

**DESENVOLVIMENTO DE PAVIMENTO ARGILOSO EXTRUDADO:
ADOQUIM CERÂMICO**

REGINA MARIA PINHEIRO

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES / RJ
AGOSTO – 2012**

**DESENVOLVIMENTO DE PAVIMENTO ARGILOSO EXTRUDADO:
ADOQUIM CERÂMICO**

REGINA MARIA PINHEIRO

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais”.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente
Orientador: Prof. Dr. Carlos Maurício Fontes Vieira

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
AGOSTO – 2012
DESENVOLVIMENTO DE PAVIMENTO ARGILOSO EXTRUDADO:
ADOQUIM CERÂMICO**

REGINA MARIA PINHEIRO

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais”.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente

Aprovada em 17 de agosto de 2012.

Comissão Examinadora:

Prof. Jonas Alexandre (D.Sc., Engenharia Civil) - UENF

Prof. Regina Coeli Martins Paes Aquino (D.Sc., Eng. e Ciências dos Materiais) - IFF

Prof. Luis Marcelo Marques Tavares (Ph.D., Eng. Metalúrgica) - UFRJ

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira (D.Sc., Eng. e Ciências dos Materiais) – UENF
Orientador

AGRADECIMENTOS

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor Carlos Maurício Fontes Vieira, por sua compreensão e orientação.

Aos professores Sergio Neves e Rubén Sánchez, pela credibilidade e apoio para a realização desta tese.

Aos professores Eduardo Atem, Jonas Alexandre e Gustavo Xavier pela ajuda prestada.

A Luciano Cordeiro de Oliveira pelo companheirismo incondicional, ajuda, paciência, carinho e dedicação.

A Verônica pela convivência, amizade e grande ajuda no decorrer deste trabalho.

A meus amigos, Elaine Aparecida, Djalma Souza e Mônica Manhães pela amizade e ajuda prestada.

A meus familiares por terem me ajudado a chegar até aqui.

A UENF pela estrutura física e oportunidade oferecida para a realização do doutorado.

A COPPE/UFRJ, pela disponibilidade de equipamentos imprescindíveis à realização deste estudo.

A Faperj pelo apoio financeiro.

Às Cerâmicas Stilbe Ltda e Sardinha Ltda.

A todos muito obrigada!

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABELAS	XIV
RESUMO.....	XV
ABSTRACT	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
2.3. Justificativas	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. A indústria cerâmica	4
3.2. O segmento de cerâmica vermelha	5
3.2.1. Matérias-primas.....	6
3.2.2. Massa cerâmica	13
3.2.3. Processo de produção de cerâmica vermelha	14
3.4. Pólo Cerâmico Campista	20
3.4.1. Aspectos geomorfológicos e geológicos de Campos dos Goytacazes	21
3.4.2. Argilas de Campos dos Goytacazes	22
3.5. Pavimentos	26
3.5.1. Pavimentos intertravados	26
3.6. Adoquim cerâmico	30
3.6.1. Processamento	34
3.6.2. Classificação	35
3.6.3. Legislação e propriedades tecnológicas	37
3.7. Considerações finais.....	40
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
4.1. Materiais	43
4.2. Métodos	43
I. Teste Laboratorial.....	44
4.2.1. Beneficiamento das matérias-primas	44
4.2.2. Caracterização das matérias-primas.....	44

4.2.2.1. Difração de Raios-X (DRX)	44
4.2.2.2. Composição química	44
4.2.2.3. Análises Térmicas (ATD/TG/DTG)	45
4.2.2.4. Dilatometria	45
4.2.2.5. Distribuição de tamanho de partículas	45
4.2.2.6. Microscopia ótica (MO)	46
4.2.2.7. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	46
4.2.3. Preparação das formulações.....	46
4.2.3.1. Plasticidade	47
4.2.4. Processamento dos corpos de prova	47
4.2.5. Ensaio físicos e mecânicos	48
4.2.6. Análise microestrutural.....	50
II. Teste industrial	51
4.2.7. Processo de confecção do adoquim cerâmico.....	52
4.2.8. Propriedades tecnológicas	54
4.2.9. Análise microestrutural.....	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
I. Teste Laboratorial.....	57
5.1. Caracterização das matérias-primas	57
5.1.1. Caracterização das argilas.....	57
5.1.1.1. Caracterização mineralógica.....	57
5.1.1.2. Caracterização química.....	61
5.1.1.3. Caracterização física.....	62
5.1.1.4. Caracterização morfológica das argilas	63
5.1.2. Caracterização do Argilito	67
5.1.2.1. Caracterização mineralógica.....	67
5.1.2.2. Caracterização química.....	70
5.1.2.3. Caracterização física.....	71
5.1.2.4 - Caracterização morfológica.....	72
5.2 . Propriedades físicas e mecânicas	74
5.2.1. Plasticidade.....	74
5.2.2. Massa específica aparente das peças secas e queimadas	77

