de interesse possui o que é conhecido por estrutura da caolinita ($[Al_2(Si_2O_5)(OH)_4]$). Sua característica comum sob o ponto de vista químico, físico e mineralógico são as estruturas cristalinas em camadas constituídas de alumínio silicatos eletricamente neutros. Quando ocorre mistura de água com argila, as camadas

deslizam uma sobre as outras sendo que a água se posiciona entre elas formando uma película fina ao redor das partículas da argila, originando propriedades físicas como a facilidade de clivagem, sensação que o material está ensaboado e suavidade. De acordo com a ABNT, as argilas são compostas por partículas coloidais de diâmetro inferior a 0,005mm, com alta plasticidade quando úmidas e, quando secas, formam torrões dificilmente desagregáveis pela pressão dos dedos^[22,23,24,25].

Os argilominerais têm sua origem a partir de substâncias minerais resultantes da desagregação do feldspato das rochas ígneas, por ação da temperatura, da água e do gás carbônico. Como as rochas ígneas e os feldspatos são de diversos tipos, há também diversos tipos de argilominerais. Ocorre, então, depósitos de natureza extremamente variada, não existem duas jazidas de argila rigorosamente iguais, ocorrendo grandes diferenças mesmo em argilas de mesma jazida.

Para uma correta identificação de amostra de argila é necessário uma nomenclatura geográfica, identificando-a pela localização de onde foi extraída usando nomes de países de origem; são comuns nomes como argilas ou caulins ingleses; argilas de Dorset; Perus, Juiz de Fora^[22,25].

As argilas caulínicas são as mais puras e são usadas na indústria de refratários, porcelana, cerâmica sanitária podendo ser usada também na indústria de medicamentos e papel. As montmorilonitas são pouco usadas isoladamente devido a sua alta absorção e de grande poder de inchamento; são geralmente misturadas com as caulinitas e com as ilitas para favorecer a plasticidade da massa. As ilitas são mais abundantes e as mais empregadas na fabricação de tijolos, telhas e pisos (cerâmica vermelha)^[25].

1.2.1. Plasticidade

A plasticidade é a propriedade que um material possui de ficar deformado sem ocorrer o rompimento devido à aplicação de uma tensão e permanecendo a deformação quando a força se anula. A “água de plasticidade” é a água necessária adicionada à argila para torná-la plástica e ser moldada por um determinado método. A plasticidade nas argilas varia com a quantidade de água até o limite no qual as lâminas separam-se e a argila torna-se um líquido viscoso^[22].

1.2.2. Limite de ATHERBERG

Avalia a trabalhabilidade de uma argila (limite de plasticidade e limite de liquidez). O limite de plasticidade é determinado pelo rolamento da massa plástica sobre uma placa de vidro, de modo a formar um cilindro com diâmetro de 3mm por ocasião da fragmentação do material; o teor de umidade corresponde ao limite de plasticidade^[22]. Partindo de um determinado teor de umidade, adiciona-se água à argila até se conseguir moldar o bastão com 3mm de diâmetro, o

teor de umidade é determinado pela fórmula^[22]:
$$LP = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad (1.1)$$

Mh = Massa da argila úmida, Ms = Massa da argila seca.

O limite de liquidez é determinado através do ensaio no aparelho de Casagrande. Coloca-se massa plástica de argila na canha do aparelho até a altura de aproximadamente de 1cm, com a utilização de um cinzel apropriado, a massa é dividida em duas partes e, através de golpes aplicados pelo acionamento de manivela que movimenta um excêntrico, faz-se unir as bordas da caneta. O limite de liquidez^[22] (LL) será expresso pelo teor de umidade que corresponde a 25 golpes do aparelho de Casagrande para a eliminação de caneta que separa as duas partes. Aumenta-se gradativamente o teor de água da argila até a caneta desaparecer (25 golpes no

aparelho de Casagrande). Limite é dado por^[22]:
$$LL = \frac{Mh - Ms}{Ms}, \quad (1.2)$$

Mh = Massa da argila úmida, Ms = Massa da argila seca.

O índice de plasticidade (Ip) é dado por^[22]:
$$Ip = LL - LP \quad (1.3)$$

O índice de consistência (Ic) é dado por^[22]:
$$Ic = \frac{LL - h}{Ip}, \quad (1.4)$$

h é o teor de umidade da argila no estado em que se encontra na natureza.

De acordo com a ABNT as argilas são classificadas como^[22]:

- Argilas muito moles $Ic \leq 0$
- Argilas moles $0 < Ic \leq 0,50$
- Argilas médias $0,50 < Ic \leq 0,75$
- Argilas rijas $0,70 < Ic \leq 1,00$
- Argilas duras $Ic > 1,0$

1.2.3. Resistência da argila seca

As principais características da argila são a plasticidade, quando se adiciona água, e a resistência quando seca. A resistência mecânica depende principalmente de granulometria sendo a composição granulométrica mais adequada aquela que possui substâncias argilosas em torno de 60%, estando o resto do material dividido igualmente entre silte, areia fina e areia média. As argilas devem ser dosadas a fim de apresentarem plasticidade máxima, quando úmidas, máxima resistência quando seca ou quando queimada e mínima retração durante a secagem. Nas indústrias de cerâmica vermelha, devido a isso, é muito freqüente a mistura de argilas duras (ilitas) com argilas plásticas (chamadas também de “argilas de várzea”)^[22].

1.2.4. Perda de água sob ação da temperatura

As argilas em seu estado natural contêm água de duas formas: como água fisicamente combinada e na forma de água quimicamente ligada. Na primeira forma, a água é absorvida pelos argilominerais, ocupando o vazio entre eles e na segunda, a água compõe as oxidrilas (OH) no reticulado cristalino das partículas constituintes dos argilominerais. Todo o material argiloso possui água reticular e água de absorção. Alguns possuem água zeolítica, com suas moléculas intercaladas nos vazios da estrutura cristalina^[22].

A energia térmica elimina toda a água; da temperatura ambiente até 110°C a água de absorção é facilmente eliminada. A água zeolítica é eliminada entre 300°C e 400°C, ocorrendo com maior ou menor facilidade em função da forma dos micro cristais e da porosidade da argila^[22]. Não ultrapassando esta faixa de temperatura, os minerais podem reidratar-se quantas vezes for necessário, isso ocorre porque a argila conserva sua estrutura. A água reticular é eliminada a uma temperatura fixa para cada mineral, sempre maior do que 400°C.

Argilas caulínicas após 400°C, passam a perder água reticular, transformando-se em estruturas amorfas de sílica e alumina e a 900°C a sílica e a alumina se combinam formando estruturas cristalinas^[22]. Na preparação da matéria prima, em alguns casos, adiciona-se mais água às argilas para lhes conferir a plasticidade necessária à moldagem. Essa água adicionada e a água fisicamente combinada são eliminadas a baixas temperaturas de secagem.

A umidade final da matéria prima preparada varia de 20% a 30% para produto extrudados e é de cerca de 7% para alguns produtos que a requerem em forma de pó. Cada argila apresenta, geralmente, características diferentes, então, torna-se necessário analisá-las e prepará-las para a

fabricação de um determinado produto. A Tabela 1-1 mostra a composição média da massa cerâmica preparada para a produção de tijolos e telhas na indústria de cerâmica vermelha^[22].

Tabela 1-1 - Composição média da massa cerâmica preparada para a produção de tijolos e telhas.

Fonte: (CEMIG 1993)^[22]

Elementos	Teor (%)
SiO ₂	50 – 70
Al ₂ O ₃	10 – 35
Fe ₂ O ₃	3,8 – 8
K ₂ O(K ⁺)	0,5 – 4
MgO	0,2 – 5
SO ₃ (SO ₄ ²⁻)	0,5 – 4
Outros (*)	3 - 12

* Esta parcela componente da massa cerâmica constituirá a “perda ao fogo”, por ocasião da queima.

1.2.5. Retração por secagem

Quando exposto à secagem, num bloco de argila úmida ocorre a evaporação da água a partir da superfície do corpo e difusão de umidade no interior da massa, no sentido do centro para a superfície do corpo, com tendência a homogeneizar o conjunto. A retração por secagem ocorre inicialmente de maneira bastante acentuada, atenuando-se a partir de um determinado teor de umidade, denominado de “umidade crítica”. Nesse processo, o lugar antes ocupado pela água transforma-se em vazios e, conseqüentemente, o conjunto retrai-se proporcionalmente ao grau de umidade e composição da argila: quanto maior o teor de finos, maior é a retração. Um efeito negativo da retração pode ocorrer quando a taxa de evaporação for maior que a taxa de difusão, a superfície irá secar contraindo seu volume mais rapidamente que o interior, podendo a peça deformar-se ou mesmo trincar-se^[22,24].

Todos os fatores que aumentam a plasticidade aumentam a retração, então no processo de moldagem dos produtos cerâmicos deve-se adicionar à argila menor quantidade possível de água, e a secagem deve ser rápida, porém tomando cuidado para evitar que a peça trinque ou empene, devido a variação de volume. Para minimizar a contração, o tamanho das partículas pode ser aumentado, ou materiais não plásticos que possuam partículas relativamente grandes podem ser adicionados à argila^[22,24].

As alterações dimensionais dependem de dois fatores: tempo e temperatura. Tempo muito longo em baixas temperatura são equivalentes a tempo curto em elevada temperatura. Contrações desiguais e/ou empenamentos podem surgir durante a queima se^[22]:

- apresentar distribuição heterogênea de temperatura no interior do bloco,
- ocorrer segregação de partículas durante a conformação, que ocasione variações na granulometria das partículas ou na composição,
- ocorrer atrito entre a base do forno e as peças que se contraem.

1.2.6. Porosidade

É a relação entre o volume de poros e o volume total aparente do material (argila ou cerâmica), sendo função da natureza dos constituintes, forma, tamanho e posição relativa das partículas e também dos processos de fabricação^[22].

Qualquer porosidade residual tem influência negativa tanto sobre as propriedades elásticas como sobre a resistência. Foi observado para alguns materiais cerâmicos que a magnitude do módulo de elasticidade diminui em função da fração volumétrica da porosidade, e também exerce um efeito negativo sobre a resistência a flexão por dois motivos^[24].

- os poros reduzem a área de seção reta através da qual uma carga é aplicada,
- atuam como concentradores de tensão.

Quando os grãos de uma argila são grossos ela tem menos poros e mais permeabilidade; quando predominam os grãos finos, a argila tem mais poros e menor permeabilidade. Com argilas de grãos de vários tamanhos reduzem-se a porosidade e a permeabilidade conseguindo-se um melhor “empacotamento” entre partículas com granulometria contínuas. O fator de empacotamento pode ser elevado utilizando-se misturas de grãos com granulometria diferente, onde as partículas pequenas se localizarão nos interstícios das grandes^[22].

A porosidade influi nas propriedades da argila e da cerâmica com a forma de^[22]:

- a absorção de água aumenta na razão direta da porosidade,
- a condutividade térmica, a condutividade elétrica e a massa específica aparente do material diminuem com o aumento da porosidade do material.

Existem duas porosidades nos materiais cerâmicos; a aparente e a real. A primeira considera apenas os poros abertos, que absorvem água (pode ser determinada pelo método de absorção), e a segunda leva em consideração todos os poros, abertos e fechados.

1.2.7. Sinterização

A união de pós finos ou fibras entre si, em corpos sólidos mais ou menos densos é chamada de sinterização. A sinterização se realiza quando as partículas do pó são aglomeradas numa temperatura suficiente para que elas se liguem entre si. As mudanças de propriedade durante a sinterização são o resultado da modificação de tamanho, forma e quantidade de porosidade à medida que a temperatura vai se avizinando do ponto no qual ocorre o transporte de massa que viabiliza o processo da sinterização^[26].

Nas cerâmicas, a sinterização provoca aumento nas seguintes propriedades²⁷:

- resistência mecânica,
- densidade,
- condutividade térmica,
- transparência e a translucidez.

1.3. Preparação de argilas para ensaios de laboratório

Nos ensaios de laboratório com argilas que serão utilizadas em cerâmicas vermelhas adota-se as seguintes operações^[28]:

- Secagem
- Britagem
- Moagem

Na secagem a argila é ensacada e exposta ao tempo e posteriormente guarda-se uma amostra em um saco de polietileno para referência. A argila após secagem deve apresentar torrões facilmente desagregáveis, manualmente, em fragmentos de 5cm de diâmetro.

Na britagem usa-se um britador de mandíbulas e para operar esse britador parte-se da maior abertura entre as mandíbulas até a menor possível e na moagem utiliza-se moinho de discos começando-se com maior abertura entre os discos até a menor possível.

Os corpos de prova devem ser moldados em dimensões que possam ser submetidos ao maior número de ensaios possíveis e também que permita a realização de ensaios simultâneos

com maior número de amostras. A massa desses corpos de prova é semi-seca de 8g e, com esses corpos de prova, é possível medir após secagem e queima, as seguintes características:

- cor após queima, neste caso através de observação dos corpos de prova,
- retração linear ou volumétrica,
- módulo de tensão ou ruptura à flexão,
- absorção de água,
- porosidade aparente,
- massa específica aparente,
- perda ao fogo.

A contração ou retração linear é um indicativo da propagação do processo de sinterização ocorrido com o material durante a queima. A presença de Fe_2O_3 e CaO favorece o processo de sinterização. A qualidade de um bloco mede-se através do grau de contração devido a queima. A temperatura de queima altera significativamente a contração linear. Quanto maior for a temperatura de sinterização maior será a retração e a partir de 1000°C o efeito fica mais evidente pois, pode ocorrer um maior grau de vitrificação (formação da fase vítrea, que contribui para maior densificação dos corpos de prova)^[(1)]. Normalmente uma boa qualidade de bloco cerâmico possui contração abaixo de 8%(na faixa de 1,19 a 7,33%)^[29]

A tensão de ruptura à flexão(TRF) é uma medida das características coesivas do material, relacionadas ao grau de compactação e consistência. Ela pode ser utilizada também para avaliar a sinterabilidade de um material^[30]. Os valores da TRF aumentam com o acréscimo de temperatura de queima. Isto é devido ao aumento da densificação do material, ou seja a redução da porosidade dos corpos de prova.

Os valores de TRF especificados para a fabricação de produtos de cerâmicas vermelhas para o uso na construção civil, que são^[30]:

- Tijolos Maciços – $\text{TRF} > 2,0\text{MPa}$,
- Blocos Cerâmicos – $\text{TRF} > 5,5\text{MPa}$,
- Telhas – $\text{TRF} > 6,5\text{MPa}$.

A absorção de água assim como a retração após a queima refletem o grau de sinterização alcançado pelo material durante a queima. Assim os efeitos da presença de Fe_2O_3 e CaO na

retração de queima também são percebidos na absorção de água, já que ambos são associados à evolução da sinterabilidade do material.

A absorção de água é um importante fator que interfere na durabilidade do bloco pois está relacionada com a resistência aos ataques químicos e físicos do meio ambiente. A absorção de água decresce com o aumento da temperatura de queima^[31].

Para a produção de blocos cerâmicos os valores de absorção de água (AA) devem estar dentro do limite que é $AA < 25\%$ ^[31].

A porosidade aparente (PA) decresce com o aumento das temperaturas de sinterização, pois eleva a densificação do material. Os resultados obtidos com medidas de porosidade aparente (PA) e massa específica aparente (MEA) corroboram com os resultados observados para a absorção de água (AA).

A porosidade aparente diminui com o aumento da temperatura de sinterização, acompanhado de um aumento da massa específica aparente (MEA) e de redução da absorção de água pois nestas condições a densificação dos corpos de prova aumenta^[25].

A Perda ao Fogo (PF) é atribuída a matéria orgânica contida na mistura e também outras substâncias inorgânicas que compõem o lodo e a argila, que são queimadas durante o processo. A perda ao fogo normal para um bloco cerâmico pode chegar até em torno de 15% ^[25].

1.3.1. Forma e dimensão dos corpos de prova

Os corpos de prova padronizados pela “American Ceramic Society –(ACS)” para ensaios cerâmicos (ACS, 1928) são barras prismáticas com dimensões de 200x20x10mm, porém os corpos de prova em forma de “plaquetas retangulares” de 60x20x5mm mantém uma das dimensões da barra padrão da ACS e assemelha-se às placas retangulares usadas para a medida de retração, permitindo medida da resistência ou tensão de ruptura à flexão^[25].

A espessura de 5mm dos corpos de prova permite detectar facilmente defeitos nos moldes de prensagem e avaliar o comportamento da amostra na prensagem. Espessuras inferiores levam a uma sinterização ou vitrificação muito pronunciadas na queima e a valores elevados para tensão de ruptura à flexão, tornando necessário um constante controle na espessura dos corpos de prova, pesando a argila usada^[25].

Os corpos de prova com as dimensões 60x20x5mm permitem acentuar a tendência para trincas e empenamento na queima. O método mecânico de moldagem possibilita uma maior

reproduzibilidade e um coeficiente de variação menor para os resultados de ensaios cerâmicos. A umidade de prensagem deve ser próxima a natural sendo acertada por tentativa (geralmente a metade do limite de plasticidade de Atterberg), até se obter um corpo de prova que pode ser extraído facilmente do molde e manuseável sem esfarelar. Esta umidade fica na faixa de 10% a 55%, referida a argila seca à 110°C e chegando a 20% ou 30% quando se tratar de argila muito plástica^[25].

1.4. Características das argilas para cerâmicas vermelhas

Estas argilas apresentam-se na natureza nas cores preta, vermelha, marrons, amarelas ou esverdeadas; apresentam cor vermelha à 950°C e marrom ou preta a 1250°C (super queima). As argilas podem apresentar fusão parcial (arredondamento das arestas) ou total. Pode ocorrer um inchamento devido a desprendimento de gases, deformando totalmente o corpo de prova^[25].

Estas argilas podem ser moldadas facilmente, ter um valor médio ou elevado de tensão de ruptura a flexão antes e após queima e, quando queimadas a 950°C devem possuir um mínimo de trincas e empenamentos. Elevados teores de ferro divalente, elementos alcalinos e alcalinos terrosos são prejudiciais pelo fato de causar uma excessiva retração, reduzir a faixa de vitrificação e colorações indesejáveis^[25, 32].

1.5. Estudos de reaproveitamento de resíduos utilizando cerâmica vermelha como matriz

Os processos de incorporação de resíduos sólidos industriais em matriz de cerâmica vermelha, vêm sendo amplamente estudado. Atualmente estes resíduos vem sendo aproveitados em misturas para fabricação de blocos cerâmicos que poderão ser utilizados na construção civil. As misturas de resíduos na matriz cerâmica são de diversas proporções e, após vários ensaios consegue-se estabelecer misturas dentro de padrões aceitáveis^[2].

No caso particular de incorporação de lodo de ETA para fabricação de tijolos^[4] mostra-se vantagens, a começar pela semelhança de composição química entre as argilas de modo geral e os lodos, de acordo como é mostrado na Tabela 1-2.

Tabela 1-2 - Características de um lodo de ETA e de uma argila usada para fabricação de produtos de cerâmica vermelha^[4]

Características	Lodo úmido	Lodo seco	Argila
pH	7,19	7,27	8,09
Densidade (g/cm ³)	1,16	1,75	2,52
Porcentagem de mistura	84,1	41,0	1,4
Perda ao fogo (800±50°C - 3h)%	94,6	76,6	7,9
Metais			
Cd (mg/kg)	3	5	<0,1
Cr (mg/kg)	537	1713	16
Cu (mg/kg)	29	212	85
Co(mg/kg)	10	24	5
Fe (mg/kg)	5265	18070	8530
Ni(mg/kg)	167	1131	20
Pb (mg/kg)	3	35	<0,1
Zn(mg/kg)	264	628	98

As composições químicas do lodo de ETA dependem dos materiais utilizados durante o tratamento da água principalmente na fase de floculação e desidratação. A tabela mostra uma acentuada perda ao fogo do lodo úmido em relação à argila. A Perda ao Fogo (PF) é atribuída a matéria orgânica contida na mistura e também outras substâncias inorgânicas que compõem o lodo e a argila, que são queimadas durante o processo. Por isto este parâmetro pode variar muito dependendo da qualidade da água que está sendo coletada na estação de tratamento.

Observa-se através da tabela os elementos químicos que constituem o lodo e a argila e, a presença de água em sua estrutura é um fator importante na qualidade do bloco cerâmico onde o limite de Atterberg deve ser determinado para atingir uma plasticidade adequada na mistura lodo-argila e assim construir um bloco cerâmico dentro dos padrões^[4].

Na argila concentra-se a menor taxa de perda ao fogo, realizada na temperatura de 850±50°C onde, conforme a tabela, mostra 7,9%, existindo também baixas concentrações de metais, com exceção do ferro que apresenta concentração de 8.530mg/kg.

Os procedimentos utilizados em ensaios de laboratório para analisar a viabilidade das misturas de lodo de ETA em matriz de cerâmica vermelha são^[2]:

- secagem em estufa a 110°C confeccionando corpos de prova com dimensões de (6,0cmx2,0cmx0,5cm).
- prensagem uniaxial em matriz metálica, com pressão de 400kgf/cm² (40MPa), e temperaturas de queima de 800°C, 900°C, e 1000°C.

Os parâmetros adotados para considerar uma composição com potencial de uso em cerâmica vermelha são a tensão de resistência à flexão (TRF) após secagem, tensão de resistência à flexão após queima e absorção de água (AA)^[2].

A Tensão de Resistência à Flexão(TRF) é uma medida das características coesivas do material, relacionadas ao grau de compactação e consistência. Ela pode ser utilizada também para avaliar a sinterabilidade de um material.

A absorção de água reflete o grau de sinterização alcançado pelo material durante a queima, é também um importante fator que interfere na durabilidade do bloco pois está relacionada com a resistência aos ataques químicos e físicos do meio ambiente. Os ensaios de absorção de água mostram que o aumento da temperatura de queima, não variando a concentração da mistura lodo e argila, provoca sua diminuição e com o aumento da concentração observa-se seu aumento^[2].

Os valores dos parâmetros de absorção de água e tensão de resistência à flexão são^[2]:

- Tensão de ruptura à flexão a 110°C: superior a 0,5MPa (5kgf/cm²),
- Tensão de ruptura à flexão após queima: superior a 5MPa (50kgf/cm²)
- Absorção de água: AA < 25%^[33].

A perda ao fogo, referente a matéria orgânica contida na mistura e também a outras substâncias inorgânicas que compõem o lodo e a argila que são queimadas durante o processo, mostrou que o aumento da temperatura de queima, não variando a concentração da mistura lodo e argila, provoca seu aumento. Com o aumento da concentração observa-se também um aumento da perda ao fogo entre as temperaturas de 880°C a 1000°C.

A contração do bloco devido a queima aumenta com aumento da temperatura, mantendo constante a concentração de lodo e na argila. Aumentado-se a concentração de lodo na mistura é possível observar um aumento da contração do bloco cerâmico.

Em geral, a incorporação de lodo de ETA provoca diminuição da tensão de ruptura à flexão dos blocos cerâmicos, sendo que esta diminuição aumenta quanto maior a quantidade de lodo incorporada à massa cerâmica.

A absorção de água e a porosidade dos blocos cerâmicos queimados podem apresentar uma tendência de aumentar com a quantidade de lodo incorporado. O lodo apresenta um comportamento de um enchimento não plástico porém, a proporção de lodo e a temperatura de queima são fatores importantes que determinam a qualidade do bloco cerâmico^[1,2,3,4,6].

A mistura de 10 a 20% de lodo em mistura com argila torna possível o uso de lodos de ETA em matriz de argila para produzir blocos cerâmicos, contribuindo para a solução de disposição adequada desses lodos^[4].

A mistura de lodo de Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) doméstico e podas em massa de argila, dá origem a blocos cerâmicos porosos devido a incorporação de produtos orgânicos à matriz de argila. A formação de poros vai depender da forma como o material orgânico ficou situado na matriz, podendo existir poros fechados ou abertos^[13].

A perda ao fogo dos blocos cerâmicos constituídos desta mistura aumenta com o aumento da concentração de podas na mistura, mantendo valores próximos para as temperaturas de queima.

A retração linear apresenta pequenas variações com o aumento de concentração, sendo que a porosidade aparente e a absorção de água aumentam e a massa específica aparente apresenta uma redução de seus valores.

Outra experiência de reciclagem do lodo de Estação de Tratamento de Água mostra que a incorporação de resíduo em massa cerâmica, pode não interferir nas características de absorção de água, retração linear e resistência mecânica. Dessa forma a mistura de lodo na massa cerâmica é um bom procedimento de reciclagem desse resíduo^[14].

Os gases emitidos durante a queima dos blocos cerâmicos construídos com estas misturas^[34], mostram a presença de dissulfeto de carbono, ácido asséptico, 2,2 dimetil pentano e presença de benzeno e tolueno. A emissão de metais pesados apresenta um valor 20 vezes superior às emissões de blocos apenas confeccionados com argila.

No setor siderúrgico^[1] são estudadas as possibilidades de reaproveitamento de resíduo sólido, como constituinte de massa argilosa para a fabricação de produtos de cerâmica vermelha. Estudos mostram que o resíduo adicionado contribuiu para a redução das propriedades plásticas

das massas cerâmicas, indicando que os mesmos constituem-se de um material não plástico. As propriedades físico-mecânicas são influenciadas pela temperatura de queima, principalmente acima de 950°C devido ao maior grau de sinterização dos corpos cerâmicos, os resultados obtidos demonstram claramente que o resíduo sólido de siderurgia pode ser perfeitamente reaproveitado como constituinte de massas cerâmicas para fabricação de produtos de cerâmica vermelha tais como tijolos maciços, blocos cerâmicos e telhas, empregados na construção civil. A cor de queima dos corpos de prova também foi adequada para uso em cerâmica vermelha.

O caso particular do pó de aciaria em massa de cerâmica vermelha^[12] mostra através de ensaios realizados com mistura de argila que a adição deste pó até um percentual de 10% não interferiu significativamente nas propriedades mecânicas dos blocos cerâmicos construídos.

Os resíduos sólidos galvânicos^[15] também conhecido por lama galvânica que faz parte dos resíduos industriais perigosos classe I e lodo rico em alumínio apresentam também boas soluções de reciclagem resolvendo graves problemas de disposição de resíduos sólidos deste setor industrial^[15, 16, 17].

Os resíduos provenientes do setor petrolífero também são temas de estudos de reciclagem em matriz de argila pois são resíduos perigosos sob o ponto de vista ambiental devido à penetração no solo, provocando destruição de fauna e flora e por isso atualmente as empresas os armazenam em tambores, desta forma ocupando grandes áreas além do risco ambiental que causam^[18,19,20,21].

1.6. Tratamento de água

A água consumida pelo homem é fonte de bem estar e saúde, necessitando de tratamento para retirada de impurezas que se encontram em forma de partículas em suspensão e partículas em estado coloidal. Entende-se por estado coloidal as partículas com diâmetro menores que 1µm, sendo que as de diâmetro superior a 1µm são conhecidas como limo. A remoção destas partículas é realizada através do processo de coagulação/floculação^[35].

1.6.1. Coagulação/Floculação

É importante termos clareza dos termos “coagulação” e “floculação” e que existe diferença entre eles que não podem ser confundidos.

O termo coagulação vem do latim “coagulare” que significa juntar. Este processo descreve o efeito produzido pela adição de um produto químico a uma dispersão coloidal que se traduz em uma desestabilização das partículas através da redução das forças que tendem a mantê-las separadas. Neste caso as partículas passam a aglomerar-se possibilitando contato entre elas, formando partículas de tamanho submicroscópico.