5.2.3. Absorção de água	81
5.2.4. Retração diametral de queima	84
5.2.5. Resistência à compressão uniaxial	87
5.3. Microestrutura das cerâmicas queimadas	91
5.3.1. Microscopia ótica.....	91
5.3.2. Microscopia eletrônica de varredura	96
5.3.4. Difração de raios-X.....	110
II. Teste Industrial	115
5.4. Aspectos gerais	115
5.4.1. Aspectos visuais e de processamento	115
5.4.2. Propriedades físicas e mecânicas.....	116
5.4.3. Resistência ao ataque químico	118
5.4.4. Microscopia ótica das peças industriais e do PPC.....	128
5.4.5. Comparação entre os testes laboratorial e industrial	129
5.4.6. Análise de viabilidade econômica	130
6. CONCLUSÕES	133
7. SUGESTÕES	135
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Principais pólos de cerâmica vermelha das regiões Sul e Sudeste. Fonte: Modificado do Anuário da Associação Brasileira de Cerâmica, 2003.	6
Figura 3.2. Fluxograma de fabricação de cerâmica vermelha. Fonte: Modificado de ABC (2008).	15
Figura 3.3. Localização do município de Campos dos Goytacazes. Fonte: IBGE (2007).	20
Figura 3.4. Difrátograma de raios-X de uma típica argila campista. Fonte: Adaptado de VIEIRA, (2001).	23
Figura 3.5. Localização no Diagrama de Winkler das matérias-primas de Campos dos Goytacazes, W = argila fraca; S = argila forte. Fonte: Monteiro e Vieira (2004).	25
Figura 3.6. Rua calçada com pedra em São João Del Rei – MG Fonte: MÜLLER (2005).	27
Figura 3.7. Rua calçada com pedra em Paraty - RJ. Fonte: MÜLLER (2005).	28
Figura 3.8. Pavimentação com tijolo maciço de argila em Rio Branco – AC. Fonte: NASCIMENTO (2005).	29
Figura 3.9. Exemplificação de implantação dos adoquins cerâmicos. Fonte: BIA (2006).	31
Figura 3.10. Pavimentação na Espanha com adoquim cerâmico: exuberância de cores e formas de implantação. Fonte: MALPESA (2006).	32
Figura 3.11. Ambiente com aspecto rústico e inovador de Orlando, Houston e Columbus – Estados Unidos. Fonte: BIA (2008).	33
Figura 3.12. Estrutura típica de pavimentos intertravados flexíveis. Fonte: Adaptado de MALPESA (2008).	36
Figura 3.13. Implantação dos adoquins cerâmicos como pavimentos flexíveis. Fonte: MALPESA, (2008).	37
Figura 4.1. Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental.	42
Figura 4.2. Jazida de argilito em Itú-SP.	43
Figura 4.3. Argilito (a); Argila forte (b); Argila fraca (c).	51
Figura 4.4. Forno industrial tipo abóboda.	52
Figura 4.5. Processamento industrial do adoquim.	53

Figura 4.6. Ensaio de resistência mecânica (a) adoquim e (b) PPC.	54
Figura 5.1. Difratoograma de raios-X da argila forte. C = caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita; Gi = gibsista; Es = minerais esmectícos.....	58
Figura 5.2. Difratoograma de raios-X da argila fraca. C = caulinita; Q = quartzo; M = mica.....	58
Figura 5.3. Curvas de TG/DTG das argilas.	59
Figura 5.4. Curvas de ATD das argilas.....	60
Figura 5.5. Dilatometria das argilas forte e fraca.....	61
Figura 5.6. Curva de distribuição de tamanho das partículas das argilas fraca e forte. .	63
Figura 5.7. Micrografias obtidas por MO da argila forte. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.....	64
Figura 5.8. Micrografias obtidas por MO da argila fraca. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.....	65
Figura 5.9. Micrografias obtidas por MEV da Argila forte, com análise química pontual por EDS.....	66
Figura 5.10. Micrografias obtidas por MEV da Argila fraca, com análise química pontual por EDS.....	66
Figura 5.11. Difratoograma de raios-X do Argilito. C = caulinita; Q = quartzo; Mm = mineral micáceo; Mi = microclina F _{Pl} = feldspatos plagioclásios.	67
Figura 5.12. Curvas de TG/DTG do argilito.	68
Figura 5.13. Curvas de ATD do argilito.	69
Figura 5.14. Dilatometria do argilito.....	70
Figura 5.15. Curva de distribuição do tamanho de partícula do argilito.....	72
Figura 5.16. Micrografias obtidas por MO da argilito. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.....	73
Figura 5.17. Micrografias obtidas por MEV do argilito, com análise química pontual por EDS.....	74
Figura 5.18. Prognóstico da extrusão por meio dos limites de Atterberg.	76
Figura 5.19. Diagrama de Winkler para as matérias-primas e para as formulações estudadas.....	77
Figura 5.20. Massa específica a seco das formulações na faixa de variação I e II.	78

Figura 5.21. Massa específica de queima das cerâmicas queimadas nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C na faixa de variação I.....	80
Figura 5.22. Massa específica de queima das cerâmicas queimadas nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C na faixa de variação II.....	80
Figura 5.23. Absorção de água das cerâmicas queimadas nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C na faixa de variação I de massa específica.....	83
Figura 5.24. Absorção de água das cerâmicas queimadas nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C na faixa de variação II de massa específica.....	83
Figura 5.25. Retração linear das cerâmicas em função da temperatura de queima na faixa de variação I.	86
Figura 5.26. Retração linear das cerâmicas em função da temperatura de queima na faixa de variação II.	86
Figura 5.27. Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas queimadas a 850, 950 e 1050°C, na faixa de variação I de massa específica.....	89
Figura 5.28. Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas queimadas a 850, 950 e 1050°C, na faixa de variação II de massa específica.....	89
Figura 5.29. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 850°C na faixa de variação I de massa específica. (a) e (b) M; (c) e (d) M50A; (e) e (f) AFO; (g) e (h) AFO50A.....	92
Figura 5.30. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 1050°C na faixa de variação I de massa específica. (a) e (b) M; (c) e (d) M50A; (e) e (f) AFO; (g) e (h) AFO50A.....	93
Figura 5.31. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 850°C na faixa de variação II de massa específica. (a) e (b) M; (c) e (d) M50A; (e) e (f) AFO; (g) e (h) AFO50A.....	94
Figura 5.32. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 1050°C na faixa de variação II de massa específica. (a) e (b) M; (c) e (d) M50A; (e) e (f) AFO; (g) e (h) AFO50A.....	95
Figura 5.33. Micrografias de MEV da cerâmica M queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.	97
Figura 5.34. Micrografias de MEV da cerâmica M50A queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.	98
Figura 5.35. Micrografias de MEV da cerâmica AFO queimada a 850°C na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.	99
Figura 5.36. Micrografias de MEV da cerâmica AFO50A queimada a 850°C na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.	100

Figura 5.37. Micrografias de MEV da cerâmica M queimada a 1050°C na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.	101
Figura 5.38. Micrografias de MEV da cerâmica M50A queimada a 1050°C na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.	102
Figura 5.39. Micrografias de MEV da cerâmica AFO queimada a 1050°C na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.	102
Figura 5.40. Micrografias de MEV da cerâmica AFO50A queimada a 1050°C na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.	103
Figura 5.41. Micrografias de MEV da cerâmica M queimada a 850°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.	104
Figura 5.42. Micrografias de MEV da cerâmica M50A queimada a 850°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.	104
Figura 5.43. Micrografias de MEV da cerâmica AFO queimada a 850°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.	105
Figura 5.44. Micrografias de MEV da cerâmica AFO50A queimada a 850°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.	106
Figura 5.45. Micrografias de MEV da cerâmica M queimada a 1050°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.	107
Figura 5.46. Micrografias de MEV da cerâmica M50A queimada a 1050°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.	108
Figura 5.47. Micrografias de MEV da cerâmica AFO queimada a 1050°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.	108
Figura 5.48. Micrografias de MEV da cerâmica AFO50A queimada a 1050°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.	109
Figura 5.49. Difratoograma de raios-X da cerâmica M queimada a 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo.	110
Figura 5.50. Difratoograma de raios-X da cerâmica M queimada a 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Mu = mulita; Q = quartzo.	111
Figura 5.51. Difratoograma de raios-X da cerâmica M50A queimada a 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; F _{PI} = feldspatos plagioclásios; F _K = feldspatos potássicos.	112