A floculação se caracteriza pela formação de partículas sedimentáveis, a partir de partículas desestabilizadas de tamanho coloidal. O termo floculação também é derivado do latim “floculare” que significa formar um floco semelhante a uma estrutura porosa muito fibrosa. Ao contrário da coagulação onde as forças primárias são de natureza eletrostática, a floculação ocorre através de um mecanismo de formação de pontes químicas(forças de Van der Waals). Macroscopicamente a floculação transforma as partículas coaguladas de tamanho submicroscópico em outras mais visíveis facilitando a sedimentação por gravidade que ocorre no processo de limpeza da água^[36].

Temos notícia de tratamento de água para o consumo humano, inclusive com o emprego de substâncias químicas(sais de alumínio), desde o ano 70 após o nascimento de Cristo. Segundo o historiador da época, chamado Plínio, os sais de alumínio eram conhecidos como argila da Itália, que era já naquela época uma mercadoria importante do comércio mundial pois possuía a capacidade de transformar “águas amargas em potáveis”^[36].

Necessidade da coagulação

Em geral as águas apresentam impurezas originárias da decomposição do solo, da dissolução de minerais e da decomposição da vegetação, todos dissolvidos na água. Além do mais, a necessidade da coagulação aumenta cada vez mais devido ao aumento da poluição das águas e o crescimento acelerado da população do mundo^[37].

As impurezas contidas nas águas, sejam de origem natural ou provocadas pelo homem, são da origem orgânica ou inorgânica. As inorgânicas são responsáveis pela variação da turbidez sendo que o sabor e odor são causados pelas substâncias orgânicas dissolvidas.

As partículas que produzem turbidez são classificadas de acordo com seu tamanho, as moléculas possuem tamanho médio de 50µm. A fração de moléculas com diâmetro superior a 1µm são conhecidas com o nome de limo e se sedimentam facilmente quando a água fica em repouso. Por outro lado as partículas com diâmetro menores que 1µm conhecidas como coloidais

permanecem em suspensão durante longos períodos de tempo e por isso torna-se necessário a coagulação para a sua eliminação^[38].

Portanto, a necessidade de coagulação é para que as partículas coloidais formem agregados maiores e desta forma aumentem sua velocidade de sedimentação. A formação de partículas maiores a partir de outras menores é importante para uma fase de limpeza da água conhecida por filtração.

Fatores que influenciam a coagulação

Para alcançar um padrão adequado de coagulação da água tem que se levar em consideração uma rede complexa de variáveis tais como o pH, turbidez, composição química da água, tipo de coagulante e fatores físicos tais como a temperatura e as condições de mistura. Estas interações são tão complexas que teoricamente é impossível determinar um padrão adequado de coagulante para uma dada amostra de água, portanto a quantidade de coagulante é determinada empiricamente para cada tipo de água^[39].

Efeito do pH

Existe uma escala de pH para uma dada amostra de água dentro da qual se registra uma boa coagulação/floculação em menor tempo possível. A variação desta escala é influenciada pelo tipo de coagulante que podem ser utilizados, pela composição química da água e a concentração do coagulante.

Os coagulantes mais utilizados são sais de alumínio(sulfato de alumínio) ou sais de ferro(cloreto de ferro) denominados de coagulantes metálicos. Os coagulantes metálicos precipitam e coagulam com maior rapidez, sendo que o pH deve ficar entre 5,8 e 7,8. Dependendo da turbidez e da presença de íons na água esta variação sobe para 6 a 7,8^[40].

1.6.2. Geração de lodo nas ETA

As estações de tratamento de água captam água de rios, realizam tratamento adequado e a distribuem sob forma de água potável aos centros de consumo humano. Os processos utilizados nestas estações são, regra geral, os seguintes^[8]:

- Oxidação
- Coagulação

- Floculação
- Decantação
- Filtração
- Desinfecção
- Estabilização do pH
- Fluoretação

Na oxidação é injetado cloro na água bruta captada para oxidar os metais presentes dissolvidos, principalmente o ferro e o manganês. Na coagulação adiciona-se cal para manter o pH no nível adequado e logo após sais de alumínio ou sais de ferro como coagulante primário para formar os flocos de impurezas. Em contato com a água este coagulante reage quase que instantaneamente, promovendo uma reação de hidrólise, resultando na formação de determinados compostos que irão, juntamente com as impurezas presentes, constituir os flocos, que serão separados posteriormente nas unidades de decantação e filtração^[41].

Na floculação a água é misturada em tanques, com flocos de impurezas maiores iniciando-se a fase de decantação. Após a decantação a água passa por filtros com antracito, areia e cascalho retendo as impurezas que não foram sedimentadas nas etapas anteriores^[42,43,44,45]. Essas impurezas retiradas da água originárias principalmente dos decantadores e das águas de lavagem dos filtros são denominadas de lodo de estação de tratamento de água –lodo de ETA-. As características dessas impurezas dependem das condições da água bruta retirada do manancial, dosagens e produtos químicos utilizados e a forma de limpeza dos filtros dos decantadores.

A lagoa de lodo é o local de disposição do lodo após sua retirada dos decantadores e a seguir é enviado aos leitos de secagem onde a água livre é drenada podendo, dependendo da estação de tratamento, ser retornada ao sistema de tratamento.

Boa parte das estações de tratamento de água realizam as limpezas periódicas, em média uma vez por mês, manualmente, ou seja, esvaziando o decantador e lavando o fundo. Temos então a seguinte seqüência de tratamento da água em uma ETA: coagulação – floculação – sedimentação – filtração – retirada do lodo - fluoretação^[46].

1.6.3. Características de lodos das ETA

Devido à adição de sais de alumínio ou sais de ferro para provocar a coagulação dos resíduos existentes na água bruta os hidróxidos desses sais passam a ser os principais

componentes químicos do lodo e, além disso, partículas orgânicas e inorgânicas. Na ausência de algas e outros materiais orgânicos no manancial, a fração orgânica do lodo torna-se desprezível e o lodo passa a ter características de estabilidade química, sendo composto apenas de matéria inorgânica, tais como areias finas, limos e argilas^[42,44].

A Tabela 1-3^[43] mostra a concentração de metais presentes na fase sólida de lodo de três estações de tratamento de água no estado de São Paulo. De acordo com a tabela observa-se que de fato as concentrações de alumínio variam de acordo com o tipo de floculante utilizado (sais de alumínio ou sais de ferro). O mesmo ocorrendo com as concentrações de ferro presentes na fase sólida dos lodos de ETA.

Destaca-se a presença de alumínio, ferro total seguidos de sódio e cálcio, sendo que as concentrações de ferro e alumínio dependem do tipo de coagulante que foi utilizado durante a fase de tratamento da água denominada de floculação.

Tabela 1-3 - Concentração de metais presentes na fase sólida de um lodo de ETA do estado de São Paulo. De acordo com a tabela observa-se que de fato as concentrações de alumínio variam de acordo com o tipo de flocculante utilizado (sais de alumínio ou sais de ferro). O mesmo ocorrendo com as concentrações de ferro presentes na fase sólida dos lodos da ETA^[43].

Concentração de metais presentes na fase sólida nos lodos de ETA.			
Metais	ETA 01*	ETA 02*	ETA 03*
Alumínio (mg/l)	3965,00	391,00	325,00
Bário (mg/l)	—	0,22	0,18
Cádmio (mg/l)	0,14	0,02	0,02
Cálcio (mg/l)	142,,00	—	0,08
Chumbo (mg/l)	2,32	0,20	0,30
Cloreto	—	35,00	36,30
Cobre	1,47	0,12	0,20
Cromo total	3,82	0,06	0,09
Ferro total	3381,00	129,00	166,00
Ferro solúvel	—	6,14	0,12
Magnésio	27,00	2,87	1,38
Manganês	1,86	7,80	3,44
Manganês solúvel		4,57	1,00
Merúrio	—	—	—
Níquel	2,70	0,14	0,12
Potássio	49,97	7,37	7,55
Sódio	311,00	29,30	63,00
Zinco	2,13	0,70	0,98
*Situadas no Estado de São Paulo			

A Tabela 1-4 mostra algumas características físicas e químicas de lodo de ETA onde foi utilizado cloreto férrico como coagulante. Este lodo foi retirado do decantador e do filtro^[42].

Tabela 1-4 - Algumas características físicas e químicas de lodo de ETA onde foi utilizado cloreto férrico como coagulante^[42].

Característica	Lodo de decantador	Água de lavagem de filtro
PH	7,6	6,8
Alcalinidade	876,0	12,0
Cor(U.C)	80.000,0	300,0
Turbidez(UNT)	4.800,0	30,0
Ferro(mg/l)	10.724,0	15,8
Oxigênio consumido(mg/l)	2.100,0	3,6
Resíduo total(mg/l)	15.036,0	214,0
Resíduo solúvel(mg/l)	192,0	111,0
Resíduo insolúvel(mg/l)	14.844,0	103,0

1.6.4. Remoção de água

Os hidróxidos formados devido aos sais adicionados durante o processo de coagulação dificultam a desidratação do lodo durante a fase de secagem tornando-o gelatinoso e volumoso e de viscosidade tixotrópica. Um parâmetro amplamente utilizado para avaliação da dificuldade de remoção de água é a “resistência específica de filtração”. Quanto maior o valor deste parâmetro, mais difícil a remoção, por filtração, da água do lodo. Os lodos produzidos nas ETA usando sais de alumínio ou sais de ferro como coagulantes apresentam resistência específica que varia de 5×10^{12} a 50×10^{12} mg/kg. Lodos com resistência específica superior a 5×10^{12} mg/kg são de difícil desidratação e os de valores menores a 1×10^{12} m/kg são fáceis de serem desidratados portanto os lodos gerados nas ETAs são de difícil desidratação^[44].

Todo lodo consiste numa combinação de uma fase sólida com uma fase líquida. As diferentes formas físicas da água no lodo exercem influência marcante na maior ou menor dificuldade de separação da fase líquida da sólida^[44]. A Figura 1-1 mostra a distribuição de água no floco do lodo^[44].

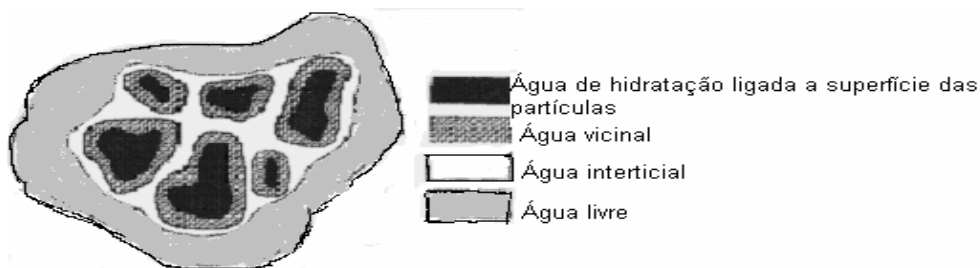


Figura 1-1 - Distribuição de água no floculo do lodo^[44].

De acordo com a Figura 1-1 são definidos os estados físicos da água, em ordem crescente de dificuldade de desidratação, ou seja, apresentam maiores facilidades de retirada a água livre seguido de água intersticial, água vicinal e finalmente água de hidratação pois apresentam ligações químicas com a superfície das partículas sólidas^[44]:

- Água livre: Água não associada com partículas sólidas;
- Água intersticial ou capilar: Água ligada mecanicamente, a qual se encontra presa aos interstícios dos flocos;
- Água vicinal: Constituídas por diversas camadas de molécula de água fisicamente ligadas às quais encontram-se firmemente presas à superfície da partícula por meio de pontes de hidrogênio;
- Água de hidratação: água ligada quimicamente à superfície das partículas sólidas

Uma melhor eficiência nas operações de redução da quantidade de água existente nos lodos é através da adição de cal ou soluções de polímeros sintéticos conhecidos como polieletrólitos^[44]. Os polímeros sintéticos são classificados em polímeros aniônicos, polímeros catiônicos, polímeros não iônicos, sendo relacionadas com as cargas apresentadas por suas moléculas em solução aquosas.

1.7. Disposição final de lodo de ETA

O sistema de tratamento do lodo envolve técnicas cujas pertinências são influenciadas dentre outros fatores pelas características do lodo, da área disponível, do clima local e condições ambientais da região. A maioria das estações de tratamento lança-o direto na rede de esgoto, sem qualquer tipo de tratamento, a não ser a presença de um tanque para controle e regularização da

vazão de lançamento^[44]. Uma alternativa usualmente adotada consiste na utilização de lagoas ou leitos de secagem, sendo que depois de seco o lodo é encaminhado para aterros na própria estação de tratamento^[44].

Em regiões de clima temperado onde o lodo apresenta dificuldade de desidratação, as lagoas de lodo são transformadas em leito de secagem, colocando drenos no fundo das lagoas. Após o período de secagem, tanto no caso de lagoas quanto de leitos deve-se promover a remoção, por dragagem, do lodo concentrado no fundo das unidades para posterior destinação final, que dependendo de uma análise técnica e ambiental pode ocorrer das seguintes formas^[44]:

- Disposição em aterros sanitários;
- Co-disposição com biosólidos;
- Disposição controlada em certos tipos de solos;
- Aplicações industriais diversas como fabricação de tijolos;
- Incineração de resíduos.

2. Objetivos

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

- Caracterizar o lodo da Estação de Tratamento de Água -ETA- do sistema COPASA/RIO MANSO
- Estudar o efeito das adições de lodo de ETA em massa de cerâmica vermelha, nas propriedades mecânicas dos corpos de prova formados.
- Verificar a possibilidade de uso da mistura de lodo de ETA em massa de cerâmica vermelha, para construção de blocos cerâmicos com objetivos comerciais.

3. Materiais e Métodos

Para atingir os objetivos do presente estudo, foram utilizados lodo de estação de tratamento de água – lodo de ETA-.proveniente da estação de tratamento de água do Sistema Rio Manso/COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais - localizada no município de Brumadinho-MG.e massa argilosa(mistura de argilas industriais) conhecida como “argila UNICER”, proveniente da região de Santa Gertrudes – SP, normalmente utilizada pelas cerâmicas da região para fabricação de tijolos e pisos cerâmicos. Misturou-se lodo de ETA com argila em diversas concentrações com objetivo de estudar as propriedades mecânicas destas misturas após secagem e queima.

Desta forma, pretende-se estudar misturas de massa argilosa com diferentes teores de resíduos de lodo da ETA: 2%, 5%(de lodo calcinado), 5%(de lodo moído), 5%(de lodo bruto) e 10%. Para tanto foram feitos corpos de prova com todas as misturas conformados por prensagem, visando à aplicação deste material em blocos cerâmicos para a construção civil. Serão analisadas e discutidas as características físicas e mecânicas tais como: massa específica aparente, porosidade aparente, perda ao fogo, absorção de água, contração linear e tensão de ruptura à flexão para temperaturas de queima de 950°C, 1000°C e 1050°C.

3.1. Lodo da ETA do Sistema COPASA/RIO MANSO

A COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais – com sede em Belo Horizonte – MG, possui uma estação de tratamento de água localizada no município de Brumadinho-MG a captação de água deste sistema é no lago originário da bacia do Rio Manso. Este lago possui um espelho d'água de 19km² de área e volume de 121.000.000m³. Sua profundidade média é de 11m e a máxima de 37m e a produção média de água tratada é de 3,80m³/s^[47].

A estação de tratamento de água é do tipo convencional onde utiliza os seguintes processos para tratamento de água:

- Oxidação
- Coagulação
- Floculação
- Decantação
- Filtração
- Desinfecção
- Estabilização do pH
- Fluoretação

Na etapa da oxidação, os metais presentes na água bruta, principalmente o ferro e o manganês, tornam-se insolúveis devido a adição de cloro ou outro produto similar. Na coagulação além da correção de pH com adição de cal, adiciona-se coagulantes podendo ser cloreto de ferro, hidróxido de alumínio ou sulfato de alumínio, dependendo da disponibilidade de mercado. Inicia-se a formação de flocos.

Na floculação a água é lançada em tanques para favorecer ainda mais a formação de flocos e impurezas maiores. No tanque de decantação ocorre a separação dos flocos da água. Na etapa da filtração a água decantada passa por filtros de antracito, areia e cascalho onde as impurezas que não foram sedimentadas nas etapas anteriores ficam retidas nesta etapa.

Antes de a água ser lançada para consumo na rede pública ela passa ainda por uma etapa de desinfecção, na qual se adiciona cloro para eliminação de microrganismos e também manter um nível residual de cloro na água tratada para prevenir a contaminação que pode ocorrer durante o seu trajeto por redes e reservatórios. Adiciona-se também cal com o objetivo de obter um pH adequado, entre 6 e 7,8, com o objetivo de proteger as tubulações da rede de distribuição de água para o centro consumidor.

Na etapa de fluoretação adiciona-se flúor na água que posteriormente é bombeada para os reservatórios por adutoras^[47].

3.1.1. Geração de lodo na ETA

Após a etapa de decantação o lodo é bombeado para lagoa de secagem e nesta etapa adicionam-se polímeros que atuam em sua desidratação. Na lagoa o lodo é deixado secar ao ar livre. A vazão do lodo adensado é de 15m³/h, sendo que a estação produz 50m³ de lodo por dia, sendo esse resíduo descartado em área própria da estação de tratamento, onde foi construído um aterro^[47].

A COPASA classificou este lodo como resíduo classe III, pela norma NBR 10004^[48] tendo como base análise de lixiviação e solubilização mostradas na Tabela 3-1 e na Tabela 3-2

Tabela 3-1 - Lixiviação do lodo da ETA do Sistema COPASA/Rio Manso^[47]

Elemento	Concentração (mg/l)
Arsênio total	0,05
Bário	0,20
Chumbo	Ausente
Cádmio	0,05
Cromo	< 0,05
Mercúrio	< 0,001
Prata	< 0,024
Selênio	< 0,005

Tabela 3-2 - Solubilização do lodo de ETA do sistema COPASA/Rio Manso^[47]

Elemento	Concentração(mg/l)
Bário	< 0,20
Chumbo	< 0,05
Mercúrio	< 0,001
Zinco	< 0,003
Ferro	< 0,20

3.1.2. Caracterização do lodo de ETA

O lodo da ETA foi caracterizado através de ensaio granulométrico, realizado no laboratório de Tecnologia Cerâmica do Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT São Paulo – SP, análise química por fluorescência de raios-X, realizadas no laboratório de análise química da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC – M.G, neste caso as amostras de lodo analisadas foram de lodo bruto e lodo calcinado (temperatura de 1000°C durante 3 horas). Análises por difração de raios X, também de lodo bruto e de lodo calcinado, realizadas no laboratório de análise química do ICEB – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas da Universidade Federal de Ouro Preto.

A caracterização através de análise de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, das amostras constituídas de lodo bruto e calcinado, foram realizadas no laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV - do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. Foram observadas em Microscópio Eletrônico de Varredura amostras do lodo de ETA usado neste trabalho em dois estados: após secagem e calcinado a 1000°C.

3.2. Caracterização da massa argilosa

A massa argilosa utilizada foi proveniente de Santa Gertrudes, município do estado de São Paulo, denominada de "Argila - Finos da Unicer".

3.2.1. Caracterização Química

A caracterização química foi realizada no laboratório de análises químicas inorgânicas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT - do estado de São Paulo, cujo relatório de ensaio é de número 884 358. Segundo o relatório os métodos utilizados foram:

- (1) Calcinação - Procedimento DQ-LAQI-FX-011
- (2) Espectroscopia de fluorescência de raios-X - Procedimento DQ-LAQI-AA-015
- (3) Espectroscopia de absorção atômica - Procedimento DQ-LAQI-AA-015
- (4) Espectroscopia de fluorescência de raios-X - Procedimento DQ-LAQI-FX-010

A Tabela 3-3 mostra o resultado fornecido pelo IPT da análise química. Os números entre parêntesis referem-se aos procedimentos adotados. A tabela mostra a predominância de óxido silício-SiO₂- seguido de óxido de alumínio - Al₂O₃. O óxido de ferro também aparece com 5,3±0,1% na massa de argila. A presença de Fe na composição da argila é bem menor que sua presença no lodo.

A análise qualitativa da amostra por espectrometria de fluorescência de raios-X revelou ainda a presença de traços de fósforo, zircônio, rubídio e zinco. Observa-se que a indicação dentro do parêntesis na coluna da composição química da Tabela 3-3 corresponde ao método de análise utilizado. A título de exemplo temos: Perda ao fogo(1), significa que o método de análise que determinou a perda ao fogo foi a calcinação.

Tabela 3-3 - Resultado da análise química.

Composição química	Teor (%)
Perda ao fogo (1)	3,2 ± 0,1
Silício (em SiO ₂) (2)	69,5 ± 0,6
Alumínio (em Al ₂ O ₃) (2)	13,5 ± 0,1
Ferro (em Fe ₂ O ₃) (2)	5,3 ± 0,1
Titânio (em TiO ₂) (2)	0,60 ± 0,01
Cálcio (em CaO)(2)	0,64 ± 0,01
Magnésio (em MgO) (3)	2,2 ± 0,1
Sódio (em Na ₂ O) (3)	1,5 ± 0,1
Potássio (em K ₂ O) (2)	3,3 ± 0,1
Manganês (em MnO ₂) (2)	0,06 ± 0,01

3.2.2. Difração de raios – X

A caracterização por difração de raios-X foi realizada no laboratório de caracterização físicas de materiais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT - Estado de São Paulo, cujo relatório de ensaio é de número 883 407. Segundo o relatório o método utilizado foi a análise qualitativa por difratometria de raios-X Procedimento DQ-LCFM- PE-004, utilizando difratômetro RIGAKU RINT - 2000, radiação K - alfa do cobre, com intensidade de corrente de 20mA e tensão de 40kV. A análise qualitativa da amostra revelou como resultado a presença de:

- Óxido de silício (Quartzo alfa)
- Mineral do grupo das micas (provavelmente Muscovita)
- Mineral do grupo dos feldspatos (provavelmente Anortita)
- Mineral do grupo das esmectitas (provavelmente Montmorillonita)
- Óxido de ferro(III) (hematita)

Possivelmente mineral do grupo Caulinita, de acordo com o relatório.

3.3. Confeção dos corpos de prova

Foram confeccionados corpos de prova com mistura de lodo de ETA e massa argilosa com o objetivo de realizar ensaios mecânicos após secagem e queima. Os resultados destes ensaios foram analisados em comparação com os mesmos ensaios de corpos de prova constituídos apenas de argila.

3.3.1. Preparação das misturas de lodo de ETA e argila

O lodo da ETA após ser recebido foi primeiramente esmagado com as mãos para desfazer os torrões e posteriormente submetido a uma secagem de 48 horas em estufa a 110°C. A estufa utilizada foi da marca Fabre - Modelo 170. Após a secagem, o lodo foi moído apenas para desfazer os torrões, o equipamento de moagem foi um moinho de bolas marca “Shatter Box”. Posteriormente, o lodo foi homogeneizado manualmente durante 20 minutos e uma parte foi separada para ensaio granulométrico.

Uma parte do lodo foi separada para calcinação, pois foi confeccionado corpo de prova utilizando a mistura lodo da ETA “calcinado” com argila. A calcinação foi realizada utilizando o forno marca Brasimet K250, com as seguintes características:

- Taxa de aquecimento: 5°C/min
- Temperatura de tratamento: 1000°C
- Tempo de tratamento: 3 horas

Para confeccionar os corpos de prova submeteu-se 100 gramas de lodo a uma moagem até atingir uma medida granulométrica 100% inferior a 0,074mm. A moagem foi realizada no moinho de bolas marca “Shatter Box”

Após a moagem foram confeccionadas as amostras que envolvem argila pura e misturas da argila com o lodo da ETA. As misturas ocorreram nas seguintes proporções:

- C₀ – 0% de lodo e 100% de argila
- C₂ - 2% de lodo e 98% de argila
- C_{5c} - 5% de lodo calcinado e 95% de argila
- C_{5M} - 5% de lodo moído com granulometria < 0,074mm e 95% de argila
- C₅ - 5% de lodo e 95% de argila
- C₁₀ - 10% de lodo e 90% de argila

Cada mistura de lodo da ETA e argila foi acondicionada em sacos plásticos com capacidade para 1kg, logo após submeteu-se a um processo de homogeneização por 20 minutos, em seguida colocou-se 10% de água em cada mistura, para umidecer a mistura. Logo após, as amostras passaram por uma peneira de abertura de 0,84mm, para desfazer totalmente os torrões de lodo que ainda poderiam existir, e novamente homogeneizadas por 20 minutos^[49].

3.3.2. Preparação dos corpos de prova

Para confeccionar os corpos de prova, 15 gramas de cada mistura de lodo da ETA e argila foram pesadas na balança digital modelo Mettler Toledo Pb 8001 e colocados em molde metálico. O conjunto foi submetido a uma prensa hidráulica a uma pressão de 19,73MPa Os corpos de prova possuem a forma de um paralelepípedo com as seguintes dimensões, quando ainda úmidos:

- Largura: 20,50mm
- Comprimento: 61,08mm
- Altura: 5,54mm

A Figura 3-1 mostra o molde contendo o corpo de prova.

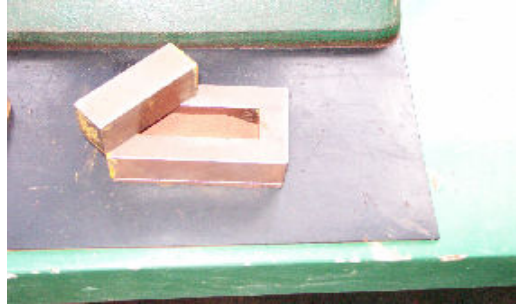


Figura 3-1 - Molde metálico com a mistura de lodo de ETA e argila.

Corpos de prova confeccionados para secagem

Foram confeccionados 11 corpos de prova de argila pura e também 11 corpos de prova de cada composição de mistura de argila e lodo da ETA. Esse conjunto foi submetido a apenas uma secagem durante 24 horas em estufa a 110°C. Nesses corpos de prova foram realizadas as seguintes medidas^[25]:

- Medidas de massa antes e após a secagem sendo denominadas respectivamente de massa úmida (m_u) e massa dos corpos de prova que foram submetidos apenas a secagem (m_s). A medida desses dois parâmetros nos fornece a perda de massa por umidade.
- Valor de seu comprimento antes de passar pelo processo de secagem (L_u) e seu comprimento após a secagem (L_s). Esses parâmetros nos fornecem a variação do comprimento em função da perda de umidade^[25].

Corpos de prova confeccionados para secagem e queima

Também foram confeccionados 11 corpos de prova de argila pura e 11 corpos de prova de cada composição da mistura de argila e lodo da ETA. Esse conjunto foi submetido a secagem de 24 horas a 110°C e posteriormente queimados nas temperaturas de 950°C, 1000°C e 1050°C. Essa queima ocorreu com as seguintes características:

A taxa de aquecimento é de 5°C/h e o patamar de temperatura é de 3 horas. Cada conjunto de corpo de prova foi confeccionado para cada temperatura de secagem e queima. Nesses corpos de prova foram realizadas as seguintes medidas:

- comprimento (L_u) antes da secagem.

- massa de cada corpo de prova após a secagem (m_{se}). Estes corpos de prova foram submetidos à queima.
- comprimento (L_s) após a secagem.
- comprimento após a queima (L_q)
- massa de cada corpo de prova após a queima (m_{sf})

Ao todo foram confeccionados 11 corpos de prova de argila pura e 11 corpos de prova de cada composição perfazendo um total de 198 corpos de prova submetidos à secagem e queima.

A Figura 3-2 mostra esses corpos de prova após serem confeccionados.



Figura 3-2 - Corpos de prova já confeccionados.

3.4. Ensaio para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova

Após a secagem foram realizados os seguintes ensaios:

- Tensão de ruptura à flexão (TRF)
- Contração linear após a secagem (CLS)

Após a queima foram realizados os seguintes ensaios:

- Contração linear após a queima (CLQ)
- Contração linear total (CLT)
- Tensão de ruptura à flexão (TRF)
- Absorção de água (AA)
- Porosidade aparente (PA)
- Massa específica aparente (MEA)

3.4.1. Após secagem

Foram realizados ensaios de determinação da tensão de ruptura a flexão (TRF), determinação de umidade de prensagem, e da contração linear após a secagem (CLS). Nestes ensaios foram utilizados apenas os corpos de prova que saíram da estufa de secagem, ou seja, 11 corpos de prova de argila pura e mais 11 corpos de prova de cada mistura, totalizando 66 corpos de prova.

Ensaio de flexão – determinação da tensão de ruptura a flexão

O dispositivo que realizou o ensaio para determinação da TRF é mostrado na Figura 3-3. Trata-se de um dispositivo que determina a TRF em três pontos. A mangueira joga água no recipiente que está fixo em suporte que é apoiado na amostra. O corpo de prova foi quebrado devido ao peso do conjunto água + recipiente convertido em tensão de ruptura.



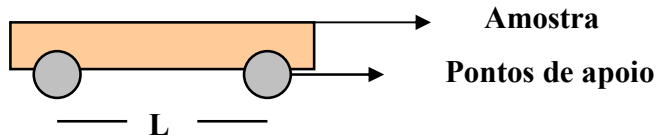
Figura 3-3 - Dispositivo para realização do ensaio para determinação da TRF.

Para determinar o valor da tensão de ruptura da amostra utiliza-se a seguinte equação^[25]:

$$TRF = \frac{P \cdot L \cdot 15}{b \cdot x \cdot h^2} \quad (3.1)$$

P = Peso do conjunto água + recipiente que provocou a ruptura da amostra.

L = Distância entre os pontos de apoio do dispositivo



b = Largura da amostra no ponto da fratura

h = Altura da amostra no ponto da fratura

TRF = Tensão de ruptura à flexão

Determinação de umidade de prensagem

A umidade de prensagem foi calculada utilizando os valores medidos de massa úmida (m_u) e massa após a secagem (m_s) de cada amostra, realizadas durante o ensaio de secagem. O valor da umidade de prensagem foi obtido através da equação^[25]:

$$U = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Determinação da contração linear após a secagem (CLS)

Com as medidas do comprimento da amostra antes da secagem (L_u) e do comprimento da amostra após a secagem (L_s), realizada durante o ensaio de secagem calcula-se o valor da contração linear à secagem (CLS) através da seguinte equação^[25]:

$$CLS = \left(\frac{L_u - L_s}{L_s} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

3.4.2. Após a queima

Após a queima cada corpo de prova foi submetido aos ensaios de determinação da tensão de ruptura à flexão, de absorção de água, medida da massa imersa do corpo de prova, medida da massa úmida do corpo de prova e da massa seca. Através da medida da massa seca do corpo de prova serão realizados os seguintes cálculos^[25]:

- Tensão de ruptura à flexão (TRF)
- Porcentagem da absorção de água(AA%),
- Porcentagem da porosidade aparente(PA%),

- Massa específica aparente(MEA),
- Porcentagem da contração linear após a queima(CLQ),
- Porcentagem da contração linear total(CLT),
- Porcentagem da variação da massa após a queima, ou seja, perda ao fogo(PF).

Ensaio de flexão – determinação da tensão de ruptura à flexão

Após a queima, em cada temperatura, cada amostra foi primeiramente submetida a este ensaio. O dispositivo que realizou este ensaio está mostrado na Figura 3-3. Trata-se de um dispositivo que determina a TRF em três pontos.

Ensaio de absorção de água

Este ensaio é de grande importância para a obtenção das medidas de massa imersa (m_i) e massa úmida (m_u), após a queima de cada corpo de prova.

Para realizar este ensaio colocou-se em um recipiente todas as metades das amostras dos corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de determinação de tensão de ruptura à flexão (TRF), ou seja, todas as composições de lodo de ETA e argila mais as amostras que contém apenas argila pura. Adicionou-se água ao recipiente e manteve-a em ebulição durante 3 horas, após este tempo, interrompeu-se o aquecimento, retirou-se todas as amostras do recipiente transferindo-as a outro recipiente, contendo água à temperatura ambiente.

Medida da massa imersa do corpo de prova (m_i)

Cada metade do corpo de prova, que foi submetido ao ensaio de tensão de ruptura à flexão (TRF), teve sua massa medida quando imerso em água. O tempo que a amostra ficou na água em ebulição foi suficiente para que a água penetre nos poros abertos formados durante a queima dos corpos de prova. Os dados desta medida são importantes para a determinação da porcentagem da porosidade aparente do corpo de prova^[25].

Medida da massa úmida do corpo de prova (m_u)

Após a realização da medida da massa imersa (m_i) de cada metade de corpo de prova, novamente mediu-se a massa de cada corpo de prova fora da água. Para tanto, retirou-se o corpo

de prova do recipiente com água enxugando-o com papel absorvente. Desta forma mediu-se a massa úmida de cada metade de corpo de prova.

Os dados desta medida, além de mostrar a variação da massa devido a absorção de água pelos poros abertos formados durante a queima dos corpos de prova, também são importantes para a determinação da porcentagem de sua porosidade aparente^[25].

Medida da massa seca do corpo de prova (m_s)

Após as medidas de massa imersa (m_i) e massa úmida (m_u) de cada metade de corpo de prova, todos foram levados para a estufa de secagem. A secagem também ocorreu a uma temperatura de 110°C durante 24 horas.

Depois do processo de secagem, todas as metades dos corpos de prova tiveram novamente sua massa medida. Essa massa é a massa seca (m_s) de cada amostra.

Esta massa seca determinada será um dado importante de todas as equações utilizadas para determinar AA%, PA%, MEA, CLQ, CLT, e PF.

Cálculo de (AA%), (PA%), (MEA), (CLQ), (CLT) e (PF)

Os valores da absorção de água (AA%), da porosidade aparente (PA%), da massa específica aparente (MEA), da contração linear após queima (CLQ), da contração linear total (CLT) e da variação da massa devido à queima (PF), foram determinados utilizando as equações a seguir:

Valor da absorção de água (AA%) das amostras

A equação utilizada foi^[25]:

$$AA = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

m_u = Massa úmida da amostra, obtida após a queima do corpo de prova,

m_s = Massa seca da amostra, também obtida após a queima do corpo de prova,

Porosidade aparente da amostra (PA%)

A equação utilizada foi^[25]:

$$PA = \left(\frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

m_u = Massa úmida da amostra,

m_s = Massa seca da amostra

m_i = Massa imersa da amostra

Massa específica aparente da amostra (MEA)

A equação utilizada foi^[25]:

$$MEA = \left(\frac{m_s}{m_u - m_i} \right) \quad (3.6)$$

Contração linear após queima (CLQ)

A equação utilizada foi^[25]:

$$CLQ = \left(\frac{l_s - l_q}{l_s} \right) \times 100 \quad (3.7)$$

l_s = Comprimento da amostra após a secagem na estufa.

l_q = Comprimento da amostra após a queima.

Contração linear total (CLT)

A equação utilizada foi^[25]:

$$CLT = \left(\frac{l_u - l_q}{l_u} \right) \times 100 \quad (3.8)$$

l_u = Comprimento da amostras antes de passar pelo processo de secagem.

l_q = Comprimento da amostra após a queima.

Variação da massa devido à queima (PF)

A equação utilizada foi^[25]:

$$PF (\%) = \left(\frac{m_{se} - m_{sf}}{m_{se}} \right) \times 100 \quad (3.9)$$

m_{se} = Massa da amostra seca em estufa

m_{sf} = Massa da amostra após a queima

Os dados de todas as equações citadas nesta seção foram utilizados para preencher as Tabela 5-1 até Tabela 5-42 que encontram-se registradas nos Anexos.

Microscopia Ótica

As análises de Microscopia Ótica foram realizadas no IPT. Estas análises foram realizadas nos corpos de prova após queima, observando a superfície destes corpos e a região de fratura, originária após ensaio de ruptura à flexão. Os aumentos utilizados nesta análise de microscopia foram de doze e quarenta vezes.

4. Resultados e Discussão

As misturas de argila e lodo ocorreram em variadas concentrações de argila e lodo e também argila com lodo calcinado (1000°C durante 3 horas) e argila com lodo moído com dimensões granulométrica de 0,075mm(#200 – ABNT). A Tabela 4-1 mostra as concentrações de lodo nas misturas com argila.

Tabela 4-1 - Concentrações de lodo nas misturas com argila.

Mistura	Argila(%)	Lodo(%)
C ₀	100	0
C ₂	98	2
C ₅	95	5 – Lodo bruto
C _{5M}	95	5 – Lodo moído – 200#
C _{5c}	95	5 – Lodo calcinado – 1000°C/3h
C ₁₀	90	10

4.1. Caracterização do Lodo da ETA

A caracterização do lodo foi realizada através de ensaio granulométrico, análise química por fluorescência de raios-X, difração de raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.

4.1.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento por via seca, as peneiras possuem aberturas de 0,245mm(#40 ABNT), 0,250mm(#60 ABNT), 0,180mm(#80 ABNT), 0,150mm(#100 ABNT), 0,075mm(#200 ABNT), 0,045mm(#325 ABNT), conforme está mostrado na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Resultado da análise granulométrica do lodo de ETA.

Peneira	Abertura	Peneira	Pen. + Am.	Retido	Passante
ABNT	(mm)	(g)	(g)	(%)	(%)
# 40	0,425	409,13	417,56	8,4	91,6
# 60	0,250	381,78	416,20	34,4	57,2
# 80	0,180	384,40	406,00	21,6	35,6
# 100	0,150	394,53	400,78	6,3	29,3
# 200	0,075	394,60	401,84	7,2	22,1
# 325	0,045	365,86	375,75	9,9	12,2
Fundo	< 0,045	361,72	373,91	12,2	0
				100	

Material: Lodo de ETA - Natureza do trabalho: Análise granulométrica por peneiramento (via seca)

A classificação granulométrica está mostrada na Figura 4-1 que mostra a porcentagem de lodo passante nas peneiras, de acordo com as aberturas. De acordo com a figura verifica-se que as granulometrias do lodo estão distribuídas em torno da abertura de peneira de 0,425 à 0,18mm.

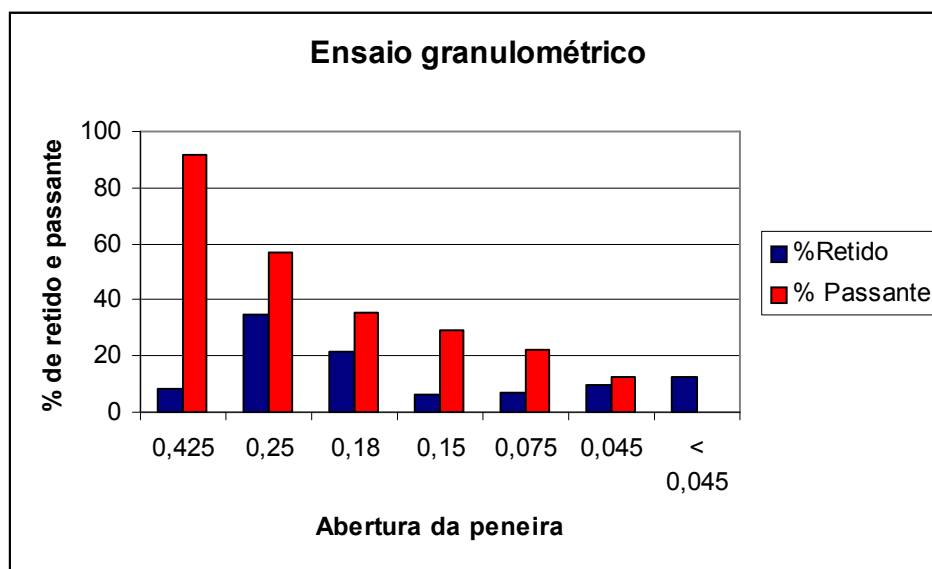


Figura 4-1 - Porcentagem de lodo retido e passante nas peneiras, de acordo com as aberturas

4.1.2. Análise Química por Fluorescência de Raios-X – FRX

Foram realizadas análises químicas utilizando a técnica de fluorescência de raios-X em amostras de lodo em estado bruto e lodo calcinado a uma temperatura de 1000°C durante 3 horas. Os resultados das análises químicas estão mostrados na Tabela 4-3 e na Tabela 4-4

O resultado mostrado na Tabela 4-3, referida ao lodo bruto moído, mostra um destaque para o óxido de ferro com 72,99%, isto devido ao uso de cloreto de ferro como elemento coagulante na fase de tratamento da água na ETA.

Tabela 4-3 - Análise química por fluorescência de raios-X da amostra de lodo da ETA - Bruto-moído

Componentes químicos	Porcentagem na amostra
Fe ₂ O ₃	72,990
SiO ₂	12,552
Al ₂ O ₃	8,567
CaO	5,230
MnO	0,539
CuO	0,121

Tabela 4-4 - Análise química por fluorescência de raios-X da amostra de lodo da ETA lodo calcinado

Componentes químicos	Porcentagem na amostra
Fe ₂ O ₃	64,183
SiO ₂	17,617
Al ₂ O ₃	11,736
CaO	5,890
MnO	0,509
CuO	0,066

Observa-se nas duas tabelas a predominância de óxido de ferro, sendo que ocorreu uma perda deste elemento químico em relação ao lodo bruto, de acordo com as Tabela 4-3 e Tabela 4-4. Esta diferença, que é de 10%, não é devido a volatilidade do ferro pois a calcinação foi realizada na temperatura de 1000°C durante 3 horas, e nestas condições o ferro encontra-se na fase sólida.

4.1.3. Análises por difração de raios-X

A Figura 4-2 e a Figura 4-3 mostram o espectro da difração de raios-X do lodo de ETA bruto e calcinado, respectivamente. A identificação das fases foi fornecida pelo laboratório de análise química do ICEB – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, da Universidade Federal de Ouro Preto. As fases identificadas do lodo de ETA bruto e calcinado encontram-se discriminadas na Tabela 4-5 e na Tabela 4-6, respectivamente.

Tabela 4-5 - Fases identificadas no espectro de DRX do lodo de ETA bruto

Identificação	Fase	Nome
X	Al(OH)_3	Gipsita
K	FeO(OH)	Goetita
Y	Fe_2O_3	Hematita
Z	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$	Alumínio Hidratado
W	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Caulinita

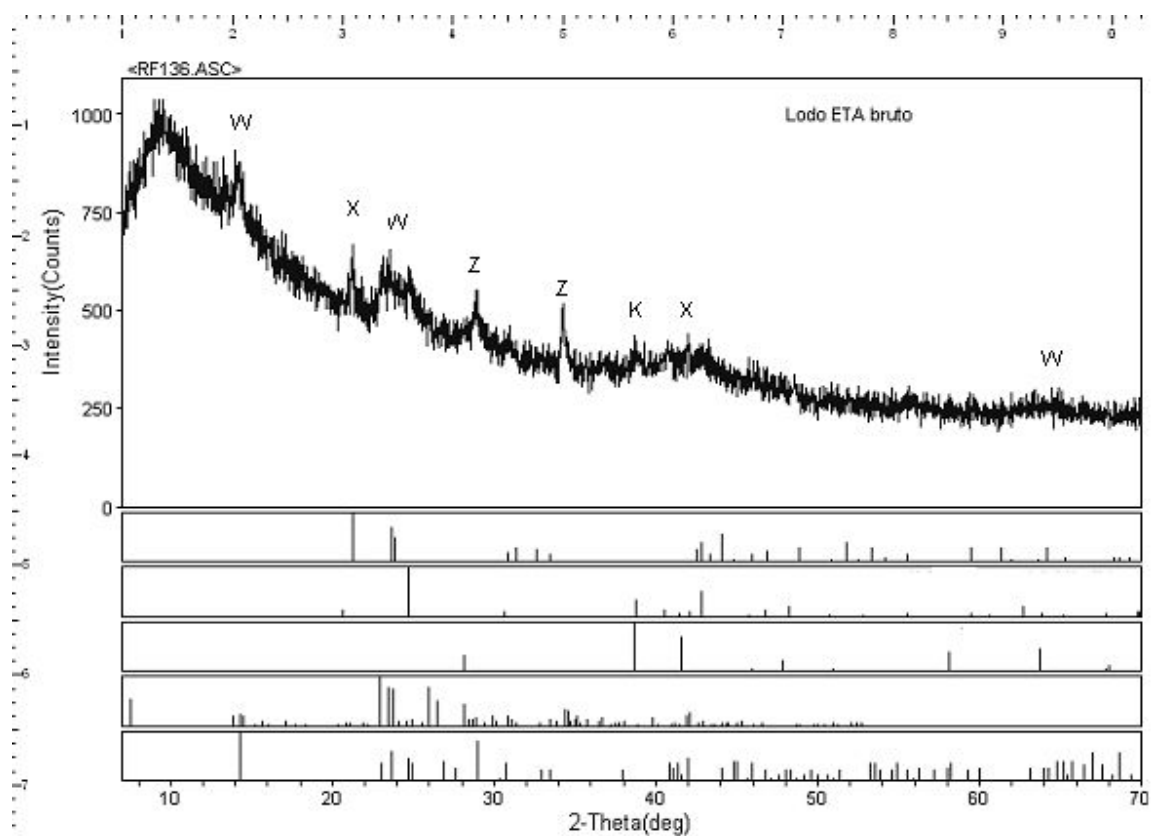


Figura 4-2 - Espectro de DRX de lodo bruto.

Tabela 4-6 - Fases identificadas no espectro de DRX do lodo de ETA calcinado.

Identificação	Fase	Nome
A	FeFe_2O_4	Magnetita
B	Fe_2O_3	Hematita
C	Fe_2O_3	Magnetita

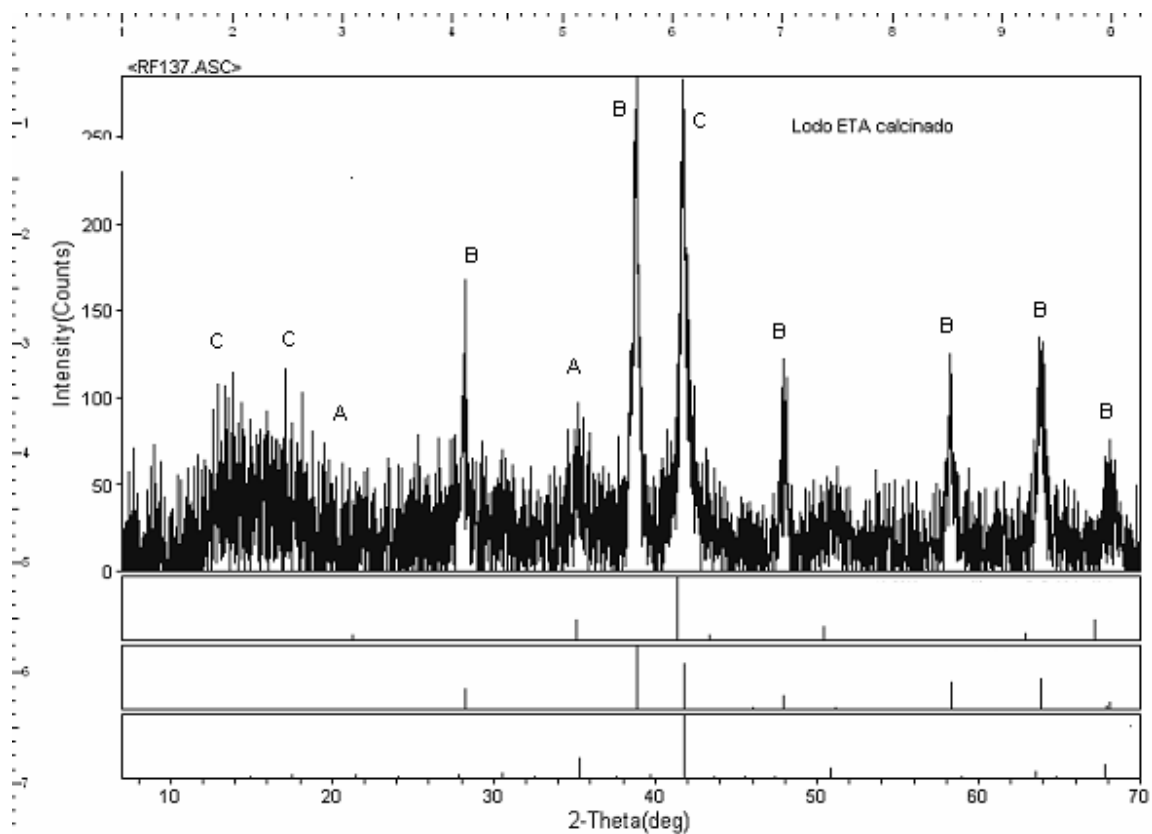


Figura 4-3 - Espectro de DRX de lodo calcinado.

A Figura 4-3 apresenta algumas fases que puderam ser identificadas sendo apontadas na Tabela 4-6, ou seja: (A) Magnetita (FeFe_2O_4), (B) Hematita(Fe_2O_3) e (C) Magnetita(Fe_2O_3). A ausência de compostos com Si e Al pode indicar formação de fase vítrea entre Si, Al e Fe ou ainda a formação de fases cristalinas à base de Fe de alto ponto de fusão.

Ao contrario do que se esperava, os ensaios por difração de raios-X realizados nas amostras de lodo bruto e calcinado, não foram efetivos para indicar as eventuais reações durante o processo térmico de lodo calcinado. Entretanto, o espectro do lodo calcinado ficou melhor definido que o apresentado para o lodo bruto, pois neste caso o material bruto é de baixa cristalinidade mostrando dificuldades na identificação das fases e as substancias indicadas são apenas sugestões.

4.1.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

Foram observadas em Microscópio Eletrônico de Varredura amostras do lodo de ETA usado neste trabalho em dois estados: após secagem e calcinado a 1000°C. Os resultados apresentados neste item são essencialmente uma representação típica do que foi observado em diversas partículas.

Lodo bruto após secagem

A Figura 4-4 mostra a morfologia do lodo de ETA após a secagem, observa-se que o material é essencialmente constituído de partículas facetadas, com faces aproximadamente planas. As partículas apresentam estreita faixa de tamanhos de partícula.

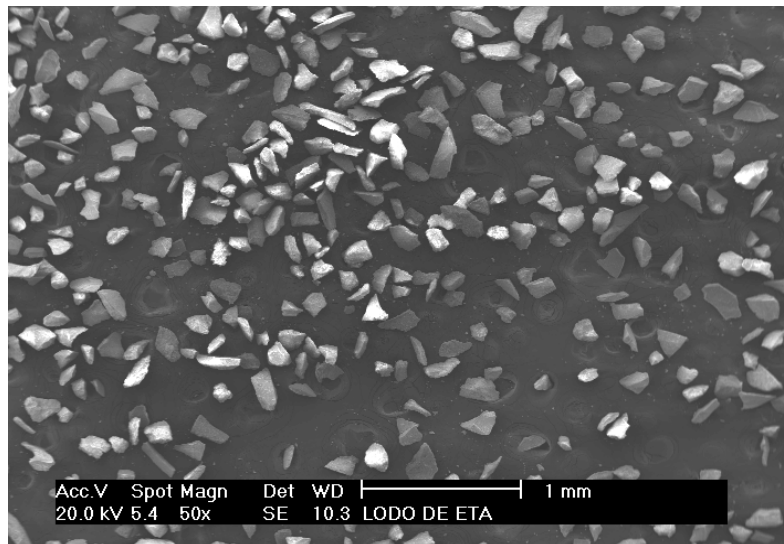


Figura 4-4 – Imagem de elétrons secundários. Aspecto geral da morfologia das partículas do lodo de ETA após a secagem. Verifica-se que o material é essencialmente constituído de partículas facetadas, com faces aproximadamente planas. As partículas apresentam estreita faixa de tamanhos de partícula.

O aspecto de uma partícula típica do lodo de ETA após a secagem pode ser observado na Figura 4-5. Nota-se que sobre as faces das partículas existe material aparentemente aderido à superfície. Foram feitas análises de micro-regiões no material aderido e na face da partícula, apresentados na Figura 4-6. Ambos espectros de EDS são bastante semelhantes, apresentando os mesmos elementos: O, Al, Si, Ca e Fe. Portanto, a diferença observada é devido à efeito de relevo, talvez partículas finas de Ti, e não de composição.

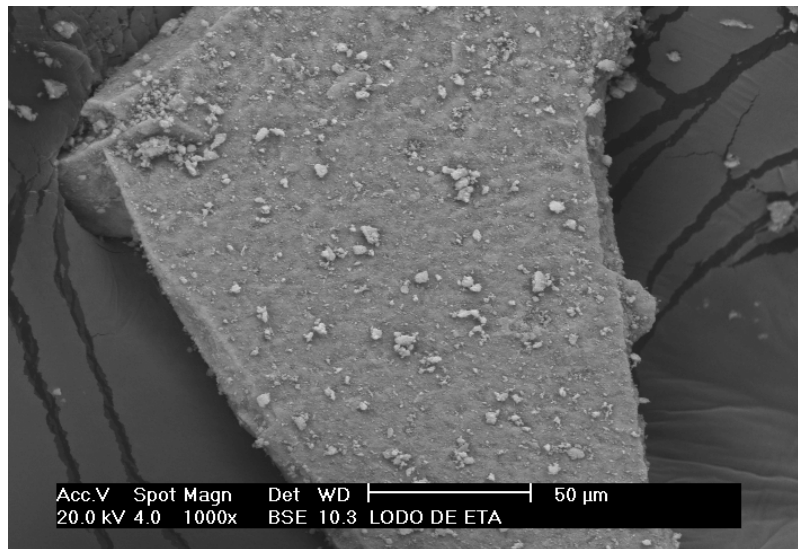


Figura 4-5 – Imagem de elétrons secundários. Aspecto de uma partícula típica do lodo de ETA após a secagem.