Figura 5.52. Difratoograma de raios-X da cerâmica M50A queimada a 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Mu = mulita; Q = quartzo; F _{PI} = feldspatos plagioclásios; F _K = feldspatos potássicos.	112
Figura 5.53. Difratoograma de raios-X da cerâmica AFO queimada a 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo.	113
Figura 5.54. Difratoograma de raios-X da cerâmica AFO queimada a 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Mu = mulita; Q = quartzo.	113
Figura 5.55. Difratoograma de raios-X da cerâmica AFO50M queimada a 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; F _{PI} = feldspatos plagioclásios; F _K = feldspatos potássicos.	114
Figura 5.56. Difratoograma de raios-X da cerâmica AFO50A queimada a 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Mu = mulita; Q = quartzo; F _{PI} = feldspatos plagioclásios; F _K = feldspatos potássicos.	114
Figura 5.57. PPC para fins comparativos.	115
Figura 5.58. Adoquins produzidos, após secagem (a); após queima (b).	116
Figura 5.59. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Cloreto de amônio (100g/L). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”	121
Figura 5.60. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Hipoclorito de sódio (20g/L). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”	122
Figura 5.61. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Ácido clorídrico 3% (v/v). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”	123
Figura 5.62. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Ácido cítrico (100g/L). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”;	

(d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.....	124
Figura 5.63. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Ácido clorídrico 18% (v/v). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.....	125
Figura 5.64. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Ácido láctico 5% (v/v). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.	126
Figura 5.65. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Hidróxido de potássio (100g/L). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.	127
Figura 5.66. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 950°C, (a) e (b) M; (c) e (d) AFO.....	128
Figura 5.67. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 950°C, (a) e (b) AFO50A.....	129
Figura 5.68. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 950°C. (a) e (b) PPC.	129

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química das argilas “fraca” e “forte”, (SILVEIRA; SILVA, 2000).....	7
Tabela 3.2. Composição química do argilito (VIEIRA; EMILIANO, 2005).....	12
Tabela 3.3. Composição química das argilas de Campos dos Goytacazes	24
Tabela 3.4. Especificações técnicas para os adoquins cerâmicos segundo as normas americana (ASTM) e colombiana (NTC)	38
Tabela 3.5. Características técnicas dos adoquins cerâmicos estabelecidos pela UNE-NE-1344/2002	39
Tabela 3.6. Requisitos físicos para a produção de PPC (ABNT 9781/1987).....	39
Tabela 4.1. Composições estudadas. M – massa argilosa; A – argilito; AFO – argila FO	47
Tabela 4.2. Produtos químicos usados conforme NBR 13818/1997 (Anexo H)	54
Tabela 5.1. Composição química das argilas (% em peso).....	62
Tabela 5.2. Composição química da argilito (% em peso)	71
Tabela 5.3. Massa específica aparente de queima das cerâmicas	79
Tabela 5.4. Propriedades físicas e mecânicas	118
Tabela 5.5. Classificação dos produtos após ataque químico (ABNT 13818, 1997)....	120
Tabela 5.6. Propriedades tecnológicas do teste laboratorial e industrial.....	130
Tabela 5.7. Características do tijolo maciço	131
Tabela 5.8. Preço de venda do PPC por espessura e cor.....	132

RESUMO

PINHEIRO, R. M. **Desenvolvimento de pavimento argiloso extrudado: adoquim cerâmico**. 2012. 148f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

Este estudo teve como objetivo desenvolver um produto cerâmico inovador, ainda pouco difundido no Brasil, que consiste num pavimento argiloso, conhecido como adoquim cerâmico, para aplicações arquitetônicas, edifícios, áreas de pedestres e trânsito veicular em vias públicas. Neste trabalho foram utilizadas como matérias-primas duas argilas do município de Campos dos Goytacazes provenientes de jazidas da cerâmica Stilbe, bem como um argilito, em forma de pó, proveniente da região de Itu – SP, empregado na fabricação de cerâmica estrutural. As matérias-primas foram inicialmente submetidas a ensaios de caracterização mineralógica, química e física por meio de técnicas de difração de raios-X (DRX), fluorescência de raios-X (FRX), análise térmica diferencial e termo-gravimétrica (ATD/TG), sedimentação por peneiramento e gravimetria bem como dilatometria. O estudo consistiu de duas etapas: teste laboratorial e teste industrial. No teste laboratorial, corpos de prova foram confeccionados por prensagem e queimados nas temperaturas de 900 a 1100°C, em intervalos de 50°C. Em seguida os corpos de prova sinterizados foram submetidos a ensaios tecnológicos tais como: massa específica aparente, retração linear na queima, absorção de água e resistência à compressão uniaxial. A avaliação microestrutural foi realizada por meio de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e DRX. O teste industrial consistiu na produção de adoquins cerâmicos em escala industrial na Cerâmica Stilbe Ltda, utilizando a tanto formulação de massa, quanto a temperatura de patamar adequada previamente determinadas nos testes de laboratório. Os resultados indicaram que o argilito possui características favoráveis a incorporação em cerâmica vermelha para a produção de adoquim. O adoquim assim produzido apresentou propriedades tecnológicas aceitáveis para uso em vias de pedestres.