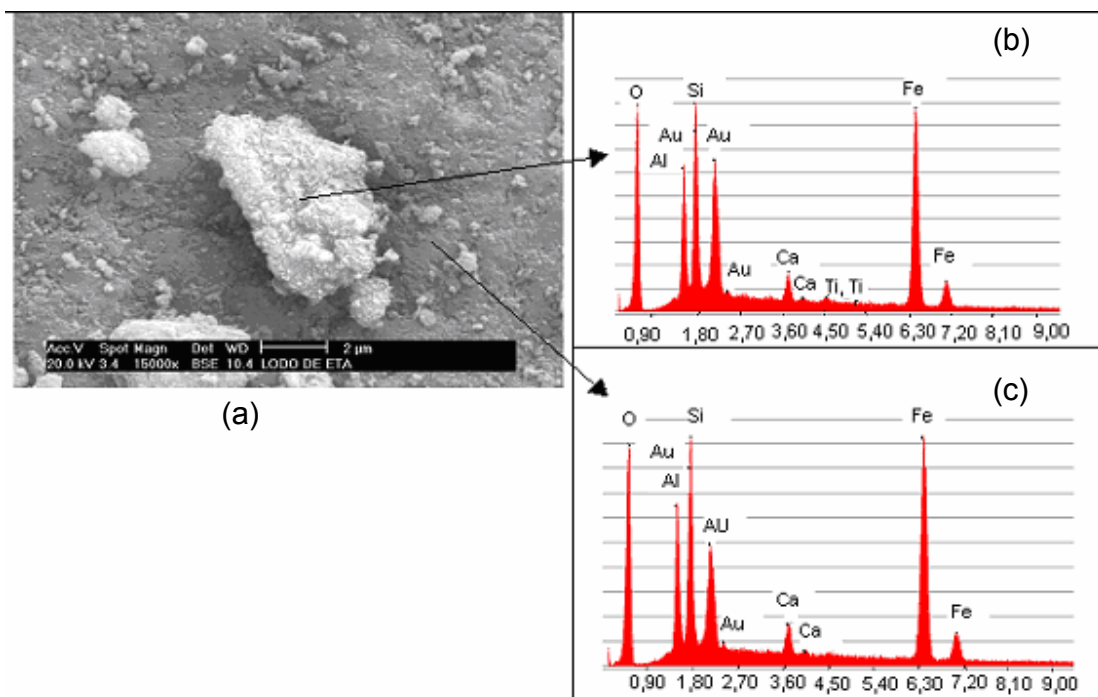


Figura 4-6 – (a) Imagem de elétrons secundários. Detalhe da partícula da Figura 4-5, ou seja, uma partícula menor em cima de um fundo heterogêneo escuro. (b) Espectro de EDS do material aderido à superfície da partícula observando o surgimento de Ti. (c) Espectro de EDS da base da partícula. Os dois espectros de EDS são bastante semelhantes, tendo sido identificados os seguintes elementos: O, Al, Ca, Si e Fe.

A Figura 4-7 mostra um detalhe de outra partícula de lodo de ETA bruto seco e a análise de micro-regiões de três regiões distintas. Como na Figura 4-6(a), observa-se a presença de partículas menores de diversos tamanhos sobre a partícula facetada de lodo. Nas análises de micro-regiões de duas partículas menores (Figura 4-7(b) e (c)), foram identificados os mesmos elementos: O, Al, Ca, Si e Fe. O que indica que as partículas têm composição semelhante. O espectro de EDS da base da partícula de lodo (Figura 4-7 (d)), apresentou um pico maior de Fe, mas essencialmente os mesmos elementos foram identificados. Observa-se a presença das impurezas K, Ti e Mg.

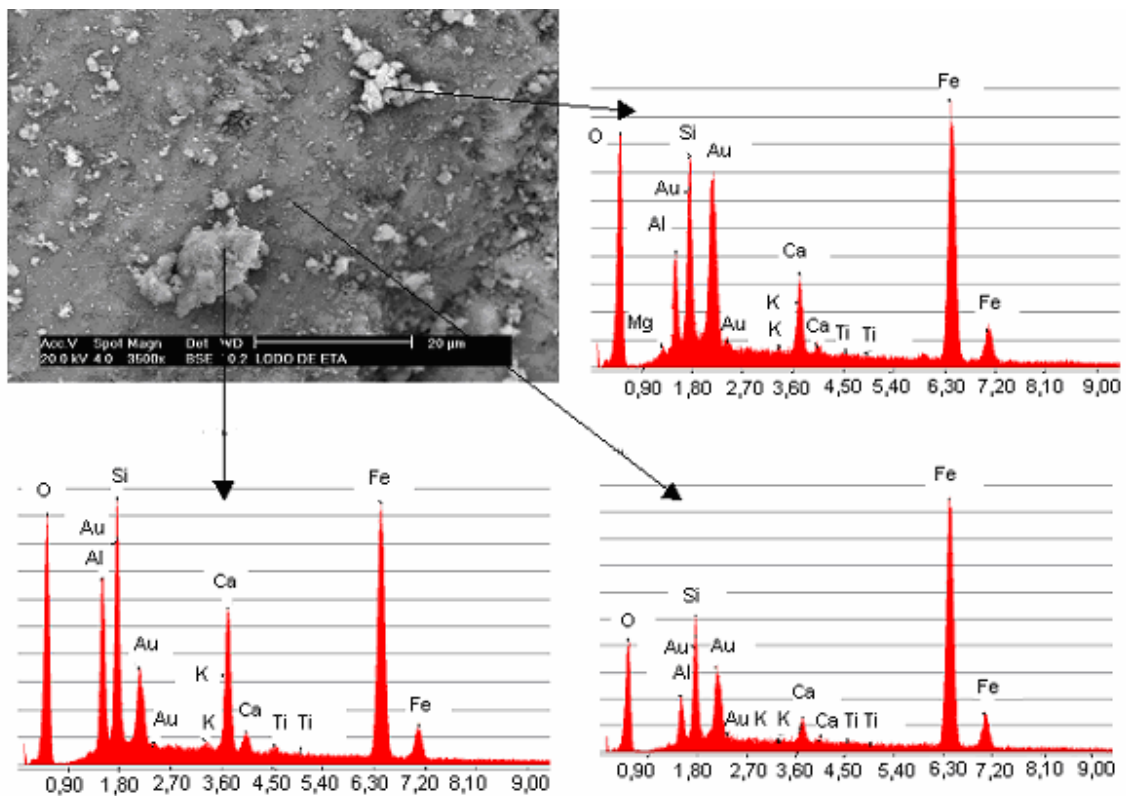


Figura 4-7 – (a) Imagem de elétrons secundários. Detalhe da partícula da Figura 4-5, ou seja, uma partícula menor em cima de um fundo heterogêneo escuro. (b) Espectro de EDS de uma partícula aderida. (c) Espectro de EDS de uma partícula aderida. (d) Espectro de EDS da base da partícula.

Lodo calcinado

A Figura 4-8 mostra que as partículas de lodo de ETA calcinado têm a mesma morfologia faceta do lodo de ETA seco. Todavia a distribuição de tamanho de partícula não é tão homogênea, notam-se partículas de tamanhos bastante distintos. Além disso, a amostra possui partículas de até cerca de 0,5mm, isso indica que durante a calcinação ocorreu a sinterização de partículas do lodo.

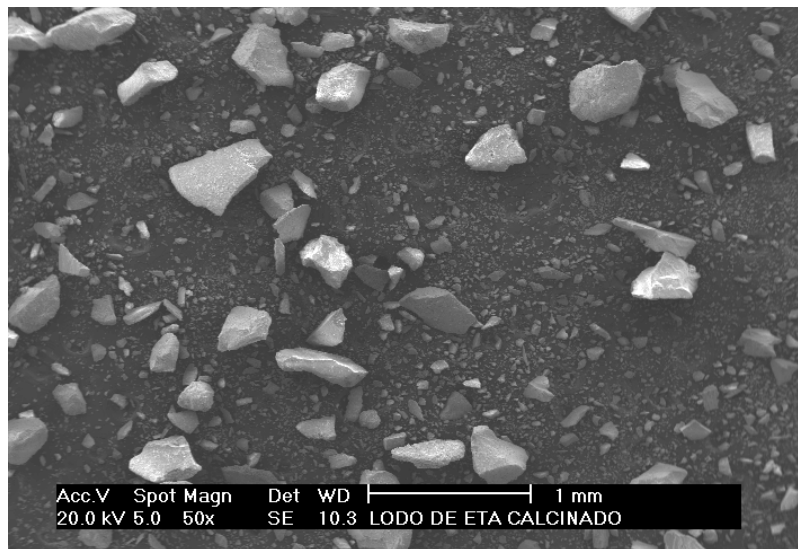


Figura 4-8 – Imagem de elétrons secundários. Aspecto geral da morfologia das partículas do lodo de ETA calcinado. Verifica-se que o material é essencialmente constituído de partículas facetadas, com faces aproximadamente planas. A distribuição do tamanho de partícula não é tão homogênea como na figura 1, notam-se partículas de tamanhos bastante distintos.

A Figura 4-9 mostra a imagem típica de uma partícula do lodo de ETA calcinado a 1000°C. Verifica-se que a morfologia destas partículas é muito semelhante à morfologia das partículas de lodo de ETA bruto seco, conforme mostra a Figura 4-5, ou seja, o material apresenta-se fragmentado com faces praticamente planas com partículas dispersas na superfície.

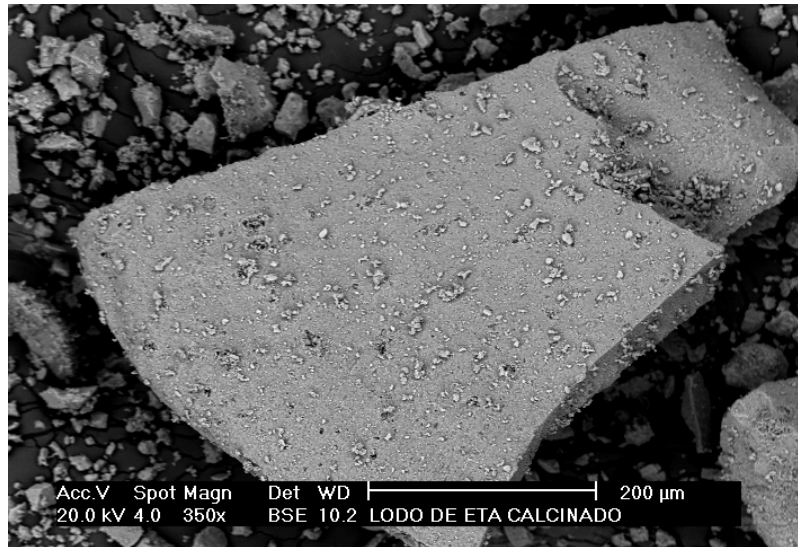


Figura 4-9 – Imagem de elétrons secundários. Partícula típica do lodo calcinado. Observa-se a presença de material sobre a superfície da partícula.

Na Figura 4-10 (a) é apresentado um detalhe da Figura 4-9. Foram analisadas por EDS duas partículas (Figura 4-10(b), (c) e (d)) e o substrato (Figura 4-10 (e)). Os espectros de EDS mostram que tanto as partículas quanto o substrato possuem os mesmos elementos químicos. Apesar da análise de EDS ter sido qualitativa e haver sempre a possibilidade de estar analisando alguma fase imediatamente abaixo da superfície, observa-se que no substrato o pico referente ao Fe tem maior intensidade que os das partículas, o que indica que o substrato é mais rico em óxido de ferro.

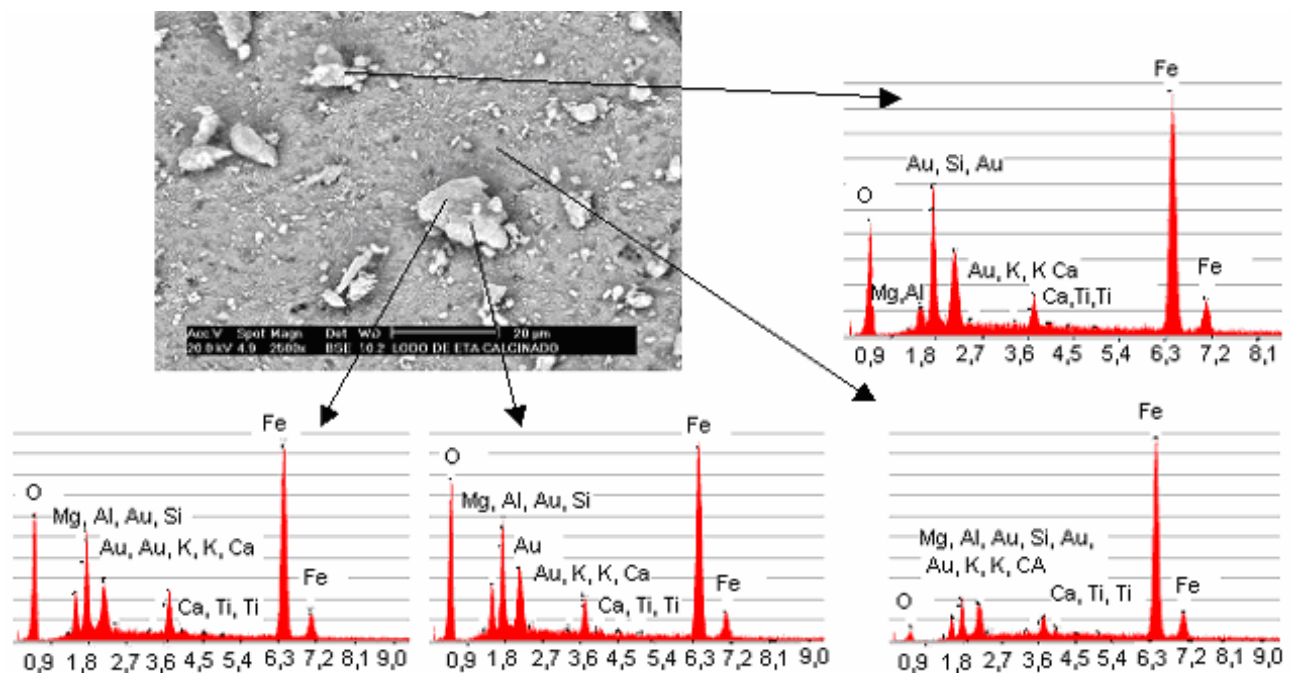


Figura 4-10 – Imagem de elétrons secundários. Detalhe da partícula mostrada na Figura 4-9

4.2. Ensaios para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova

Os resultados dos ensaios realizados após a secagem e a queima dos corpos de prova foram tabelados, como para cada ensaio foi utilizado um conjunto de 11 corpos de prova, os resultados apresentados neste capítulo são a média dos valores obtidos para cada ensaio. Os resultados de todos os ensaios e todos os corpos de prova estão apresentados nos Anexos.

Após a secagem foram realizados os seguintes ensaios:

- Tensão de ruptura à flexão (TRF)
- Contração linear após a secagem (CLS)

Após a queima foram realizados os seguintes ensaios:

- Contração linear após a queima (CLQ)
- Contração linear total (CLT)
- Tensão de ruptura à flexão (TRF)
- Absorção de água (AA)

- Porosidade aparente(PA)
- Massa específica aparente(MEA)

4.2.1. Ensaios após secagem

Tensão de ruptura à flexão (TRF)

A Figura 4-11 mostra a variação dos valores de tensão de ruptura à flexão (TRF) em função da concentração de lodo de ETA na argila. Foram utilizadas as misturas com 0, 2, 5 e 10% de adição de lodo de ETA bruto à argila. Nota-se que a TRF diminui com o acréscimo da concentração de lodo, entretanto todos os resultados estão dentro dos valores desejáveis para a fabricação de cerâmicas, entre 0,5 e 7,0MPa^[50].

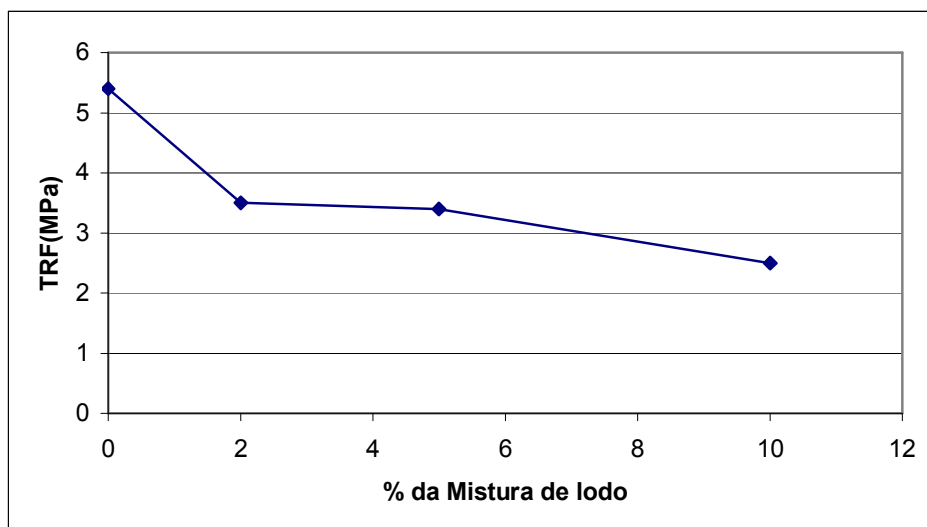


Figura 4-11 - Variação da TRF em função da adição de lodo na mistura de argila. A figura mostra que o aumento da concentração de lodo diminui os valores da TRF dos corpos de prova após secagem.

A Tabela 4-7 mostra os valores da tensão de ruptura à flexão (TRF) dos corpos de prova confeccionados apenas com argila e os confeccionados com mistura de 5% de lodo calcinado, lodo bruto e lodo moído. Verifica-se que os valores da TRF diminuem com a adição de lodo, como mostrado na Figura 4-11. A forma de adição do lodo influenciou pouco nos valores de TRF, sendo que o lodo calcinado foi o que proporcionou menor diminuição na TRF.

Tabela 4-7 - Tensão de ruptura à flexão (TRF) em função da concentração de lodo na massa argilosa

Mistura	TRF(MPa)
C ₀	5,4 ± 0,5
C ₅	3,4 ± 0,3
C _{5C}	4,2 ± 0,3
C _{5M}	3,1 ± 0,2

As modificações observadas indicam que a adição dos resíduos torna os corpos de prova secos menos resistentes, exigindo cuidado de manuseio.

Contração linear após secagem (CLS)

A Figura 4-12 mostra que o valor da CLS dos corpos de prova confeccionados apenas com argila sem nenhuma mistura de lodo é um pouco maior que os valores para os corpos de prova que foram adicionados lodo á argila.

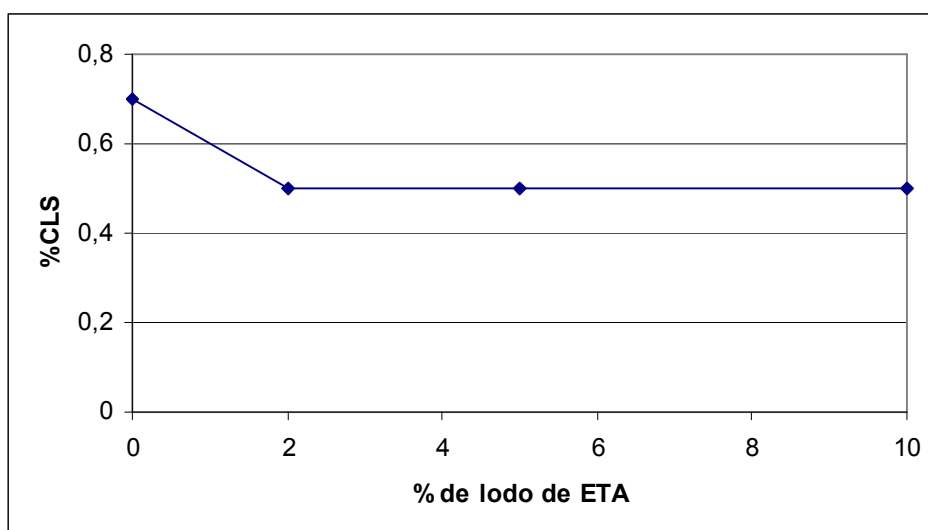


Figura 4-12 - CLS em função da adição de lodo na mistura da massa argilosa. A figura mostra que a adição de lodo de ETA á argila diminui os valores da CLS dos corpos de prova após secagem.

A Tabela 4-8 mostra os valores da contração linear após secagem (CLS) dos corpos de prova confeccionados apenas com argila com os confeccionados com mistura de 5% de lodo calcinado, lodo bruto e lodo moído. Pode-se observar que o valor da CLS diminui com a adição de lodo, como verificado na Figura 4-12. Na porcentagem de 5%, a Tabela 4-8 mostra que a

contração linear após a secagem não apresentou variações em função da forma de adição do lodo (bruto, moído ou calcinado).

Tabela 4-8 - Contração linear após a secagem em função da concentração de lodo na massa argilosa após secagem.

Conc(%)	CLS(%)
C ₀	0,7 □ 0,0
C ₅	0,5 □ 0,0
C _{5C}	0,5 □ 0,0
C _{5M}	0,5 □ 0,0

Os resultados mostram que a adição de lodo de ETA não interferiu significativamente nos valores da contração linear após secagem (CLS). Isto indica que defeitos relativos à secagem como trincas não são esperados^[50]. Observa-se que os valores da CLS estão abaixo de 7,96% que são os recomendados para a fabricação de cerâmica vermelha^[50].

4.2.2. Ensaios após queima

Contração linear após a queima - CLQ

A Figura 4-13 mostra a variação da contração linear após a queima em função da concentração de lodo de ETA na argila, de 0 a 10%, para as três temperaturas de queima estudadas, 950, 1000 e 1050°C. Observa-se que para as temperaturas de queima de 950 e 1000°C a adição de lodo de ETA à argila não influenciou significativamente nos valores de CLQ. Já para a temperatura de queima de 1050°C nota-se que a adição de lodo aumenta a CLQ.

A contração linear após a queima é um indicativo da propagação do processo de sinterização ocorrido com o material durante a queima. A presença de Fe₂O₃ e CaO favorece o processo de sinterização. A qualidade de um bloco mede-se através do grau de contração devido a queima. Normalmente uma boa qualidade de bloco cerâmico possui contração abaixo de 8%(na faixa de 1,19 a 7,33%)^[29].

As amostras sinterizadas a 1050°C que continham lodo de ETA apresentaram valores de CLQ acima de 8%, ou seja, maiores do que os indicados para a fabricação de cerâmicas.

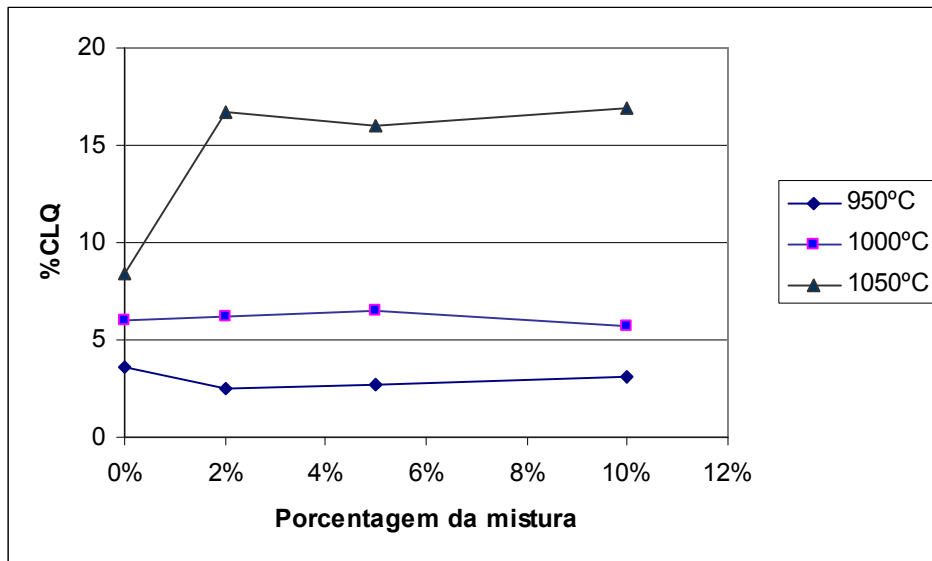


Figura 4-13 - Variação da CLQ em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.

A Figura 4-14 mostra a variação dos valores de CLQ em função da temperatura de sinterização para diferentes formas de adição do lodo de ETA (bruto, moído e calcinado). Esta figura evidencia a influencia da forma com que o lodo é adicionado á argila nos valores de CLQ para as três temperaturas de sinterização. Nota-se que todos os tipos de adição apresentaram resultados semelhantes, sendo que a temperatura de sinterização apresentou maior influência nos valores de CLQ. Quanto maior a temperatura, maior a CLQ.

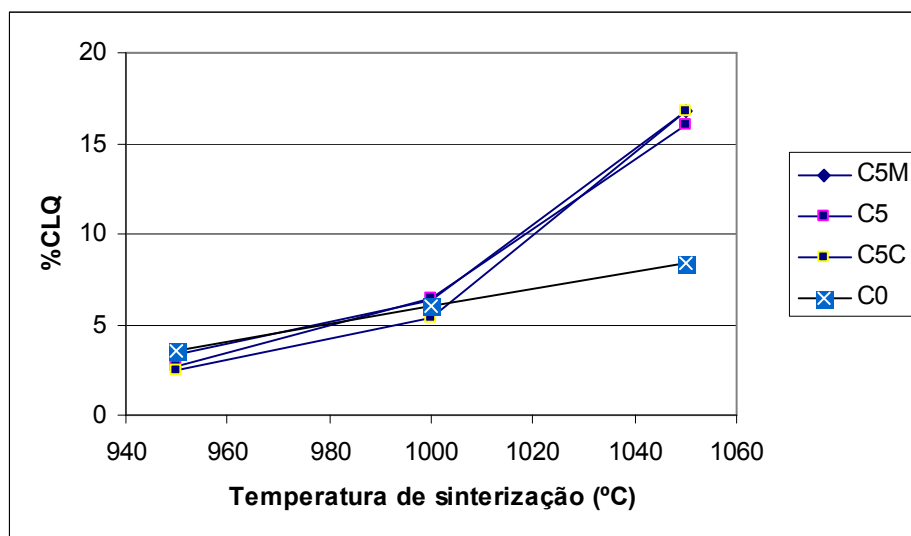


Figura 4-14 - Variação da CLQ em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.

A temperatura de sinterização altera significativamente a contração linear como nos mostra as figuras. Quanto maior for a temperatura maior será a retração e a partir de 1000°C o efeito fica mais evidente pois, pode ocorrer um maior grau de vitrificação (formação da fase vítrea, que contribui para maior densificação dos corpos de prova)^[29].

Contração linear total – CLT

A Figura 4-15 mostra a variação da CLT, para todas as misturas de lodo e argila, nas três temperaturas de sinterização. A figura mostra o aumento da CLT com o aumento das temperaturas de sinterização e também que os valores da CLT são maiores para os corpos de prova sem mistura, apresentando uma certa uniformidade para as diferentes concentrações de lodo na argila.

Os corpos de prova apresentam os valores da CLQ e CLT próximos até 1000°C, o que indica que a mistura de lodo não favorece a sinterização destes corpos de prova até 1000°C. A 1050°C as amostras com lodo apresentam valores significativamente maiores do que as amostras sem lodo.

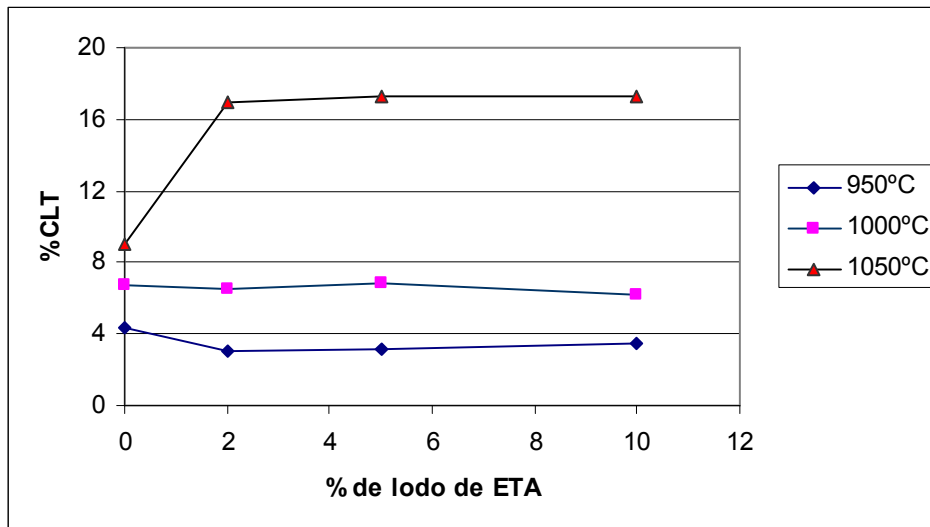


Figura 4-15 - Variação da CLT em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.

A Figura 4-16 mostra os valores da contração linear total – CLT – em função dos valores da temperatura de sinterização dos corpos de prova feitos com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}. A figura mostra que a contração linear total aumenta com o aumento da temperatura de sinterização e apresenta poucas variações com o forma na qual o lodo foi adicionado, a saber bruto, moído e calcinado. Também se observa mudança significativa a 1050°C.

Os valores da CLQ e da CLT aumentam com o acréscimo da temperatura, pois, nesta situação, temos um favorecimento da sinterização dos corpos de prova.

Os resultados CLQ e CLT indicam que a adição de lodo, independente da fração adicionada (2 a 10%) causam significativo aumento a 1050°C.

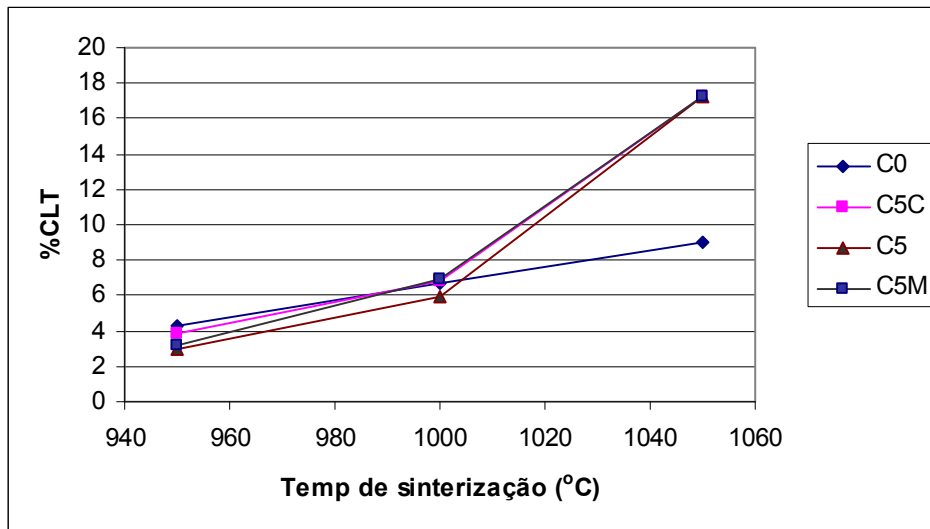


Figura 4-16 – Variação da CLT em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.

Tensão de ruptura à flexão – TRF

A tensão de ruptura à flexão (TRF) é uma medida das características coesivas do material, relacionadas ao grau de compactação e consistência. Ela pode ser utilizada também para avaliar a sinterabilidade de um material^[30]. Os valores da TRF aumentam com o acréscimo de temperatura de queima. Isto é devido ao aumento da densificação do material, ou seja a redução da porosidade.

A Figura 4-17 mostra a variação dos valores de TRF em função da concentração de lodo na argila. Observa-se que o acréscimo de lodo à argila provoca uma diminuição nos valores de TRF.

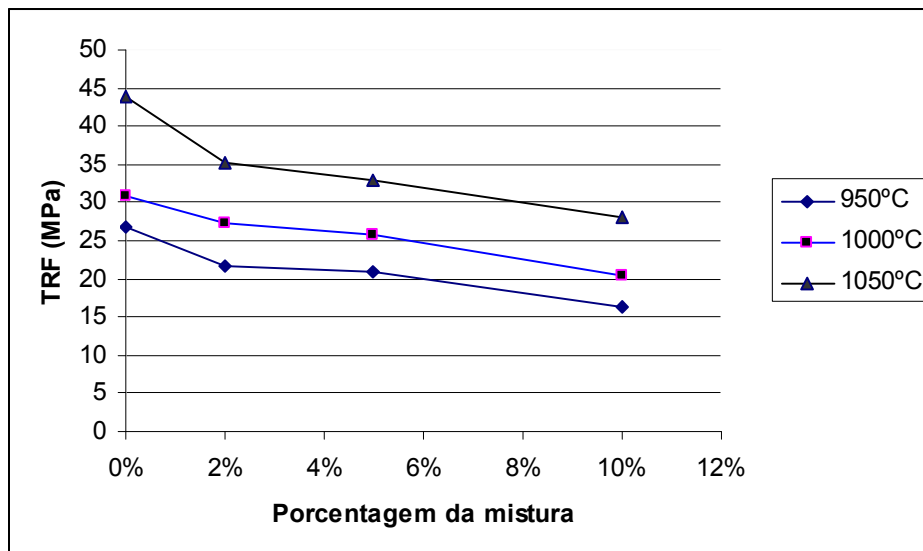


Figura 4-17 - Variação da TRF em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C_0 , C_2 , C_5 e C_{10}), nas três temperaturas de sinterização.

A Figura 4-18 mostra os valores da TRF em função da temperatura de sinterização para as diferentes formas de adição do lodo de ETA á argila (bruto, moído e calcinado). Na temperatura de 1000°C e 1050°C, os valores de TRF da mistura feita com 5% de lodo moído (C_{5M}) apresentaram valores próximos aos dos corpos de prova feitos com argila pura (C_0), o que mostra o efeito benéfico da incorporação do lodo é menor quando adicionado na forma de partículas mais finas.

A moagem pode favorecer aumento do teor de incorporação de lodo e/ou possibilitar menor perda de TRF.

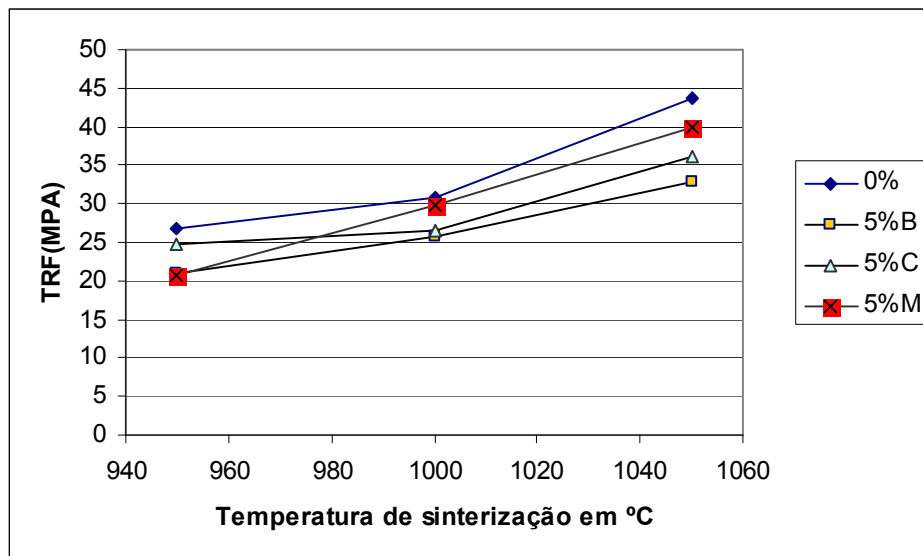


Figura 4-18 - Variação da TRF em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.

De modo geral os valores da TRF são influenciados tanto pela adição de lodo quanto pela temperatura de queima entretanto, o efeito da temperatura é mais acentuado.

Os resultados obtidos com os ensaios de Tensão de ruptura à Flexão (TRF) mostrou que a adição de lodo na matriz da argila levou a uma diminuição de seus valores da TRF mas, mesmo assim estão dentro dos valores especificados para a fabricação de produtos de Cerâmicas Vermelhas para o uso na construção civil, que são^[51]: Tijolos Maciços – TRF > 2,0MPa, Blocos Cerâmicos – TRF > 5,5MPa, Telhas – TRF > 6,5MPa.

Absorção de água (AA)

A absorção de água, assim como a contração linear após a queima, refletem o grau de sinterização alcançado pelo material durante a queima. Assim, os efeitos da presença de Fe₂O₃ e CaO na retração de queima também são percebidos na absorção de água, já que ambos estão associados à evolução da capacidade de sinterização do material.

A absorção de água é um importante fator que interfere na durabilidade do bloco cerâmico, pois está relacionada com a resistência aos ataques químicos e físicos do meio ambiente. De acordo com a Figura 4-19, a absorção de água decresce com o aumento da temperatura de sinterização. Observa-se ainda que os valores de AA estão dentro do limite observado para a produção de blocos cerâmicos que é AA < 25%^[31].

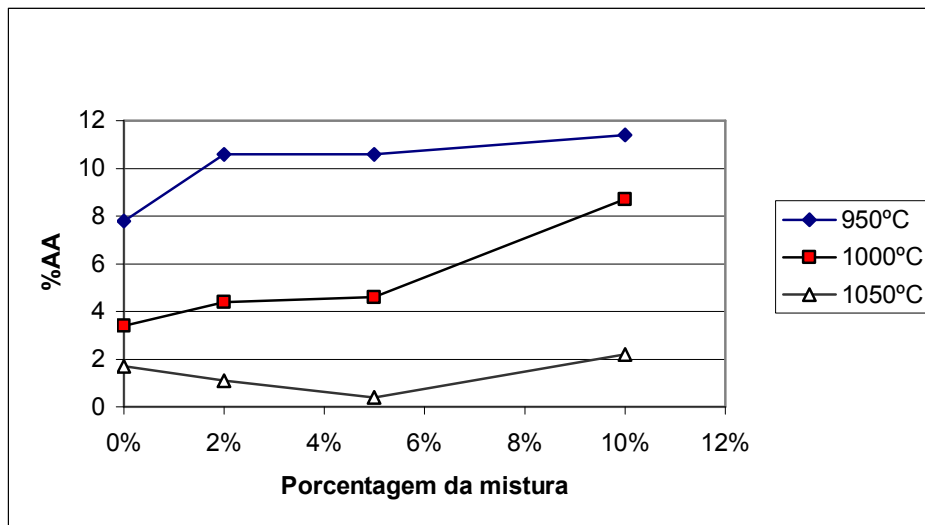


Figura 4-19 - Variação da absorção de água (AA) em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.

A Figura 4-20 mostra a variação da absorção de água em função da temperatura de sinterização para as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}. As diferentes formas de adição de lodo não provocaram tanta influência nos valores de AA quanto o aumento de temperatura, como evidenciado pela Figura 4-20.

A AA é ~3% maior nos corpos com lodo quando sinterizados a 950°C independente do teor de lodo, em relação à argila sem lodo (~8%). A 1000°C as amostras com 2% e 5% apresentam AA ~1% maior que a amostra sem lodo (~3,5%), enquanto a amostra com 10% apresenta valor próximo. Este resultado está de acordo com os resultados de CLQ e CLT, mostrando retração significativa dos corpos com lodo a 1050°C.

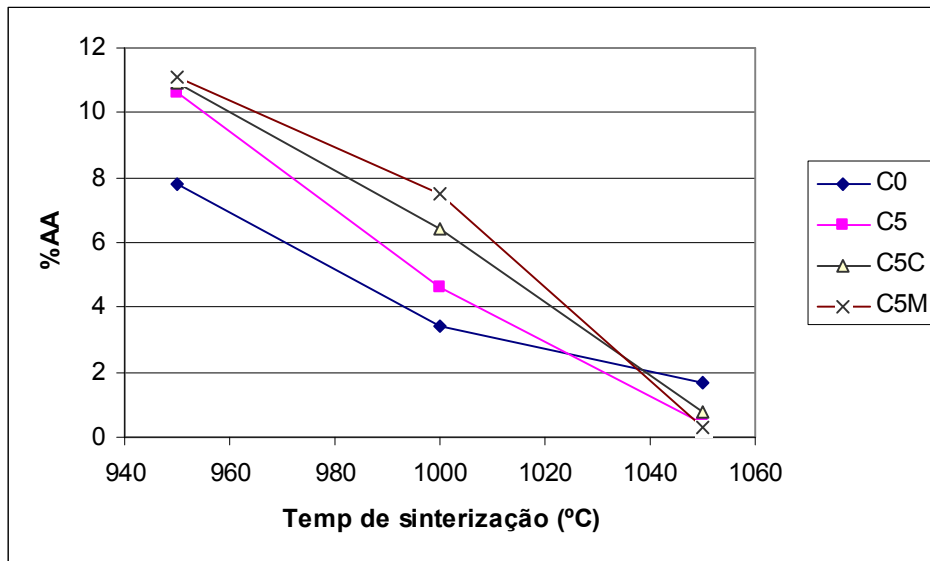


Figura 4-20 - Variação da AA em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.

Os dados obtidos com os ensaios de Absorção de Água realizados com os corpos de prova são menores que 25%, estando dentro do limite observado para a produção de blocos cerâmicos^[51].

Porosidade Aparente(PA)

A porosidade aparente também interfere na durabilidade do bloco, pois também está relacionada com a resistência aos ataques químicos e físicos do meio ambiente.

A Figura 4-21 mostra a %PA em função da concentração de lodo na argila para as três temperaturas de sinterização estudadas (950, 1000 e 1050°C). Observa-se que quanto maior a temperatura de sinterização menor a porosidade aparente. Este comportamento está de acordo com o decréscimo dos valores de AA mostrados na Figura 4-19, uma vez que a diminuição dos valores de AA são acompanhadas também com a diminuição dos valores de PA^[25].

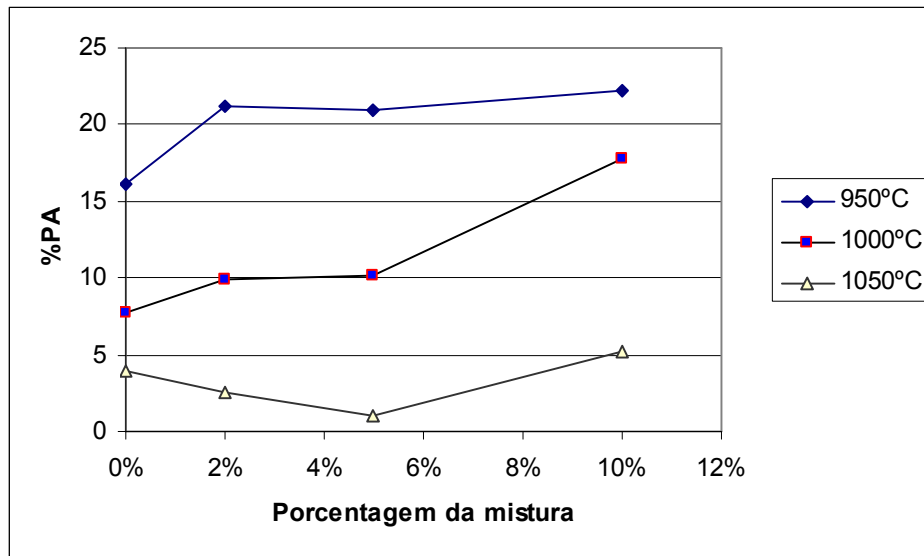


Figura 4-21 - Variação da porosidade aparente (PA) em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.

A Figura 4-22 mostra variação da porosidade aparente com a temperatura de sinterização para as três formas de adição do lodo e para a argila sem contaminação. Nota-se, como na Figura 4-21 que a porosidade aparente diminui com o aumento da temperatura de sinterização, resultado esperado uma vez que o aumento da temperatura melhora a capacidade de sinterização do material.

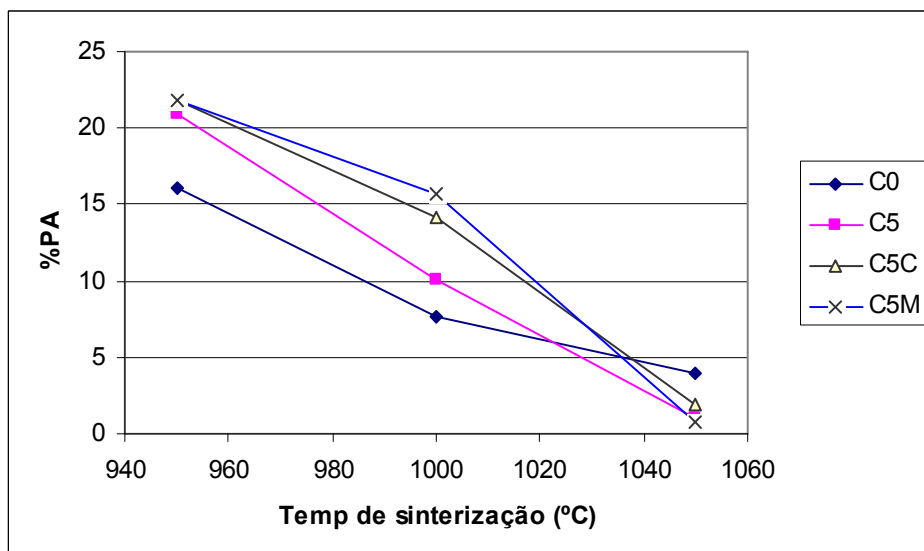


Figura 4-22 - Variação da PA em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.

Massa Específica Aparente (MEA)

A Figura 4-23 mostra os valores de MEA obtidos para as misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀ nas temperaturas de sinterização de 950°C, 1000°C e 1050°C. Observa-se que a adição de resíduo não provocou alterações significativas nessa propriedade dos corpos de prova. Isto provavelmente está relacionado com a natureza não plástica do resíduo. Entretanto, o aumento da temperatura de sinterização provocou um leve aumento na MEA.

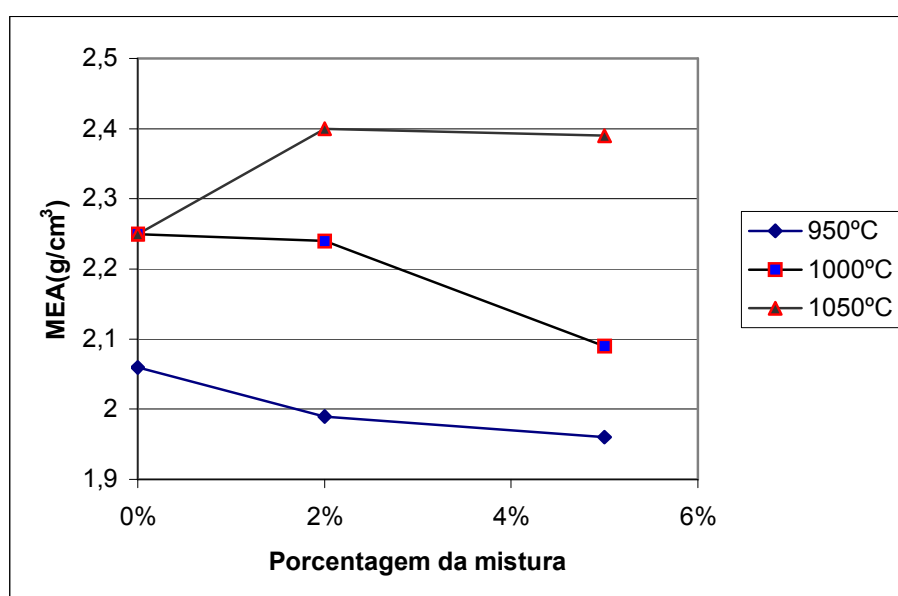


Figura 4-23 - Variação da massa específica aparente (MEA) em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.

Para se verificar se a forma com que o lodo é adicionado influencia na massa específica aparente, construiu-se a Figura 4-24 com os valores obtidos para os corpos de prova feitos com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}. Os dados mistura C₀ foram colocados na figura a título de comparação.

Nota-se pela Figura 4-24 que a forma com que o lodo é adicionado não influencia significativamente na massa específica aparente.

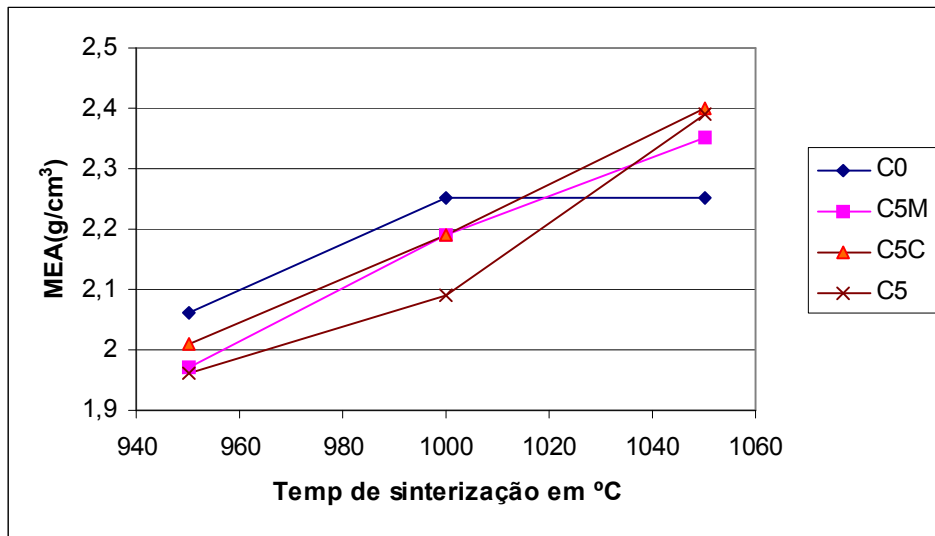


Figura 4-24 - Variação da MEA em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C_0 , C_5 , C_{5M} e C_{5C} .

Perda ao fogo(PF)

A Perda ao Fogo (PF) é atribuída a matéria orgânica contida na mistura e também outras substâncias inorgânicas que compõem o lodo e a argila, que são queimadas durante o processo.

A Figura 4-25 mostra os valores da perda ao fogo em função da concentração de lodo de ETA na argila para as três temperaturas de sinterização estudadas. Nota-se que a porcentagem da perda ao fogo aumenta com a concentração de lodo na mistura.

A perda ao fogo normal para um bloco cerâmico é em torno de 15%^[25], com menos de 10% de adição de lodo e analisando a Figura 4-25 conclui-se que os corpos de prova enquadram neste parâmetro.

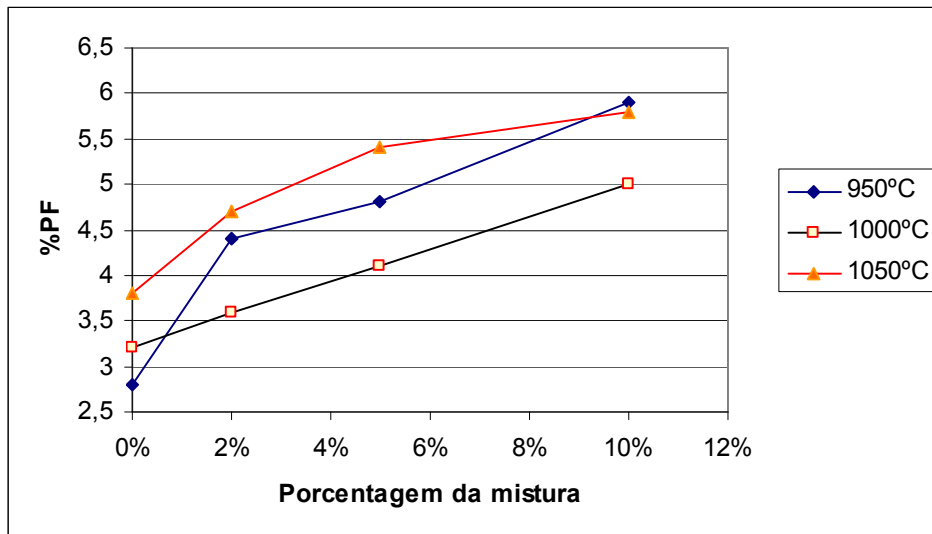


Figura 4-25 - Variação da perda ao fogo (PF) em função da porcentagem de lodo adicionado na argila (misturas C₀, C₂, C₅ e C₁₀), nas três temperaturas de sinterização.

A Figura 4-26 mostra a porcentagem de perda ao fogo em função da temperatura de sinterização para as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}. Esta figura foi construída com o intuito de se verificar a influência da forma com que o lodo foi adicionado na argila sobre a perda ao fogo. Nota-se que houve uma diminuição na perda do fogo para a temperatura de 1000°C, quando comparada com os dados da sinterização realizada a 950°C. Este comportamento foi observado para todas as misturas de lodo e argila e não foi observado para os corpos de prova feitos com argila sem adição de lodo (como pode ser verificado também na Figura 4-25).

Verifica-se ainda, pela Figura 4-26, que as adições de lodo calcinado geraram resultados semelhantes aos dos corpos de prova sem adição de lodo nas temperaturas de sinterização de 1000 e 1050°C. A perda do fogo dos corpos de prova com adições de lodo moído e de lodo bruto também apresentaram resultados semelhantes nessas temperaturas. Essa semelhança de comportamento é esperada uma vez que a diferença entre os lodos bruto e moído está apenas na granulometria, enquanto que o lodo calcinado já teve sua parcela de material volátil retirado durante a calcinação, não aumentando os valores de perda do fogo quando comparado com a argila sem adições de lodo.

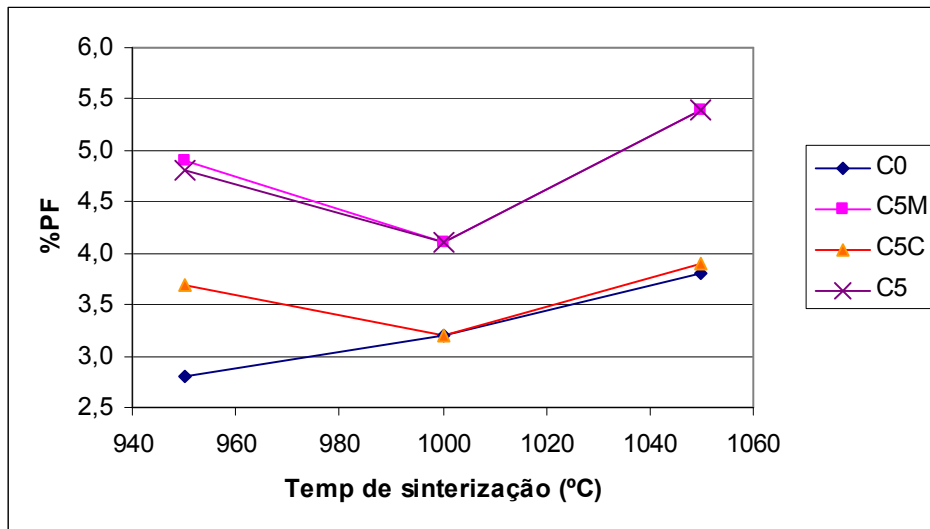


Figura 4-26 - Variação da perda ao fogo (PF) em função da temperatura de sinterização para os corpos de prova preparados com as misturas C₀, C₅, C_{5M} e C_{5C}.

4.2.3. Microscopia Ótica

Foram realizadas 60 observações de microscopia ótica com aumento de 12x e de 40x. A Figura 4-27, a Figura 4-28 e a Figura 4-29 mostram as imagens que em geral aparecem em todas as demais observadas portanto, elas podem ser consideradas um resumo de todas as observações.