Palavras-chave: adoquim, argilito, cerâmica vermelha.

ABSTRACT

PINHEIRO, R. M. **Extruded clayey pavement development**. 2012. 148f. Thesis (Doctoral) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

This work had as its objective to develop an innovative ceramic product, not yet widespread in Brazil, consisting of a clayey pavement, known as ceramic paver, for architectural applications, buildings, areas of pedestrian and vehicular traffic on public roads. In this work two clays from deposits of the Stilbe Ceramic in the city of Campos dos Goytacazes, state of Rio de Janeiro and an argillite, as a powder, from the city of Itu, state São Paulo, were used as raw materials. These materials were initially subjected to chemical, physical and mineralogical characterization, by X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), thermo-differential and thermo-gravimetric analysis (DTA/TG), as well as sieving and sedimentation by gravity and dilatometry. The study consisted of two steps: laboratory and industrial tests. In the laboratory tests, specimens were press-molded and fired at temperatures from 850 to 1050°C, in intervals of 50°C. The sintered specimens were then subjected to technology tests to obtain the: apparent density, firing linear shrinkage, water absorption and flexural rupture strength. The microstructure of the fired specimens was analyzed by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and XRD. The industrial test consisted of the industrial scale production of ceramic paver in the Stilbe Ceramics, using both the formulation and temperature of the appropriate level determined in the laboratory tests. The results indicated that the argillite has characteristics suitable for incorporation in the red ceramic to produce paver. The as fabricated paver achieved properties proper for use in pedestrian pathways.

Key words: Paver, argillite, red ceramic.

1. INTRODUÇÃO

A atividade cerâmica tem papel importante para economia do país, com participação no Produto Interno Bruto (PIB) estimado em 1%, correspondendo a cerca de 6 bilhões de dólares (ABC, 2010). A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais fizeram com que as indústrias brasileiras evoluíssem rapidamente, elevando muitos produtos de diversos segmentos cerâmicos aos padrões de qualidade mundial, com apreciável quantidade exportada.

O município de Campos dos Goytacazes, localizado no norte do estado do Rio de Janeiro, é um importante produtor de cerâmica vermelha com produção basicamente voltada para a fabricação de blocos de vedação, produto de baixo valor agregado. O principal mercado consumidor é a região do Grande Rio com cerca de 60%. Em seguida aparecem Grande Vitória e Zona da Mata Mineira. Os demais mercados expressivos são a Região dos Lagos, Norte e Noroeste Fluminense.

As principais razões que dificultam o aprimoramento do segmento de cerâmica vermelha da região são mão-de-obra desqualificada, falta de gestão empresarial e tecnologia ultrapassada.

Desta forma, o aprimoramento do setor de cerâmica vermelha de Campos dos Goytacazes necessariamente demanda a diversificação da produção com a fabricação de produtos de elevado valor agregado. Dentre as possibilidades, destaca-se a produção de telhas, bloco estrutural e pavimentos extrudados, conhecidos como adoquim cerâmicos. Este tipo de produto, embora muito utilizado e com tecnologia dominada em outros países como, por exemplo, a Colômbia e Espanha, ainda está em processo de difusão no Brasil.

O adoquim cerâmico é um pavimento que oferece benefícios como vida útil longa, resistência mecânica elevada, cores naturais exuberantes e facilidade de implantação e reparação.

Diante da vasta disponibilidade de matérias-primas da região de Campos dos Goytacazes e da necessidade de introdução de novos produtos no mercado, o adoquim cerâmico destaca-se como uma oportunidade inovadora para o pólo cerâmico campista. Além disso, devido aos seus requisitos técnicos de queima, possibilita o aproveitamento

de resíduos da própria indústria cerâmica e de outras tipologias industriais como matéria-prima para sua confecção.