A Figura 4-27 mostra a imagem de microscopia ótica da superfície de um corpo de prova feito com a mistura C₂ (mistura de argila com 2% de lodo) queimada a 950°C. Nesta figura são apontadas partículas ricas em Fe (setas identificadas com a letra **b**) provenientes do lodo de ETA na matriz de argila. Observa-se que estes componentes não estão presos a estrutura e, neste caso não ocorreu reação de fase sólida entre o lodo e a argila. As setas identificadas com a letra **a** apontam o silício que faz parte dos componentes da argila.

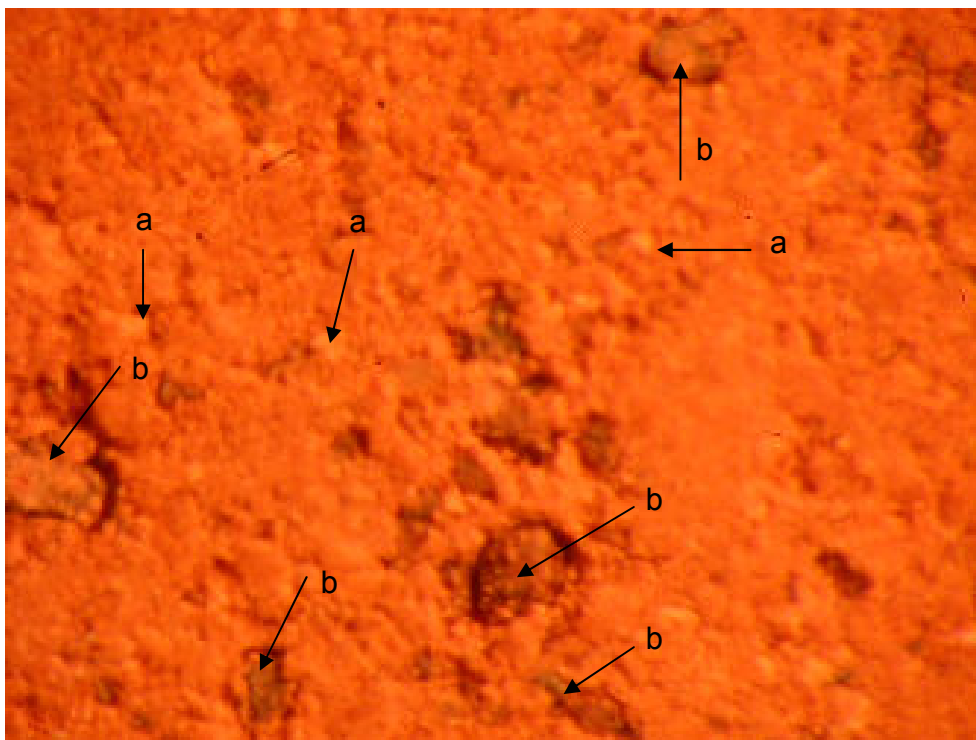


Figura 4-27 – Imagem de microscopia ótica da superfície de uma corpo de prova feito com a mistura C₂ (argila com adição de 2% de lodo) queimado a 950°C. Aumento: 40x. As setas identificadas com a letra **b** mostram partículas ricas em Fe e as setas identificadas com a letra **a** mostram prováveis partículas de sílica. É importante observar que existe uma folga entre a partícula de lodo e a estrutura da argila.

A Figura 4-28 apresenta a imagem de microscopia ótica na região da fratura (amostra proveniente do ensaios para medida de TRF) de uma corpo de prova preparado com a mistura C_{5C} (argila com adição de 5% de lodo calcinado) e queimado a 950°C. Nesta figura são apontados os pontos de ruptura, onde os componentes do lodo foram arrancados da matriz da argila, durante a ruptura que ocorreu no ensaios para determinação da TRF (tensão de ruptura à flexão), ficando buracos em seu lugar. Este é o principal fator que contribui para a queda dos valores de TRF quando adicionou-se lodo na argila.

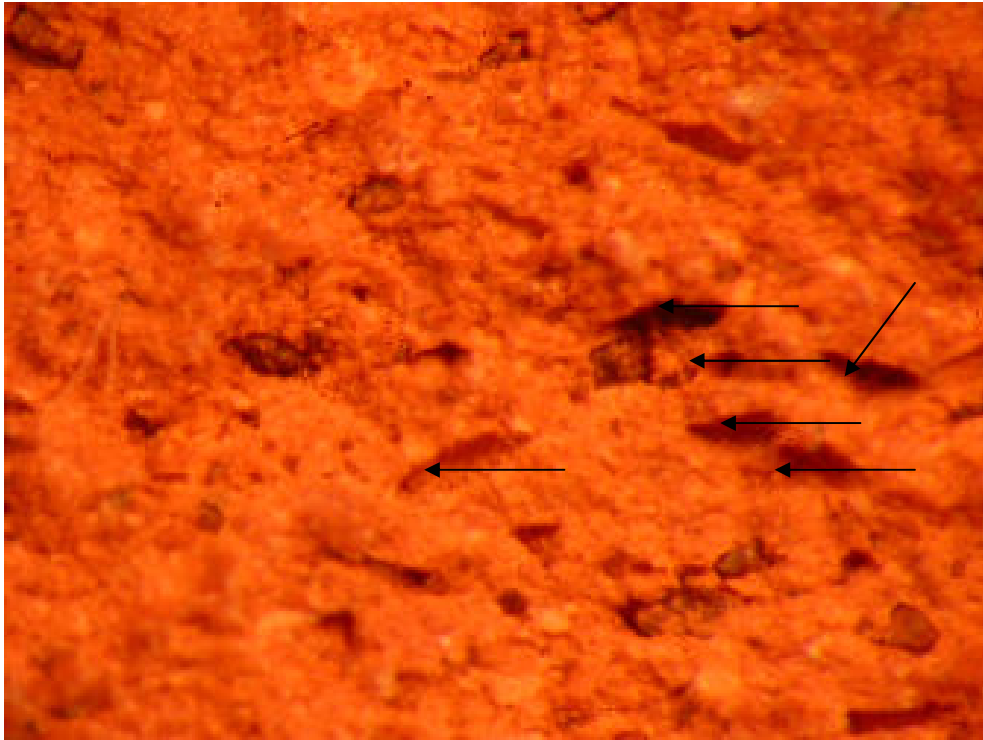


Figura 4-28 - Imagem de microscopia ótica da região da fratura de amostra proveniente do ensaio para determinação de TRF. O corpo de prova preparado com a mistura C_{5C} queimado a 950°C. Aumento: 40x. As setas mostram os espaços que ficaram na matriz quando partículas ricas em Fe foram arrancadas durante o ensaio.

A imagem de microscopia ótica da região fraturada do corpo de prova preparado com a mistura C_{5C} queimado a 1000°C está apresentada na Figura 4-29. Fica evidente a presença de buracos causados pelo arranque de partículas do lodo da matriz da argila. Nesta figura são apontadas partículas de silício, que é um dos componentes da estrutura da argila e que nesta temperatura de queima ficou mais evidente.

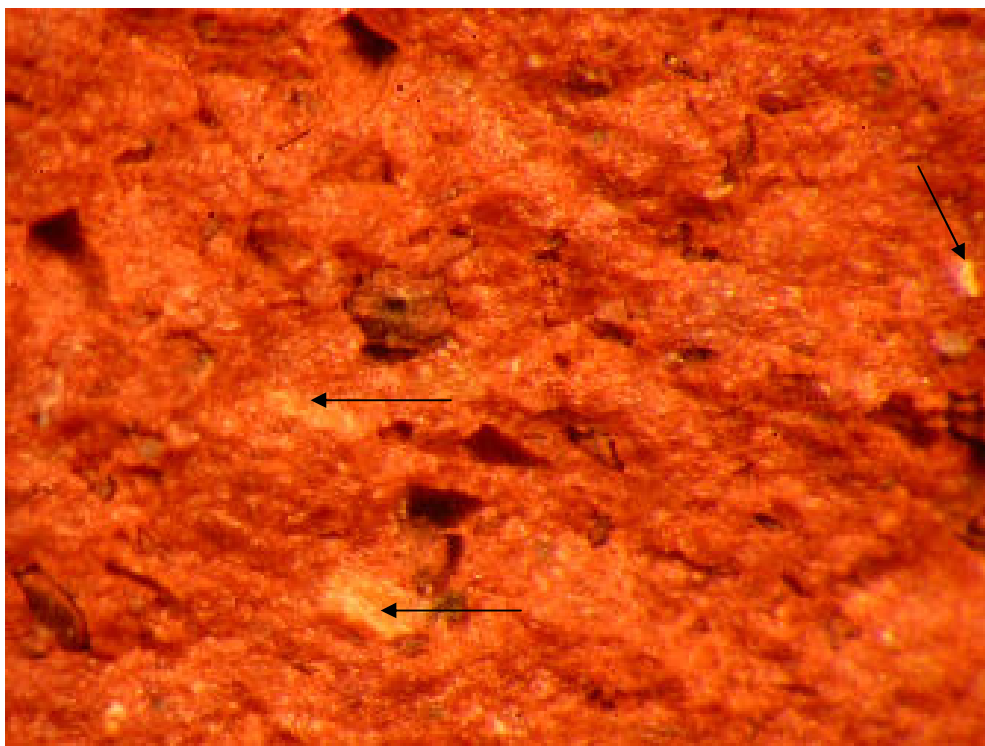


Figura 4-29 - Imagem de microscopia ótica da região da fratura de amostra proveniente do ensaio para determinação de TRF. O corpo de prova preparado com a mistura C_{5C} queimado a 1000°C. Aumento: 40x. As setas evidenciam partículas de sílica (quartzo), que é um componente da argila.

Na Figura 4-27 evidenciam-se os componentes dos lodo não agregados na argila, e na Figura 4-28 e na Figura 4-29 mostrou que após o ensaio de tensão de ruptura à flexão os componentes, ricos em Fe, foram retirados da matriz da argila deixando buracos. Isto é um fator que contribuiu para o decréscimo dos valores da tensão de ruptura à flexão quando foi acrescentado lodo na matriz de argila.

4.2.4. Tabelas com os resumos dos ensaios realizados

As tabelas seguintes mostram um resumo dos resultados dos ensaios realizados com argila sem mistura e com as misturas utilizando lodo da ETA nas temperaturas de 110°C, 950°C, 1000°C e 1050°C. A Tabela 4-9, a Tabela 4-10, a Tabela 4-11, a Tabela 4-12, Tabela 4-13 e a Tabela 4-14 mostram respectivamente os ensaios realizados com corpos de prova confeccionados com argila pura (C₀), mistura de 98% de argila com 2% de lodo da ETA (C₂), mistura de 95% de argila pura com 5% de lodo da ETA moído (C_{5M}), mistura de 95% de argila com 5% de lodo da ETA calcinado (C_{5C}), mistura de 95% de argila com 5% de lodo da ETA bruto (C₅) e mistura de 90% de argila com 10% de lodo da ETA (C₁₀).

As cores dos corpos de prova após a queima nas temperaturas de 950°C, 1000°C e 1050°C estão dentro dos padrões de queima dos blocos cerâmicos nesta faixa de temperatura^[51]. Não se observou alteração de cor com a adição do lodo, porém foram observados a olho nu partículas escuras correspondendo às maiores partículas de lodo nos corpos queimados.

Tabela 4-9 - Resumo dos resultados realizados com argila sem mistura.

Temp. (°C)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	PF (%)	Cor
110	-----	-----	-----	55 ± 5	5,4 ± 0,5	0,7 ± 0,0	-----	-----	-----	Marrom
950	7,8 ± 0,1	16,1 ± 0,3	2,06 ± 0,02	273 ± 20	26,8 ± 2,0	-----	3,6 ± 0,2	4,3 ± 0,2	2,8 ± 0,1	Vermelho
1000	3,4 ± 0,1	7,7 ± 0,3	2,25 ± 0,03	314 ± 18	30,8 ± 1,8	-----	6,0 ± 0,5	6,7 ± 0,5	3,2 ± 0,1	Vermelho
1050	1,7 ± 0,1	3,9 ± 0,4	2,25 ± 0,17	447 ± 24	43,8 ± 2,4	-----	8,4 ± 0,1	9,0 ± 0,1	3,8 ± 0,2	Vermelho escuro

Tabela 4-10 - Resumo dos resultados realizados com 98% de argila e 2% de lodo de ETA.

Temp. (°C)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	PF (%)	Cor
110	-----	-----	-----	36 ± 4	3,5 ± 0,4	0,5 ± 0,1	-----	-----	-----	Marrom
950	10,6 ± 0,2	21,2 ± 0,3	1,99 ± 0,01	222 ± 14	21,8 ± 1,4	-----	2,5 ± 0,2	3,0 ± 0,2	4,4 ± 0,1	Marrom
1000	4,4 ± 0,3	9,9 ± 0,5	2,24 ± 0,02	279 ± 18	27,4 ± 1,8	-----	6,2 ± 0,4	6,5 ± 0,4	3,6 ± 0,0	Vermelho
1050	1,1 ± 0,1	2,6 ± 0,2	2,40 ± 0,08	360 ± 22	35,3 ± 2,2	-----	16,7 ± 0,1	17,0 ± 0,0	4,7 ± 0,1	Vermelho escuro

Tabela 4-11 - Resumo dos resultados realizados com 95% de argila e 5% de lodo da ETA moído # 20.

Temp. (°C)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	PF (%)	Cor
110	-----	-----	-----	34 ± 3	3,4 ± 0,3	0,5 ± 0,0	-----	-----	-----	Marron
950	10,6 ± 0,3	20,9 ± 0,3	1,97 ± 0,03	214 ± 11	21,0 ± 1,1	-----	3,3 ± 0,5	3,8 ± 0,5	4,9 ± 0,1	Vermelho
1000	4,6 ± 0,2	10,1 ± 0,5	2,19 ± 0,03	262 ± 25	25,7 ± 2,4	-----	6,3 ± 0,6	6,8 ± 0,6	4,1 ± 0,2	Vermelho
1050	0,4 ± 0,1	1,0 ± 0,3	2,35 ± 0,02	334 ± 17	32,8 ± 1,6	-----	16,8 ± 0,0	17,2 ± 0,0	5,4 ± 0,0	Vermelho escuro

Tabela 4-12 - Resumo dos resultados realizados com 95% de argila e 5% de lodo da ETA calcinado.

Temperatura (°C)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	PF (%)	Cor
110	-----	-----	-----	43 ± 4	4,2 ± 0,3	0,5 ± 0,0	-----	-----	-----	Marron
950	10,9 ± 0,3	21,8 ± 0,5	2,01 ± 0,02	252 ± 11	24,7 ± 1,1	-----	2,5 ± 0,2	3,0 ± 0,2	3,7 ± 0,2	Vermelho
1000	6,4 ± 0,5	14,1 ± 0,8	2,19 ± 0,04	270 ± 30	26,5 ± 2,9	-----	5,4 ± 0,5	5,9 ± 0,5	3,2 ± 0,1	Vermelho
1050	0,8 ± 0,1	1,9 ± 0,2	2,40 ± 0,03	368 ± 30	36,1 ± 3,0	-----	16,8 ± 0,0	17,2 ± 0,0	3,9 ± 0,0	Vermelho escuro

Tabela 4-13 - Resumo dos resultados realizados com 95% de argila e 5% de lodo da ETA bruto.

Temp. (°C)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	PF (%)	Cor
110	-----	-----	-----	31 ± 2	3,1 ± 0,2	0,5 ± 0,0	-----	-----	-----	Marron
950	11,1 ± 0,3	21,8 ± 0,6	1,96 ± 0,03	210 ± 7	20,6 ± 0,7	-----	2,7 ± 0,3	3,2 ± 0,3	4,8 ± 0,0	Vermelho
1000	7,5 ± 0,2	15,7 ± 1,0	2,09 ± 0,13	305 ± 19	29,9 ± 1,9	-----	6,5 ± 0,7	6,9 ± 0,7	4,1 ± 0,1	Vermelho
1050	0,3 ± 0,1	0,8 ± 0,3	2,39 ± 0,04	408 ± 34	40,0 ± 3,3	-----	16,8 ± 0,1	17,3 ± 0,1	5,4 ± 0,1	Vermelho escuro

Tabela 4-14 - Resumo dos resultados realizados com 90% de argila e 10% de lodo da ETA bruto.

Temperatura (°C)	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	CLS (%)	CLQ (%)	CLT (%)	PF (%)	Cor
110	-----	-----	-----	25 ± 2	2,5 ± 0,1	0,5 ± 0,0	-----	-----	-----	Marron
950	11,4 ± 0,2	22,2 ± 0,3	1,95 ± 0,03	167 ± 13	1,8 ± 1,3	-----	3,1 ± 0,3	3,5 ± 0,3	5,9 ± 0,1	Vermelho
1000	8,7 ± 0,6	17,8 ± 1,1	2,06 ± 0,03	208 ± 18	20,4 ± 1,8	-----	5,7 ± 0,5	6,2 ± 0,5	5,0 ± 0,1	Vermelho
1050	2,2 ± 0,2	5,2 ± 0,4	2,35 ± 0,01	287 ± 12	28,1 ± 1,2	-----	16,9 ± 0,0	17,3 ± 0,0	5,8 ± 0,0	Vermelho escuro

5. Conclusões

Para as condições experimentais deste trabalho os resultados alcançados permitem inferir as seguintes conclusões:

1. De acordo com as imagens de elétrons secundários mostrados na microscopia eletrônica de varredura verifica-se que o lodo é constituído de partículas facetadas, com faces aproximadamente planas. O espectro do DRX mostra que o lodo apresenta uma baixa cristalinidade porém, quando calcinado à 1000°C apresenta uma melhor definição de sua cristalinidade. A análise de FRX mostrou uma predominância de Fe_2O_3 como elemento químico predominante no lodo.
2. O lodo adicionado na matriz da massa argilosa alterou as propriedades mecânicas dos corpos de prova confeccionados apenas com a massa argilosa pura.
3. As propriedades Físico-Mecânicas dos corpos de prova confeccionados com a mistura de lodo e argila são influenciadas pelas temperaturas de sinterização entre os valores de 950°C e 1050°C. Isto devido ao maior grau de sinterização destes corpos de prova.
4. Partículas de lodo atuam como inclusões relativamente inertes na massa argilosa até 1000°C, sendo que algumas tornam-se fundentes a 1050°C, o que causa significativo aumento de retração nesta temperatura.
5. Partículas de lodo atuam como inclusões que favorecem a fratura do corpo causando diminuição dos valores de Tensão de Ruptura à Flexão dos corpos de prova.
6. A adição de lodo de ETA na argila para fabricação de cerâmica vermelha alterou as propriedades mecânicas do produto, entretanto o produto ainda apresentou propriedades dentro dos limites estabelecidos para cerâmica vermelha para uso em construção civil. Portanto, é possível o aproveitamento do lodo de ETA estudado em cerâmica vermelha para adições de até 10% do lodo à argila.

Anexo A

Ensaio realizados apenas com a argila sem adição de lodo (C0)

A Tabela 5-1 mostra o resultado do ensaio de secagem a 110°C durante 24 horas. A tensão de resistência a flexão ficou com valor médio de 5,4MPa.

Tabela 5-1 - Ensaio de secagem a 110°C/24horas Cor: marrom

CP	mu	ms	U(%)	lu	ls	CLS(%)	P	b	h	TRF(kgf/cm²)	TRF(MPa)
1	14,52	12,91	12,5	6,11	6,07	0,7	2,10	2,04	0,55	51	5,0
2	14,64	13,02	12,4	6,11	6,07	0,7	2,56	2,05	0,56	60	5,9
3	14,59	12,96	12,6	6,11	6,07	0,7	2,15	2,05	0,56	50	4,9
4	14,60	12,99	12,4	6,11	6,07	0,7	2,25	2,05	0,50	66	6,5
5	14,60	12,98	12,5	6,11	6,07	0,7	2,25	2,05	0,50	66	6,5
6	14,62	12,98	12,6	6,11	6,07	0,7	1,98	2,05	0,50	58	5,7
7	14,66	13,04	12,4	6,11	6,07	0,7	2,64	2,05	0,60	54	5,3
8	14,51	12,90	12,5	6,11	6,07	0,7	1,78	2,05	0,55	43	4,2
9	14,60	12,96	12,7	6,11	6,07	0,7	2,12	2,05	0,55	51	5,0
10	14,65	13,04	12,3	6,11	6,07	0,7	2,04	2,05	0,55	49	4,8
M			12,5			0,7				55	5,4
DP			0,1			0,0				7	0,7
I			0,1			0,0				5	0,5

A Tabela 5-2 e a Tabela 5-3 mostram os dados da queima realizada à 950°C durante 3 horas.

Tabela 5-2 - Dados da queima a 950°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,99	7,17	6,63	8,1	17,0	2,08	6,07	5,85	3,6	4,3
2	4,08	7,31	6,78	7,8	16,4	2,10	6,07	5,85	3,6	4,3
3	3,05	5,61	5,20	7,9	16,0	2,03	6,07	5,83	4,0	4,6
4	4,11	7,54	7,00	7,7	15,7	2,04	6,07	5,85	3,6	4,3
5	3,25	6,06	5,62	7,8	15,7	2,00	6,07	5,87	3,3	3,9
6	3,92	7,05	6,55	7,6	16,0	2,09	6,07	5,85	3,6	4,3
7	4,00	7,19	6,65	8,1	16,9	2,08	6,07	5,85	3,6	4,3
8	3,73	6,83	6,34	7,7	15,8	2,05	6,07	5,87	3,3	3,9
9	3,97	7,25	6,73	7,7	15,9	2,05	6,07	5,83	3,9	4,5
10	3,60	6,63	6,15	7,8	15,8	2,03	6,07	5,85	3,6	4,3
M				7,8	16,1	2,06			3,6	4,3
DP				0,2	0,5	0,03			0,2	0,2
I				0,1	0,3	0,02			0,2	0,2

Tabela 5-3 – Continuação dos dados da queima a 950°C durante 3 horas Cor: Vermelho

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	9,34	1,97	0,52	263	25,8	13,06	12,49	4,4
2	10,34	1,97	0,53	280	27,5	13,12	12,59	4,0
3	9,90	1,97	0,53	268	26,3	13,11	12,58	4,0
4	9,50	1,99	0,54	246	24,1	13,11	12,58	4,0
5	9,94	1,99	0,54	257	25,2	13,12	12,59	4,0
6	11,90	1,97	0,53	323	31,6	13,15	12,62	4,0
7	11,75	1,98	0,53	317	31,1	13,07	12,54	4,1
8	10,32	2,00	0,54	265	26,0	13,11	12,59	4,0
9	9,08	2,00	0,54	234	22,9	13,15	12,62	4,0
10	10,80	1,99	0,54	279	27,4	13,13	12,60	4,0
M			3	273	26,8			4,1
DP				28	2,8			0,1
I				20	2,0			0,1

A Tabela 5-4 e a Tabela 5-5 mostram os resultados dos ensaios da queima realizada a uma temperatura de 1000°C durante 3 horas.

Tabela 5-4 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,75	6,65	6,40	3,9	8,6	2,21	6,07	5,77	4,9	5,6
2	3,51	6,20	5,98	3,7	8,2	2,22	6,07	5,75	5,3	5,9
3	3,34	6,05	5,85	3,4	7,4	2,16	6,07	5,77	4,9	5,6
4	3,73	6,57	6,36	3,3	7,4	2,24	6,07	5,71	5,9	6,5
5	3,63	6,39	6,18	3,4	7,6	2,24	6,07	5,69	6,3	6,9
6	3,63	6,36	6,15	3,4	7,7	2,25	6,07	5,70	6,1	6,7
7	3,58	6,20	6,00	3,3	7,6	2,29	6,07	5,65	6,9	7,5
8	2,10	3,69	3,57	3,4	7,5	2,25	6,07	5,66	6,8	7,4
9	3,65	6,31	6,10	3,4	7,9	2,29	6,07	5,68	6,4	7,0
10	3,57	6,14	5,95	3,2	7,4	2,32	6,07	5,65	6,9	7,5
M				3,4	7,7	2,25			6,0	6,7
DP				0,2	0,4	0,05			0,8	0,8
I				0,1	0,3	0,03			0,5	0,5

Tabela 5-5 – Continuação dos dados da queima a 1000°C durante 3 horas Cor: Vermelho

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	9,40	1,94	0,53	259	25,4	12,93	12,50	3,3
2	10,98	1,94	0,52	314	30,8	13,00	12,57	3,3
3	12,72	1,94	0,54	337	33,1	13,02	12,58	3,4
4	10,82	1,92	0,53	301	29,5	12,89	12,47	3,3
5	11,82	1,91	0,54	318	31,2	12,91	12,48	3,3
6	11,38	1,92	0,53	317	31,0	12,87	12,45	3,3
7	12,18	1,90	0,52	356	34,9	12,89	12,49	3,1
8	10,84	1,90	0,52	316	31,0	12,91	12,51	3,1
9	11,00	1,90	0,52	321	31,5	12,91	12,50	3,2
10	11,12	1,89	0,54	303	29,7	12,80	12,41	3,0
M				314	30,8			3,2
DP				25	2,5			0,1
I				18	1,8			0,1

A Tabela 5-6 e a Tabela 5-7 mostram os resultados da queima realizada na temperatura de 1050°C durante 3 horas.

Tabela 5-6 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,83	6,58	6,46	1,9	4,4	2,35	6,07	5,55	8,6	9,2
2	3,22	5,63	5,53	1,8	4,1	2,29	6,07	5,56	8,4	9,0
3	3,89	6,65	6,53	1,8	4,3	2,37	6,07	5,56	8,4	9,0
4	3,97	6,89	6,78	1,6	3,8	2,32	6,07	5,54	8,7	9,3
5	4,12	6,98	6,85	1,9	4,5	2,40	6,07	5,57	8,2	8,8
6	3,84	6,80	6,69	1,6	3,7	2,26	6,07	5,57	8,2	8,8
7	3,91	6,78	6,68	1,5	3,5	2,33	6,07	5,55	8,6	9,2
8	3,69	6,46	6,35	1,7	4,0	2,29	6,07	5,57	8,2	8,8
9	3,78	6,50	6,39	1,7	4,0	2,35	6,07	5,57	8,2	8,8
10	2,15	5,70	5,60	1,8	2,8	1,58	6,07	5,58	8,1	8,7
M				1,7	3,9	2,25			8,4	9,0
DP				0,1	0,5	0,24			0,2	0,2
I				0,1	0,4	0,17			0,1	0,1

Tabela 5-7 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas Cor: vermelho escuro

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	14,72	1,86	0,52	439	43,1	12,93	12,45	3,7
2	14,14	1,86	0,52	422	41,4	12,93	12,48	3,5
3	14,56	1,86	0,51	451	44,3	13,00	12,54	3,5
4	15,86	1,86	0,52	473	46,4	12,91	12,46	3,5
5	13,06	1,86	0,51	405	39,7	12,90	12,44	3,6
6	15,10	1,86	0,52	450	44,2	12,97	12,44	4,1
7	15,86	1,86	0,54	439	43,0	13,00	12,47	4,1
8	13,94	1,86	0,52	416	40,8	12,98	12,48	3,9
9	17,62	1,86	0,52	526	51,5	13,02	12,48	4,1
10	14,50	1,86	0,51	450	44,1	13,02	12,50	4,0
M				447	43,8			3,8
DP				34	3,3			0,3
I				24	2,4			0,2

Anexo B

Ensaio realizados com a mistura C2 (argila com 2% de lodo de ETA)

A Tabela 5-8 mostra os resultados dos ensaios de secagem, realizada em estufa à 110°C durante 24 horas. Os corpos de prova confeccionados para este ensaio apresentam uma cor marrom.

A tensão de resistência à flexão ,TRF, apresentou um valor médio de 3,5MPa, sendo que esse valor torna-se maior à medida que a temperatura de queima dos ensaios aumenta.

Tabela 5-8 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom

CP	mu	ms	U(%)	lu	ls	CLS(%)	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)
1	14,57	12,83	13,6	6,10	6,07	0,5	1,52	2,05	0,56	35	3,5
2	14,65	12,81	14,4	6,10	6,07	0,5	1,46	2,05	0,56	34	3,3
3	14,64	12,88	13,7	6,10	6,07	0,5	1,60	2,05	0,56	37	3,7
4	14,66	12,89	13,7	6,10	6,07	0,5	1,38	2,05	0,46	48	4,7
5	14,66	12,90	13,6	6,11	6,07	0,7	1,51	2,06	0,56	35	3,4
6	14,68	12,90	13,8	6,10	6,07	0,5	1,41	2,06	0,55	34	3,3
7	14,70	12,93	13,7	6,10	6,07	0,5	1,53	2,06	0,56	36	3,5
8	14,64	12,88	13,7	6,11	6,07	0,7	1,65	2,06	0,55	40	3,9
9	14,64	12,92	13,3	6,11	6,07	0,7	1,19	2,05	0,55	29	2,8
10	14,66	12,90	13,6	6,10	6,07	0,5	1,36	2,06	0,55	33	3,2
M			13,7			0,5				36	3,5
DP			0,3			0,1				5	0,5
I			0,2			0,1				4	0,4

Os ensaios de queima para essa mistura foram realizados nas temperaturas de 950°C, 1000°C e 1050°C. A Tabela 5-9 e a Tabela 5-10 mostram os resultados do ensaio de queima na temperatura de 950°C, durante 3 horas.

Tabela 5-9 - Ensaio realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	4,21	7,67	6,95	10,4	20,8	2,01	6,07	5,89	3,0	3,4
2	3,53	6,45	5,85	10,3	20,5	2,00	6,07	5,89	3,0	3,4
3	3,93	7,15	6,48	10,3	20,8	2,01	6,07	5,91	2,6	3,1
4	3,70	6,76	6,10	10,8	21,6	1,99	6,07	5,92	2,5	3,0
5	3,72	6,88	6,21	10,8	21,2	1,97	6,07	5,94	2,1	2,6
6	4,42	8,21	7,40	10,9	21,4	1,95	6,07	5,90	2,8	3,3
7	4,00	7,30	6,61	10,4	20,9	2,00	6,07	5,92	2,5	3,0
8	4,46	8,10	7,31	10,8	21,7	2,01	6,07	5,94	2,1	2,6
9	4,39	8,00	7,23	10,7	21,3	2,00	6,07	5,91	2,6	3,1
10	4,06	7,43	6,71	10,7	21,4	1,99	6,07	5,94	2,1	2,6
M				10,6	21,2	1,99			2,5	3,0
DP				0,2	0,4	0,02			0,3	0,3
I				0,2	0,3	0,01			0,2	0,2

Tabela 5-10 - Ensaio realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor:Marrom

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	8,30	1,98	0,54	218	21,4	12,97	12,38	4,5
2	8,75	1,98	0,54	231	22,6	13,05	12,48	4,4
3	8,90	1,98	0,53	240	23,5	13,01	12,45	4,3
4	9,30	1,99	0,53	249	24,4	12,94	12,37	4,4
5	6,80	2,00	0,54	176	17,3	13,04	12,46	4,4
6	9,02	1,98	0,54	237	23,3	12,96	12,38	4,5
7	8,02	1,99	0,53	213	20,9	12,97	12,39	4,5
8	8,00	2,00	0,53	214	20,9	13,03	12,47	4,3
9	8,10	1,99	0,53	218	21,3	13,00	12,43	4,4
10	8,20	2,00	0,53	223	21,8	12,98	12,41	4,4
M				222	21,8			4,4
DP				20	2,0			0,1
I				14	1,4			0,1

A Tabela 5-11 e a Tabela 5-12 mostram os resultados do ensaio de queima na temperatura de 1000°C durante 3 horas.

Tabela 5-11 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,45	5,92	5,67	4,4	10,1	2,30	6,08	5,65	7,1	7,4
2	3,96	6,94	6,67	4,0	9,1	2,24	6,08	5,70	6,3	6,6
3	3,71	6,42	6,17	4,1	9,2	2,28	6,08	5,70	6,3	6,6
4	3,63	6,38	6,12	4,2	9,5	2,23	6,08	5,74	5,6	5,9
5	3,85	6,80	6,47	5,1	11,2	2,19	6,08	5,74	5,6	5,9
6	4,05	7,17	6,83	5,0	10,9	2,19	6,08	5,74	5,6	5,9
7	3,44	6,02	5,75	4,7	10,5	2,23	6,08	5,65	7,1	7,4
8	3,49	6,13	5,88	4,3	9,5	2,23	6,08	5,67	6,7	7,0
9	4,06	7,15	6,85	4,4	9,7	2,22	6,08	5,74	5,6	5,9
10	3,71	6,44	6,19	4,0	9,2	2,27	6,08	5,72	5,9	6,2
M				4,4	9,9	2,24			6,2	6,5
DP				0,4	0,8	0,03			0,6	0,6
I				0,3	0,5	0,02			0,4	0,4

Tabela 5-12 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C. Cor: vermelho

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	10,30	1,89	0,52	302	29,6	12,85	12,38	3,7
2	10,32	1,95	0,52	294	28,8	12,87	12,40	3,7
3	8,05	1,91	0,51	243	23,8	12,81	12,35	3,6
4	9,85	1,92	0,51	296	29,0	12,83	12,37	3,6
5	9,92	1,93	0,52	285	28,0	12,87	12,40	3,7
6	10,52	1,93	0,52	302	29,7	12,84	12,37	3,7
7	9,80	1,90	0,51	297	29,2	12,81	12,35	3,6
8	8,18	1,90	0,51	248	24,3	12,85	12,38	3,7
9	8,28	1,93	0,52	238	23,3	12,85	12,39	3,6
10	9,38	1,91	0,51	283	27,8	12,81	12,35	3,6
M				279	27,4			3,6
DP				26	2,5			0,0
I				18	1,8			0,0

A Tabela 5-13 e a Tabela 5-14 mostram o resultado do ensaio de queima na temperatura de 1050°C durante 3 horas.

Tabela 5-13 - Ensaio realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,40	5,82	5,75	1,2	2,9	2,38	6,07	5,06	16,6	17,0
2	3,67	5,76	5,70	1,1	2,9	2,73	6,09	5,06	16,9	17,0
3	3,00	5,08	5,02	1,2	2,9	2,41	6,07	5,06	16,6	17,0
4	3,44	5,96	5,90	1,0	2,4	2,34	6,08	5,06	16,8	17,0
5	2,97	5,13	5,07	1,2	2,8	2,35	6,07	5,06	16,6	17,0
6	3,39	5,79	5,74	0,9	2,1	2,39	6,08	5,06	16,8	17,0
7	3,42	5,86	5,80	1,0	2,5	2,38	6,08	5,06	16,8	17,0
8	4,06	6,96	6,90	0,9	2,1	2,38	6,07	5,06	16,6	17,0
	4,29	7,38	7,30	1,1	2,6	2,36	6,08	5,06	16,8	17,0
10	3,63	6,35	6,28	1,1	2,6	2,31	6,07	5,06	16,6	17,0
M				1,1	2,6	2,40			16,7	17,0
DP				0,1	0,3	0,12			0,1	0,0
I				0,1	0,2	0,08			0,1	0,0

Tabela 5-14 - Ensaio realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor:vermelho escuro

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	11,70	1,87	0,51	361	35,4	12,98	12,39	4,5
2	11,72	1,89	0,52	344	33,7	13,00	12,42	4,5
3	13,00	1,89	0,52	382	37,4	13,01	12,40	4,7
4	12,58	1,90	0,52	367	36,0	13,00	12,39	4,7
5	11,52	1,88	0,51	353	34,7	12,94	12,34	4,6
6	10,04	1,90	0,52	293	28,7	12,99	12,38	4,7
7	11,70	1,90	0,52	342	33,5	13,01	12,40	4,7
8	12,86	1,87	0,50	413	40,5	12,95	12,35	4,6
9	12,86	1,90	0,52	375	36,8	12,95	12,34	4,7
10	12,98	1,93	0,52	373	36,6	13,00	12,38	4,8
M				360	35,3			4,7
DP				31	3,1			0,1
I				22	2,2			0,1

Anexo C

Ensaio realizados com mistura C5C (argila com 5% de lodo de ETA calcinado)

A Tabela 5-15 mostra os resultados dos ensaios de secagem, realizada em estufa à temperatura de 110°C durante 24 horas. Os corpos de prova confeccionados para este ensaio apresentam uma cor marrom.

A tensão de resistência à flexão ,TRF, apresentou um valor médio de 4,2MPa, sendo que esse valor torna-se maior à medida que a temperatura de queima dos ensaios aumenta.

Tabela 5-15 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom

CP	mu	ms	U(%)	lu	ls	CLS (%)	P	b	h	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)
1	14,54	12,98	12,0	6,11	6,08	0,5	1,88	2,05	0,55	45	4,5
2	14,60	13,05	11,9	6,11	6,08	0,5	2,06	2,05	0,55	50	4,9
3	14,60	13,04	12,0	6,11	6,08	0,5	1,78	2,05	0,55	43	4,2
4	14,59	13,03	12,0	6,11	6,08	0,5	1,74	2,05	0,55	42	4,1
5	14,67	13,06	12,3	6,11	6,08	0,5	1,62	2,05	0,55	39	3,8
6	14,64	13,09	11,8	6,11	6,08	0,5	1,88	2,05	0,55	45	4,5
7	14,59	13,04	11,9	6,11	6,08	0,5	1,69	2,05	0,55	41	4,0
8	14,60	13,03	12,0	6,11	6,08	0,5	1,86	2,05	0,54	47	4,6
9	14,65	13,10	11,8	6,11	6,08	0,5	1,32	2,05	0,55	32	3,1
10	14,56	13,05	11,6	6,11	6,08	0,5	1,72	2,06	0,55	41	4,1
M			11,9			0,5				43	4,2
DP			0,2			0,0				5	0,5
I			0,1			0,0				4	0,3

A Tabela 5-16 e a Tabela 5-17 mostram os dados da queima realizada à 950°C durante 3 horas.

Tabela 5-16 - Dados da queima a 950°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,60	6,56	5,90	11,2	22,3	1,99	6,08	5,92	2,6	3,1
2	4,00	7,29	6,59	10,6	21,3	2,00	6,08	5,90	2,9	3,4
3	4,51	8,1	7,30	11,0	22,3	2,03	6,08	5,90	2,9	3,4
4	4,69	8,44	7,67	10,0	20,5	2,05	6,08	5,92	2,6	3,1
5	4,27	7,76	6,97	11,3	22,6	2,00	6,08	5,93	2,5	2,9
6	4,41	7,91	7,19	10,0	20,6	2,05	6,08	5,92	2,7	3,2
7	4,21	7,64	6,89	10,9	21,9	2,01	6,08	5,93	2,5	2,9
8	4,17	7,59	6,83	11,1	22,2	2,00	6,08	5,94	2,3	2,7
9	4,26	7,77	6,98	11,3	22,5	1,99	6,08	5,95	2,2	2,7
10	4,45	8,28	7,45	11,1	21,7	1,95	6,08	5,95	2,2	2,7
M				10,9	21,8	2,01			2,5	3,0
DP				0,5	0,8	0,03			0,3	0,3
I				0,3	0,5	0,02			0,2	0,2

Tabela 5-17 - Ensaio realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor:vermelho

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	9,46	1,99	0,53	254	24,9	13,07	12,66	3,1
2	9,59	1,98	0,53	258	25,3	13,17	12,68	3,7
3	9,21	1,98	0,52	258	25,3	13,12	12,62	3,8
4	9,44	1,99	0,53	255	25,0	13,14	12,65	3,7
5	9,82	2,00	0,54	257	25,2	13,12	12,62	3,8
6	10,51	1,99	0,53	284	27,9	13,11	12,62	3,7
7	8,60	1,99	0,52	237	23,3	13,10	12,59	3,9
8	9,50	2,00	0,53	250	24,5	13,13	12,63	3,8
9	9,10	2,01	0,53	242	23,8	13,15	12,66	3,7
10	8,80	2,00	0,54	228	22,4	13,10	12,60	3,8
M				252	24,7			3,7
DP				15	1,5			0,2
I				11	1,1			0,2

A Tabela 5-18 e a Tabela 5-19 mostram os dados da queima realizada à 1000°C durante 3 horas

Tabela 5-18 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,73	6,47	6,10	6,1	13,5	2,23	6,08	5,74	5,6	6,1
2	3,11	5,59	5,18	7,9	16,5	2,09	6,08	5,75	5,4	5,9
3	3,79	6,63	6,26	5,9	13,0	2,20	6,08	5,79	4,8	5,2
4	3,23	5,76	5,36	7,5	15,8	2,12	6,08	5,79	4,8	5,2
5	3,37	5,87	5,52	6,3	14,0	2,21	6,08	5,69	6,4	6,9
6	3,43	6,02	5,68	6,0	13,1	2,19	6,08	5,77	5,1	5,6
7	4,29	7,36	6,92	6,4	14,3	2,25	6,08	5,69	6,4	6,9
8	3,57	6,25	5,89	6,1	13,4	2,20	6,08	5,75	5,4	5,9
9	3,64	6,33	5,95	6,4	14,1	2,21	6,08	5,80	4,6	5,1
10	3,94	6,81	6,43	5,9	13,2	2,24	6,08	5,73	5,8	6,2
M				6,4	14,1	2,19			5,4	5,9
DP				0,7	1,2	0,05			0,6	0,6
I				0,5	0,8	0,04			0,5	0,5

Tabela 5-19 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C. Cor:vermelho

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	9,56	1,92	0,51	287	28,2	12,93	12,54	3,0
2	11,60	1,93	0,52	333	32,7	13,00	12,59	3,2
3	7,10	1,94	0,51	211	20,7	13,06	12,63	3,3
4	9,40	1,95	0,51	278	27,3	13,00	12,62	2,9
5	7,12	1,91	0,50	224	21,9	13,06	12,62	3,4
6	10,70	1,94	0,52	306	30,0	13,05	12,66	3,0
7	9,70	1,91	0,52	282	27,6	13,00	12,59	3,2
8	9,50	1,94	0,51	282	27,7	13,00	12,60	3,1
9	7,30	1,94	0,52	209	20,5	13,00	12,59	3,2
10	9,70	1,92	0,51	291	28,6	12,98	12,54	3,4
M				270	26,5			3,2
DP				42	4,1			0,2
I				30	2,9			0,1

A Tabela 5-20 e a Tabela 5-21 mostram os dados da queima realizada à 1050°C durante 3 horas.

Tabela 5-20 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,59	6,18	6,14	0,7	1,5	2,37	6,08	5,06	16,8	17,2
2	3,08	5,37	5,33	0,8	1,7	2,33	6,08	5,06	16,8	17,2
3	3,27	5,55	5,50	0,9	2,2	2,41	6,08	5,06	16,8	17,2
4	2,70	4,65	4,62	0,6	1,5	2,37	6,08	5,06	16,8	17,2
5	3,39	5,72	5,68	0,7	1,7	2,44	6,08	5,06	16,8	17,2
6	3,46	5,87	5,83	0,7	1,7	2,42	6,08	5,06	16,8	17,2
7	3,84	6,53	6,47	0,9	2,2	2,41	6,08	5,06	16,8	17,2
8	3,36	5,77	5,72	0,9	2,1	2,37	6,08	5,06	16,8	17,2
9	3,64	6,13	6,08	0,8	2,0	2,44	6,08	5,06	16,8	17,2
10	3,42	5,81	5,75	1,0	2,5	2,41	6,08	5,06	16,8	17,2
M				0,8	1,9	2,40			16,8	17,2
DP				0,1	0,3	0,04			0,0	0,0
I				0,1	0,2	0,03			0,0	0,0

Tabela 5-21 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor:vermelho escuro

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	12,99	1,93	0,53	359	35,2	13,09	12,57	4,0
2	13,22	1,95	0,53	362	35,5	13,10	12,58	4,0
3	12,67	1,89	0,50	402	39,4	13,07	12,56	3,9
4	13,34	1,92	0,52	385	37,8	13,13	12,62	3,9
5	13,95	1,90	0,52	407	39,9	13,11	12,61	3,8
6	8,70	1,91	0,51	263	25,8	13,03	12,51	4,0
7	11,05	1,89	0,51	337	33,1	13,12	12,60	4,0
8	13,72	1,91	0,53	384	37,6	13,10	12,59	3,9
9	13,50	1,90	0,52	394	38,7	13,07	12,56	3,9
10	12,60	1,90	0,51	382	37,5	13,07	12,56	3,9
M				368	36,1			3,9
DP				43	4,2			0,1
I				30	3,0			0,0

Anexo D

Ensaio com mistura C5M (argila com 5% de lodo de ETA moído)

A Tabela 5-22 mostra os resultados dos ensaios de secagem, realizada em estufa à temperatura de 110°C durante 24 horas. Os corpos de prova confeccionados para este ensaio apresentam uma cor marrom.

A tensão de resistência à flexão ,TRF, apresentou um valor médio de 3,7MPa, sendo que esse valor torna-se maior à medida que a temperatura de queima dos ensaios aumenta

A TRF apresentou redução de valor em relação a mistura de argila e lodo de ETA calcinado.

Tabela 5-22 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom

CP	mu	ms	U(%)	lu	ls	CLS(%)	P	b	h	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)
1	14,58	13,05	11,7	6,11	6,08	0,5	1,32	2,06	0,57	30	2,9
2	14,60	13,10	11,5	6,11	6,08	0,5	1,32	2,06	0,57	30	2,9
3	14,65	13,09	11,9	6,11	6,08	0,5	1,32	2,06	0,57	30	2,9
4	14,56	13,00	12,0	6,11	6,08	0,5	1,32	2,06	0,57	30	2,9
5	14,56	13,01	11,9	6,11	6,08	0,5	1,32	2,06	0,57	30	2,9
6	14,56	13,02	11,8	6,11	6,08	0,5	1,49	2,06	0,57	33	3,3
7	14,60	13,06	11,8	6,11	6,08	0,5	1,32	2,05	0,57	30	2,9
8	14,68	13,12	11,9	6,11	6,08	0,5	1,54	2,06	0,57	35	3,4
9	14,56	13,03	11,7	6,11	6,08	0,5	1,32	2,06	0,57	30	2,9
10	14,60	13,04	12,0	6,11	6,08	0,5	1,75	2,06	0,58	38	3,7
M			11,8			0,5				31	3,1
DP			0,2			0,0				3	0,3
I			0,1			0,0				2	0,2

A Tabela 5-23 e a Tabela 5-24 39 mostram os dados da queima realizada à 950°C durante 3 horas.

Tabela 5-23 - Ensaio realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor: vermelho

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	4,46	8,11	7,29	11,2	22,5	2,00	6,08	5,89	3,1	3,6
2	4,13	7,5	6,80	10,3	20,8	2,02	6,08	5,88	3,3	3,8
3	4,32	7,92	7,12	11,2	22,2	1,98	6,08	5,89	3,1	3,6
4	3,40	6,49	5,85	10,9	20,7	1,89	6,08	5,91	2,7	3,2
5	4,01	7,36	6,60	11,5	22,7	1,97	6,08	5,92	2,6	3,1
6	4,15	7,59	6,81	11,5	22,7	1,98	6,08	5,92	2,7	3,1
7	3,60	6,69	6,03	10,9	21,4	1,95	6,08	5,92	2,7	3,1
8	4,20	7,84	7,05	11,2	21,7	1,94	6,08	5,94	2,4	2,8
9	4,01	7,36	6,60	11,5	22,7	1,97	6,08	5,94	2,3	2,8
10	3,73	7,00	6,31	10,9	21,1	1,93	6,08	5,94	2,2	2,7
M				11,1	21,8	1,96			2,7	3,2
DP				0,4	0,8	0,04			0,4	0,4
I				0,3	0,6	0,03			0,3	0,3

Tabela 5-24 - Ensaio realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor: vermelho

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm ²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	7,79	1,98	0,54	205	20,1	13,12	12,51	4,6
2	8,51	1,97	0,53	229	22,5	13,08	12,45	4,8
3	7,70	1,98	0,54	202	19,8	13,15	12,53	4,7
4	8,69	1,98	0,56	211	20,7	13,08	12,45	4,8
5	8,38	1,99	0,54	213	20,9	13,19	12,57	4,7
6	7,98	1,99	0,53	211	20,7	13,06	12,43	4,8
7	7,48	1,99	0,54	191	18,7	13,14	12,51	4,8
8	8,39	2,00	0,55	208	20,4	13,12	12,49	4,8
9	8,28	2,00	0,54	216	21,2	13,09	12,46	4,8
10	8,22	2,00	0,54	210	20,6	13,06	12,43	4,8
M				210	20,6			4,8
DP				10	1,0			0,1
I				7	0,7			0,0

A Tabela 5-25 e a Tabela 5-26 mostram os dados da queima realizada à temperatura de 1000°C durante 3 horas.

Tabela 5-25 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas

mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
3,26	5,85	5,41	8,1	17,0	2,09	6,08	5,75	5,4	5,9
3,23	5,77	5,38	7,2	15,4	2,12	6,08	5,64	7,2	7,7
2,86	6,92	6,43	7,6	12,1	1,58	6,08	5,77	5,1	5,6
2,72	4,85	4,52	7,3	15,5	2,12	6,08	5,65	7,1	7,5
3,66	6,23	5,80	7,4	16,7	2,26	6,08	5,62	7,6	8,0
3,97	7,04	6,57	7,2	15,3	2,14	6,08	5,70	6,3	6,7
3,58	6,37	5,91	7,8	16,5	2,12	6,08	5,76	5,3	5,7
3,27	5,74	5,34	7,5	16,2	2,16	6,08	5,60	7,9	8,3
4,08	7,16	6,68	7,2	15,6	2,17	6,08	5,68	6,6	7,0
3,63	6,50	6,03	7,8	16,4	2,10	6,08	5,70	6,3	6,7
			7,5	15,7	2,09			6,5	6,9
			0,3	1,4	0,18			1,0	1,0
			0,2	1,0	0,13			0,7	0,7

Tabela 5-26 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C. Cor: vermelho

CP	P	b	h	TRF (kgf/cm²)	TRF (MPa)	mse	msf	PF (%)
1	10,43	1,92	0,53	290	28,4	12,95	12,45	3,9
2	11,00	1,91	0,52	319	31,3	12,97	12,42	4,2
3	10,70	1,94	0,54	284	27,8	12,97	12,46	3,9
4	10,48	1,90	0,53	295	28,9	13,00	12,42	4,5
5	11,92	1,90	0,53	335	32,9	12,98	12,45	4,1
6	9,34	1,93	0,54	249	24,4	12,97	12,45	4,0
7	11,70	1,94	0,54	310	30,4	13,08	12,53	4,2
8	10,64	1,90	0,52	311	30,5	13,00	12,45	4,2
9	12,22	1,93	0,53	338	33,2	13,01	12,47	4,2
10	11,58	1,93	0,53	320	31,4	13,00	12,46	4,2
M				305	29,9			4,1
DP				27	2,6			0,2
I				19	1,9			0,1

A Tabela 5-27 e a Tabela 5-28 mostram os dados da queima realizada à 1050°C durante 3 horas.

Tabela 5-27 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas

mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA(g/cm³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
3,36	5,85	5,84	0,2	0,4	2,35	6,08	5,06	16,7	17,2
3,68	6,5	6,49	0,2	0,4	2,30	6,08	5,06	16,7	17,2
3,24	5,66	5,64	0,4	0,8	2,33	6,08	5,06	16,7	17,2
3,43	5,83	5,82	0,2	0,4	2,43	6,08	5,05	16,9	17,3
4,43	7,48	7,45	0,4	1,0	2,44	6,08	5,05	16,9	17,3
3,45	5,85	5,82	0,5	1,2	2,43	6,08	5,05	16,9	17,3
3,85	6,53	6,50	0,5	1,1	2,43	6,08	5,05	16,9	17,3
4,24	7,34	7,32	0,3	0,6	2,36	6,08	5,06	16,7	17,2
3,73	6,28	6,25	0,5	1,2	2,45	6,08	5,05	16,9	17,3
3,55	6,00	5,97	0,5	1,2	2,44	6,08	5,05	16,9	17,3
			0,3	0,8	2,39			16,8	17,3
			0,1	0,4	0,05			0,1	0,1
			0,1	0,3	0,04			0,1	0,1

Tabela 5-28 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor:vermelho escuro

CP	P	b	h	TRF(kgf/cm²)	TRF(MPa)	mse	msf	PF(%)
1	15,14	1,92	0,53	421	41,3	13,04	12,31	5,6
2	13,90	1,92	0,54	372	36,5	13,11	12,41	5,3
3	12,60	1,91	0,53	352	34,5	13,12	12,42	5,3
4	13,60	1,88	0,52	401	39,4	13,20	12,50	5,3
5	14,46	1,88	0,52	427	41,8	13,15	12,45	5,3
6	12,16	1,88	0,53	345	33,9	13,15	12,45	5,3
7	15,19	1,88	0,52	448	44,0	13,16	12,46	5,3
8	13,08	1,88	0,53	372	36,4	13,18	12,47	5,4
9	15,68	1,87	0,51	484	47,4	13,18	12,47	5,4
10	14,72	1,86	0,51	456	44,8	13,12	12,40	5,5
M				408	40,0			5,4
DP				47	4,6			0,1
I				34	3,3			0,1

Anexo E

Ensaio com mistura C5 (argila com 5% de lodo de ETA bruto)

A Tabela 5-29 mostra os resultados dos ensaios de secagem, realizada em estufa à temperatura de 110°C durante 24 horas. Os corpos de prova confeccionados para este ensaio apresentam uma cor marrom.

A tensão de resistência à flexão ,TRF, apresentou um valor médio de 3,4MPa, sendo menor que o apresentado pela mistura de argila e lodo moído. À medida que a temperatura de queima aumenta, os valores médios da TRF aumentam.

Tabela 5-29 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom

CP	mu	ms	U(%)	lu	ls	CLS(%)	P	b	h	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)
1	14,62	13,00	12,5	6,11	6,08	0,5	1,56	2,06	0,57	35	3,4
2	14,58	12,99	12,2	6,11	6,08	0,5	1,50	2,05	0,58	33	3,2
3	14,59	12,93	12,8	6,11	6,08	0,5	1,64	2,06	0,57	37	3,6
4	14,62	13,00	12,5	6,11	6,08	0,5	1,70	2,06	0,56	39	3,9
5	14,63	12,96	12,9	6,11	6,08	0,5	1,64	2,05	0,56	38	3,8
6	14,68	13,02	12,7	6,11	6,08	0,5	1,31	2,06	0,56	30	3,0
7	14,60	12,94	12,8	6,11	6,08	0,5	1,67	2,06	0,57	37	3,7
8	14,69	13,02	12,8	6,11	6,08	0,5	1,67	2,05	0,58	36	3,6
9	14,62	12,97	12,7	6,11	6,08	0,5	1,39	2,05	0,58	30	3,0
10	14,62	12,99	12,5	6,11	6,08	0,5	1,25	2,05	0,57	28	2,8
M			12,7			0,5				34	3,4
DP			0,2			0,0				4	0,4
I			0,2			0,0				3	0,3

A Tabela 5-30 e A Tabela 5-31 mostram os dados da queima realizada à 950°C durante 3 horas.

Tabela 5-30 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor:vermelho

CP	mi	mu	ms	AA (%)	PA (%)	MEA (g/cm ³)	ls	lq	CLQ (%)	CLT (%)
1	3,27	6,17	5,57	10,8	20,7	1,92	6,08	5,84	3,9	4,4
2	4,29	7,84	7,13	10,0	20,0	2,01	6,08	5,81	4,4	4,9
3	3,53	6,5	5,88	10,5	20,9	1,98	6,08	5,83	4,1	4,5
4	4,08	7,49	6,78	10,5	20,8	1,99	6,08	5,88	3,3	3,8
5	3,99	7,40	6,67	10,9	21,4	1,96	6,08	5,89	3,1	3,6
6	4,14	7,61	6,88	10,6	21,0	1,98	6,08	5,87	3,5	4,0
7	3,54	6,52	5,88	10,9	21,5	1,97	6,08	5,90	2,9	3,4
8	4,18	7,83	7,05	11,1	21,4	1,93	6,08	5,91	2,8	3,2
9	4,20	7,54	6,85	10,1	20,7	2,05	6,08	5,93	2,5	3,0
10	3,82	7,15	6,45	10,9	21,0	1,94	6,08	5,92	2,7	3,1
M				10,6	20,9	1,97			3,3	3,8
DP				0,4	0,4	0,04			0,7	0,7
I				0,3	0,3	0,03			0,5	0,5

Tabela 5-31 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C

CP	P	b	h	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	mse	msf	PF (%)
1	8,80	1,96	0,55	223	21,8	13,03	12,37	5,1
2	9,16	1,94	0,54	247	24,2	13,02	12,37	5,0
3	8,10	1,95	0,54	215	21,1	13,10	12,45	5,0
4	7,62	1,97	0,54	202	19,8	13,02	12,37	5,0
5	8,18	1,98	0,54	211	20,7	13,04	12,40	4,9
6	8,48	1,96	0,53	231	22,6	13,04	12,41	4,8
7	7,52	1,98	0,54	194	19,0	13,07	12,44	4,8
8	8,00	1,99	0,54	209	20,5	13,01	12,37	4,9
9	7,82	2,00	0,54	202	19,8	13,09	12,46	4,8
10	8,20	1,99	0,54	212	20,8	13,03	12,38	5,0
M				214	21,0			4,9
DP				15	1,5			0,1
I				11	1,1			0,1

A Tabela 5-32 e a Tabela 5-33 mostram os dados da queima realizada à 1000°C durante 3 horas.

Tabela 5-32 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA (g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,28	5,91	5,65	4,6	9,9	2,15	6,08	5,69	6,4	6,9
2	3,53	6,21	5,92	4,9	10,8	2,21	6,08	5,66	6,9	7,4
3	3,72	6,49	6,24	4,0	9,0	2,25	6,08	5,60	7,9	8,3
4	3,75	6,78	6,50	4,3	9,2	2,15	6,08	5,74	5,6	6,1
5	3,22	5,80	5,55	4,5	9,7	2,15	6,08	5,75	5,4	5,9
6	4,60	8,12	7,73	5,0	11,1	2,20	6,08	5,77	5,1	5,6
7	4,04	7,18	6,85	4,8	10,5	2,18	6,08	5,69	6,4	6,9
8	2,97	5,39	5,15	4,7	9,9	2,13	6,08	5,71	6,1	6,5
9	4,00	6,97	6,68	4,3	9,8	2,25	6,08	5,72	5,9	6,4
10	4,24	7,36	7,03	4,7	10,6	2,25	6,08	5,64	7,2	7,7
M				4,6	10,1	2,19			6,3	6,8
DP				0,3	0,7	0,05			0,9	0,9
I				0,2	0,5	0,03			0,6	0,6

Tabela 5-33 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C Cor:vermelho

CP	P	b	h	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	mse	msf	PF(%)
1	8,86	1,90	0,52	259	25,4	12,81	12,29	4,1
2	9,78	1,91	0,52	284	27,9	12,93	12,41	4,0
3	9,82	1,88	0,51	301	29,5	12,85	12,32	4,1
4	8,78	1,92	0,52	254	24,9	12,90	12,35	4,3
5	7,70	1,93	0,53	213	20,9	12,87	12,35	4,0
6	10,30	1,91	0,51	311	30,5	12,88	12,33	4,3
7	6,88	1,90	0,51	209	20,5	12,86	12,33	4,1
8	9,18	1,93	0,53	254	24,9	12,93	12,39	4,2
9	9,90	1,89	0,52	291	28,5	12,91	12,38	4,1
10	8,40	1,89	0,52	247	24,2	12,90	12,45	3,5
M				262	25,7			4,1
DP				35	3,4			0,2
I				25	2,4			0,2

A Tabela 5-34 e a Tabela 5-35 mostram os dados da queima realizada à 1050°C durante 3 horas.

Tabela 5-34 - Dados da terceira queima a 1050°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA (g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,84	6,73	6,70	0,4	1,0	2,32	6,08	5,06	16,8	17,2
2	3,74	6,62	6,61	0,2	0,3	2,30	6,08	5,06	16,8	17,2
3	3,68	6,38	6,35	0,5	1,1	2,35	6,08	5,06	16,8	17,2
4	3,74	6,47	6,44	0,5	1,1	2,36	6,08	5,06	16,8	17,2
5	3,54	6,15	6,14	0,2	0,4	2,35	6,08	5,06	16,8	17,2
6	3,07	5,37	5,36	0,2	0,4	2,33	6,08	5,06	16,8	17,2
7	3,76	6,48	6,45	0,5	1,1	2,37	6,08	5,05	16,9	17,3
8	3,94	6,77	6,74	0,4	1,1	2,38	6,08	5,05	16,9	17,3
9	3,79	6,52	6,48	0,6	1,5	2,37	6,08	5,06	16,8	17,2
10	3,52	6,05	6,01	0,7	1,6	2,38	6,08	5,06	16,8	17,2
M				0,4	1,0	2,35			16,8	17,2
DP				0,2	0,4	0,03			0,1	0,1
I				0,1	0,3	0,02			0,0	0,0

Tabela 5-35 - Ensaio realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor: vermelho escuro

CP	P	b	h	TRF (kgf/cm²)	TRF (MPa)	mse	msf	PF(%)
1	13,20	1,93	0,54	352	34,5	13,05	12,35	5,4
2	12,98	1,91	0,53	363	35,6	13,09	12,38	5,4
3	11,76	1,91	0,53	329	32,2	13,02	12,34	5,2
4	11,48	1,90	0,53	323	31,6	13,09	12,39	5,3
5	10,34	1,90	0,52	302	29,6	13,05	12,35	5,4
6	11,71	1,88	0,52	346	33,9	13,08	12,39	5,3
7	10,48	1,88	0,52	309	30,3	13,04	12,34	5,4
8	10,12	1,88	0,51	310	30,4	13,03	12,33	5,4
9	11,11	1,87	0,51	343	33,6	13,06	12,36	5,4
10	12,50	1,89	0,52	367	36,0	13,09	12,38	5,4
M				334	32,8			5,4
DP				23	2,3			0,1
I				17	1,6			0,0

Anexo F

Ensaio com mistura C10 (argila com 10% de lodo de ETA bruto)

A Tabela 5-36 mostra os resultados dos ensaios de secagem, realizada em estufa à temperatura de 110°C durante 24 horas. Os corpos de prova confeccionados para este ensaio apresentam uma cor marrom.

A tensão de resistência à flexão ,TRF, apresentou um valor médio de 2,5MPa, sendo o menor valor apresentado de todas as misturas de argila e lodo de ETA. À medida que a temperatura de queima aumenta, os valores médios da TRF aumentam.

Tabela 5-36 - Resultado do ensaio de secagem a 110°C/24horas – Cor:Marrom

CP	mu	ms	U(%)	lu	ls	CLS(%)	P	b	h	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)
1	14,61	12,90	13,3	6,11	6,08	0,5	1,02	2,06	0,58	22	2,2
2	14,61	12,90	13,3	6,11	6,08	0,5	1,28	2,06	0,59	27	2,6
3	14,64	12,92	13,3	6,11	6,08	0,5	1,00	2,06	0,57	22	2,2
4	14,63	12,93	13,1	6,11	6,08	0,5	1,18	2,06	0,59	25	2,4
5	14,64	12,93	13,2	6,11	6,08	0,5	1,20	2,06	0,59	25	2,5
6	14,63	12,91	13,3	6,11	6,08	0,5	1,24	2,06	0,58	27	2,6
7	14,59	12,88	13,3	6,11	6,08	0,5	1,21	2,05	0,58	26	2,6
8	14,66	12,96	13,1	6,11	6,08	0,5	1,12	2,06	0,58	24	2,4
9	14,60	12,91	13,1	6,11	6,08	0,5	1,38	2,06	0,59	29	2,8
10	14,64	12,93	13,2	6,11	6,08	0,5	1,24	2,06	0,58	27	2,6
M			13,2			0,5				25	2,5
DP			0,1			0,0				2	0,2
I			0,1			0,0				2	0,1

A Tabela 5-37 e a Tabela 5-38 mostram os dados da queima realizada à 950°C durante 3 horas.

Tabela 5-37 – Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA (g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,60	6,73	6,02	11,8	22,7	1,92	6,08	5,90	2,9	3,4
2	4,55	8,25	7,42	11,2	22,4	2,01	6,08	5,86	3,6	4,1
3	4,46	8,07	7,25	11,3	22,7	2,01	6,08	5,84	3,9	4,4
4	4,08	7,47	6,75	10,7	21,2	1,99	6,08	5,88	3,3	3,8
5	4,07	7,59	6,80	11,6	22,4	1,93	6,08	5,90	3,0	3,5
6	3,74	6,96	6,23	11,7	22,7	1,93	6,08	5,90	3,0	3,5
7	3,81	7,17	6,42	11,7	22,3	1,91	6,08	5,92	2,6	3,1
8	4,05	7,51	6,75	11,3	22,0	1,95	6,08	5,90	3,0	3,4
9	3,51	6,63	5,95	11,4	21,8	1,91	6,08	5,92	2,6	3,1
10	4,19	7,82	7,02	11,4	22,0	1,93	6,08	5,93	2,5	3,0
M				11,4	22,2	1,95			3,1	3,5
DP				0,3	0,5	0,04			0,5	0,5
I				0,2	0,3	0,03			0,3	0,3

Tabela 5-38 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 950°C. Cor: vermelho

CP	P	b	h	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	mse	msf	PF(%)
1	6,75	1,98	0,55	169	16,6	12,99	12,22	5,9
2	6,40	1,97	0,55	161	15,8	12,98	12,21	5,9
3	7,30	1,96	0,55	185	18,1	13,00	12,23	5,9
4	7,50	1,97	0,55	189	18,5	13,08	12,32	5,8
5	7,08	1,98	0,55	177	17,4	13,01	12,23	6,0
6	5,15	1,98	0,55	129	12,6	13,00	12,27	5,6
7	7,00	1,99	0,55	172	16,9	13,03	12,24	6,1
8	6,75	1,98	0,55	169	16,6	13,01	12,24	5,9
9	7,20	1,99	0,56	173	17,0	13,03	12,26	5,9
10	6,00	2,00	0,56	144	14,1	13,00	12,24	5,8
M				167	16,4			5,9
DP				18	1,8			0,1
I				13	1,3			0,1

A Tabela 5-39 e a Tabela 5-40 mostram os dados da queima realizada à 1000°C durante 3 horas

Tabela 5-39 - Dados da queima a 1000°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA (g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	3,38	6,07	5,63	7,8	16,4	2,09	6,08	5,70	6,3	6,7
2	3,97	7,12	6,61	7,7	16,2	2,10	6,08	5,66	6,9	7,4
3	3,38	6,09	5,63	8,2	17,0	2,08	6,08	5,76	5,3	5,7
4	4,29	7,78	7,13	9,1	18,6	2,04	6,08	5,78	4,9	5,4
5	3,40	6,17	5,64	9,4	19,1	2,04	6,08	5,74	5,6	6,1
6	3,45	6,11	5,65	8,1	17,3	2,12	6,08	5,75	5,4	5,9
7	3,87	6,97	6,44	8,2	17,1	2,08	6,08	5,71	6,1	6,5
8	3,55	6,46	5,92	9,1	18,6	2,03	6,08	5,71	6,1	6,5
9	3,91	7,19	6,50	10,6	21,0	1,98	6,08	5,80	4,6	5,1
10	3,31	6,00	5,54	8,3	17,1	2,06	6,08	5,72	5,9	6,4
M				8,7	17,8	2,06			5,7	6,2
DP				0,9	1,5	0,04			0,7	0,7
I				0,6	1,1	0,03			0,5	0,5

Tabela 5-40 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1000°C Cor: vermelho

CP	P	b	h	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	mse	msf	PF(%)
1	6,80	1,90	0,53	191	18,7	12,84	12,19	5,1
2	6,24	1,92	0,53	174	17,0	12,85	12,20	5,1
3	8,56	1,93	0,54	228	22,4	12,85	12,22	4,9
4	7,18	1,94	0,54	190	18,7	12,87	12,25	4,8
5	7,12	1,93	0,54	190	18,6	12,88	12,24	5,0
6	8,54	1,90	0,53	240	23,5	12,93	12,28	5,0
7	8,80	1,92	0,53	245	24,0	12,82	12,20	4,8
8	7,72	1,91	0,53	216	21,2	12,83	12,19	5,0
9	6,72	1,95	0,53	184	18,0	12,84	12,21	4,9
10	7,92	1,92	0,53	220	21,6	12,86	12,22	5,0
M				208	20,4			5,0
DP				25	2,5			0,1
I				18	1,8			0,1

A Tabela 5-41 e a Tabela 5-42 mostram os dados da queima realizada à 1050°C durante 3 horas.

Tabela 5-41 - Dados da queima a 1050°C durante 3 horas

CP	mi	mu	ms	AA(%)	PA(%)	MEA (g/cm ³)	ls	lq	CLQ(%)	CLT(%)
1	4,03	6,90	6,76	2,1	4,9	2,36	6,08	5,05	16,9	17,3
2	3,59	6,19	6,06	2,1	5,0	2,33	6,08	5,05	16,9	17,3
3	3,56	6,09	5,97	2,0	4,7	2,36	6,08	5,05	16,9	17,3
4	3,72	6,36	6,23	2,1	4,9	2,36	6,08	5,05	16,9	17,3
5	3,74	6,38	6,26	1,9	4,5	2,37	6,08	5,05	16,9	17,3
6	3,36	5,78	5,65	2,3	5,4	2,33	6,08	5,06	16,8	17,2
7	3,70	6,32	6,16	2,6	6,1	2,35	6,08	5,05	16,9	17,3
8	3,44	5,86	5,74	2,1	5,0	2,37	6,08	5,05	16,9	17,3
9	3,07	5,25	5,13	2,3	5,5	2,35	6,08	5,05	16,9	17,3
10	4,07	6,96	6,78	2,7	6,2	2,35	6,08	5,05	16,9	17,3
M				2,2	5,2	2,35			16,9	17,3
DP				0,2	0,6	0,01			0,1	0,1
I				0,2	0,4	0,01			0,0	0,0

Tabela 5-42 - Ensaios realizados após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1050°C. Cor: vermelho escuro

CP	P	b	h	TRF (kgf/cm ²)	TRF (MPa)	mse	msf	PF(%)
1	10,11	1,87	0,52	300	29,4	13,00	12,25	5,8
2	10,76	1,88	0,54	294	28,9	12,97	12,21	5,9
3	10,10	1,87	0,53	288	28,3	13,03	12,28	5,8
4	9,88	1,86	0,53	284	27,8	13,04	12,28	5,8
5	10,22	1,85	0,51	319	31,2	13,00	12,24	5,8
6	9,81	1,86	0,53	282	27,6	13,03	12,28	5,8
7	10,11	1,87	0,53	289	28,3	13,00	12,24	5,8
8	9,08	1,87	0,53	259	25,4	13,03	12,26	5,9
9	9,70	1,87	0,52	288	28,2	12,97	12,21	5,9
10	8,84	1,86	0,52	264	25,9	13,02	12,25	5,9
M				287	28,1			5,8
DP				17	1,7			0,1
I				12	1,2			0,0

Referências Bibliográficas

¹ G. E. Oliveira, J.N.F. Holanda **“Reaproveitamento de Resíduo Sólido proveniente de setor siderúrgico em Cerâmica Vermelha”** Cerâmica, **50** (2004) 75 - 80

² S.Cosin, V.de F.J.Kozievitch, D.T.Tavares, M.M.G.R.Vianna,S.M.Toffoli, P.de Souza santos, F.R.Valenzuela diaz. **“Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água a massa Cerâmica”** Anais do 46º congresso Brasileiro de Cerâmica – São Paulo SP (2002) 26 - 29.

³ Airton Checoni David, Marcelo Kenji Miki, Américo de Oliveira Sampaio, Antonio Mendes Batista Neto. **“ Incorporação de Lodo da ETA/Cubatão na industria de bloco cerâmico”**.

⁴ Chit human Weng, Deng Fong lin, Pen Chi Chiang. **“Utilization of sludge as brick materials”** Advances in Enviromental Research n° 679, 685. 2003

⁵ F. Fernando Figueiredo, A. Nuvolari. **Uso de lodo de Estação de tratamento de água na fabricação de tijolos cerâmicos maciços**, Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, Florianópolis, SC (2004).

⁶ Ivana Suely Soares dos Santos, Marcus Vinicius Valeta Ramires, Cláudio S. kazmierczak, Heitor da Costa Silva, Sandro Adriani Camargo. **“Reciclagem do resíduo do lodo**

da estação de tratamento de água do município de São Leopoldo – RS, visando a produção de componentes cerâmicos”. Anais do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica– Florianópolis – SC (2001).

⁷ C. G. Mothé, A. Câmara Jr, H. F. Mothé Filho, **Utilização de Lodo Residual do tratamento de Água para a indústria da Cerâmica Vermelha**, Anais do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Curitiba, PR, Junho (2004).

⁸ Wag, Yuzhu. **Condicionamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água: Estudo de caso**. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica USP-São Paulo 1996.p. 1 à 15, 50 à 53

⁹ M.A.P. Reali./**Coordenação Programa de Pesquisa de Saneamento Básico**, Noções Gerais de Tratamento e Disposição final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. Rio de Janeiro PROSAB, 1999. p. 1à 18.

¹⁰ Milton Tomoyuki Tsutitya, Angelical Yumi Hirata. **Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água da Estado de São Paulo**. Anais do 21º congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. P. 1 à 9

¹¹ S.Cosin, V.de F.J.Kozievitch, D.T.Tavares, M.M.G.R.Vianna, S.M.Toffoli, P.de Souza Santos, F.R.Valenzuela Diaz. **Incorporação de lodo de tratamento de água a massa cerâmica**. Anais da 46º Congresso Brasileiro de Cerâmica– São Paulo – SP (2002).

¹² O.R.K. Montedo, G.M.Reitz, F.M.Bertan, Rosará Piccli, D.Hotza, A.P.Novaes de Oliveira. **“Utilização de Pó de Aciaria em massa de Cerâmica Vermelha.”** Cerâmica Industrial, Setembro/Dezembro, 2003.

¹³ R.P.S.Dutra, L.R. de Araújo Pontes. **“Obtenção e análises de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico”** Cerâmica 48 (308) (2002).

¹⁴ P.F. Fernandes, A.P.N. Oliveira, D.Hotza. **“Reciclagem do lodo da Estação de Tratamento de Efluentes de uma indústria de Revestimentos Cerâmicos. Parte 1: Ensaio Laboratoriais”** Cerâmica Industrial, 8 (2) Março/Abril 2003.

¹⁵ Vitor T. Balaton, Paulo S. Gonçalves e Luciana M. Ferrer. **“Incorporação de Resíduos Sólidos Galvânicos em Massas de Cerâmica Vermelha”**. Cerâmica Industrial, 7 (6) Novembro/Dezembro, 2002

¹⁶ J.M.F. Ferreira, S.M. Olhero. **“Al-rich sludge treatments towards recycling”**. Journal of the European Ceramic society, 22 (2002) 2243-2249

¹⁷ M.J.ribeiro, D.U. Tulyaganov, J.M. Ferreira, J.A. Labrincha. **“Recycling of Al-rich industrial sludge in refractory ceramic pressed bodies”** Ceramics International 28 (2002) 319-326.

¹⁸ N.J. Saikia, P.Sengupta, D.K.Dutta, P.C. Saikia and P. C. Borthakur. **“Oil Field sludge Used to Make Brick”** American Ceramic Society Bulletin July 2000

¹⁹ R.S. Santos, G.P.Souza, J.N.F. Holanda. **”Caracterização de massas argilosas contendo resíduo proveniente do setor petrolífero e sua utilização em cerâmica industrial”** Cerâmica 48 (307) 2002.

²⁰ G.P. Souza, J.N.F. Holanda. **”Comportamento de sinterização de massas argilosas contendo resíduo do setor petrolífero”** Cerâmica 49 (2003) 128-132

²¹ C.P.F. dos Santos, D.M.A. Melo, M.A.F. Melo, e.V. Sobrinho. **“Caracterização e usos de argilas Betonitas e Vermiculitas para adsorção de cobre (II) em solução”**. Cerâmica 48(308) 2002.

²²Oliveira Maria Regina Cardoso de **Dissertação de Mestrado: Caracterização, Classificação e Reciclagem do Resíduo Sólido - Pó de balão - Gerado na industria siderúrgica de Ferro Gusa não integrada a carvão vegetal e seu aproveitamento Tecnológico na fabricação de tijolos cerâmicos vermelhos para uso na construção civil. Estudo de um caso na região de Sete Lagoas – Minas Gerais –** Ouro Preto, 2002 Universidade Federal de Ouro Preto, p. 45 – 56, 70 – 85.

²³ W.D.Kingery, H.K.Bowen, D.R.Uhlmann. **“Introduction to Ceramics”** Second edition. Ed A Wiley – Interscience Publication, Jonh Wiley & Sons – New York, p. 101 – 132.

²⁴ Willian D. Callister,Jr. **“Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução”** 5ª edição. Ed LTC, p. 291 – 301.

²⁵ Santos, P.S **“Tecnologia de Argilas , aplicadas às argilas brasileiras, Vol.1-Fundamentos”**., Edgar Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, SP, 1975. p. 1 - 15, 19 - 27, 153 - 157, 164, 165, 170, 173, 176 - 185, 189 – 203.

²⁶ J. R. Brophy, R. M. Rose, J.Wulff. **“Ciências dos materiais”** vol 2 – Prop. Termodinâmicas. Págs 114 à 117. Ed. Livros técnicos e científicos, Rio, 1977. p. 112 – 117.

²⁷ Ângelus Giuseppe Pereira da Silva, Clodomiro Alves Júnior, **Cerâmica** 44, 289 (1998) 171.

²⁸ Santos, P.S **“Tecnologia de Argilas , aplicadas às argilas brasileiras, Vol.2-Fundamentos”**., Edgar Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, SP, 1975, p. 17, 392 – 397.

²⁹ **ABNT, NBR MB 305**, Determinação da Retração Linear (1984).

³⁰ L.Barzaghi, A.Salge, **Cerâmica** 28, 151 (1982) 291

³¹ Pólo Produções, **Anuário Brasileiro de Cerâmica Vermelha**,Ed.: J.L.Francisco, Criciúma, SC (2000) 36. (Rec. 15/08/2002, Rev. 14/10/03, Ac. 27/02/04)

³² C. M. F. Vieira, J. N. F. Holanda, D. G. Pinatti, Cerâmica 46,297 (2000) 15.

³³ Pólo Produções, Anuário Brasileiro de Cerâmica Vermelha, Ed.: J.L.Francisco, Criciúma, SC (2000) 36. (Rec. 15/08/2002, Rev. 14/10/03, Ac. 27/02/04)

³⁴ J.A. Cusidó, L.V.Cremades, M.Gonzáles. “Gaseous emissions from ceramics manufactured with urban sewage sludge during firing processes.” Waste management 23 (2003) 273-280.

³⁵ Achon. L.C, Cordeiro.J.S. “Gerenciamento de Lodo de ETAs – Remoção de água livre através de leitos de secagem e lagoas”. ABES- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. (2003).

³⁶ Lora Frederico de “Control de calidad y tratamiento de água”. Tradução para o Espanhol de “The American Water works Association”. Instituto de administracion Local. Madrid, (1975), p. 74 – 79.

³⁷ Macedo Filho Allyrio. Castelo Branco Zadir. Tradutores de “American Water Works Assocaition” Centro de publicações técnicas da aliança – Missão Norte Americana de cooperação econômica e técnica no Brasil – USAID. Rio de Janeiro RJ (1964), p.131 - 162.

³⁸ Hardenberg.A.W, **“Abastecimento e purificação da água”** ED. Associação Interamericana de Engenharia Sanitária, Terceira Edição – (1964) p. 271 - 279.

³⁹ Fair.M.G, Geyer.C.J, Okun.A.D, **“Purificacoin de águas y tratamento y remocoin de águas residuales”**, Editorial Limusa – México – 1973 p. 187 - 188, 195 - 196.

⁴⁰ Babbitt E.Harold, Poland.J.James, Cleasby.L.John, **“Abastecimento de água”** – Tradução de Zadir Castelo Branco – Ed: Edgard Blücher Ltda, p. 362 - 365.

⁴¹ **Gerenciamento Ambiental Técnicas & tecnologias** – Ano 2 n°.9 – 2000 p. 16 - 17.

⁴²Wag, Yuzhu. **Condicionamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água: Estudo de caso.** Escola Politécnica USP-São Paulo SP, (1996).p. 1 - 15, 50 - 53

⁴³ M.A.P. Reali./Coordenação Programa de Pesquisa de Saneamento Básico, **Noções Gerais de Tratamento e Disposição final de Lodos de Estações de Tratamento de Água.** Rio de Janeiro PROSAB, (1999). p. 1 - 18

⁴⁴M.A.P. Reali./Coordenação Programa de Pesquisa de Saneamento Básico, Noções Gerais de Tratamento e Disposição final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. **Cap 2 “Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETA”.** Rio de Janeiro PROSAB, (1999). p. 21 – 39.

⁴⁵ Milton Tomoyuki Tsutitya, Angelical Yumi Hirata. **Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água da Estado de São Paulo**. 21º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental., p. 1 - 9.

⁴⁶ Oliveira. E. Walter, Gaglianone. Sebastião, Yassuda. R. Eduardo, Nogami. S. Paulo, Pareira. B. E. Benedito, Martins. A. José – **“Técnica de abastecimento e tratamento de água”**– Abastecimento de Água. 2ª Edição revisada Vol.1 (1978), CETESB São Paulo SP p. 29 - 44.

⁴⁷ Documento COPASA - **Produção de água para a Região Metropolitana de Belo Horizonte**

⁴⁸ **NBR 10.004** – Resíduos Sólidos Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, setembro 1987.

⁴⁹ ABNT, NBR 7181 – 4, Solo: Análise Granulométrica (1984).

⁵⁰ J.N.F. Holanda. C. M. F. Vieira, **Mundo Cerâmico** 82 (2002) 29

⁵¹ Associação Brasileira de Cerâmica, www.abceram.org.br (2002).