Portanto, o desenvolvimento deste produto de alto valor agregado aliado aos benefícios técnicos, econômicos e ambientais que o mesmo proporciona serão assuntos versados no decorrer deste trabalho.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1. Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo principal desenvolver um produto cerâmico inovador, ainda pouco difundido no Brasil, que consiste num pavimento argiloso, conhecido como adoquim cerâmico, para aplicações arquitetônicas, edifícios, áreas de pedestres e trânsito veicular em vias públicas.

2.2. Objetivos específicos

- caracterização das matérias-primas;
- desenvolver uma formulação de massa cerâmica para a obtenção de pavimentos que atendam às especificações técnicas;
- determinar a temperatura de queima ótima para a obtenção do produto;
- avaliar as propriedades físicas e mecânicas do produto bem como sua microestrutura; e
- obtenção de pavimentos cerâmicos dentro das exigências técnicas.

2.3. Justificativas

O adoquim cerâmico é um pavimento que oferece benefícios como vida útil longa, resistência mecânica elevada, cores naturais e facilidade de implantação e reparação. Estes fatores associados à condição de um dos maiores pólos industriais de cerâmica vermelha do país, despertou o interesse da comunidade científica local para desenvolvimento deste pavimento. Os benefícios oferecidos pelo produto somado à sua condição inovadora no mercado brasileiro são as justificativas para o desenvolvimento deste estudo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A indústria cerâmica

A palavra cerâmica está intimamente ligada ao processo de transformação envolvido na produção dos materiais cerâmicos e vem do grego *keramikos*, que significa algo queimado. A definição de cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos e não-metálicos obtidos através de tratamento térmico em temperatura elevada. O resultado desse processo é um material refratário, ou seja, capaz de resistir à elevada amplitude térmica, mantendo sua integridade físico-química.

O setor industrial da cerâmica apresenta grande variedade de produtos e processos produtivos, verificando-se a convivência de diferentes tipos de estabelecimentos, com características distintas quanto aos níveis de produção, qualidade dos produtos, índices de produtividade e grau de mecanização. Segundo Bustamante e Bressiani (2000), o setor pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica estrutural (vermelha), revestimentos (pisos e azulejos), matérias-primas naturais; refratários, cerâmica técnica/especiais, sanitários, louça de mesa e adorno, fritas, vidrados e corantes, matérias-primas sintéticas, cerâmica elétrica, e abrasivos.

A indústria ceramista é grande consumidora de matérias-primas minerais. Seus diferentes segmentos consomem uma diversidade de substâncias minerais *in natura* ou beneficiadas, cujas variedades empregadas dependem do tipo de produto e da localização da unidade fabril.

A produção de matérias-primas cerâmicas é feita, em sua maioria, por empresas de pequeno e médio porte, de capital nacional. As minerações mais organizadas, que produzem matérias-primas com qualidade e regularidade, estão geralmente associadas a empresas multinacionais ou, algumas vezes, constituem-se em unidades autônomas ligadas à indústria de revestimento.

Dentre as diversas substâncias minerais consumidas, destacam-se, em razão do volume de produção atingido, as argilas de queima vermelha ou argilas comuns que respondem pelo maior consumo, sendo especialmente utilizadas na cerâmica vermelha e de revestimento. Tais argilas são caracterizadas como matérias-primas de baixo valor

unitário, o que não viabiliza o seu transporte a grandes distâncias, condicionando a instalação de unidades industriais cerâmicas nas proximidades das jazidas. O setor ceramista destina sua produção a diversos outros setores da economia, cabendo destacar, em especial, a construção civil.

3.2. O segmento de cerâmica vermelha

A indústria de cerâmica vermelha no Brasil caracteriza-se como um segmento econômico expressivo e de grande capilaridade territorial. Raramente depara-se com um município ou uma micro-região que não tenha uma fábrica de cerâmica ou um núcleo de pequenas olarias. Especializado na produção de materiais para a construção civil, este setor congrega desde empreendimentos artesanais e pequenas empresas de estrutura familiar, até empresas de médio a grande porte que operam com tecnologias modernas e alta eficiência produtiva.

A regionalização do setor cerâmico e a tendência de sua concentração em aglomerados produtivos fazem com que o aprimoramento competitivo deste segmento econômico possa vir a contribuir para o desenvolvimento econômico em muitas regiões brasileiras, a exemplo do nordeste brasileiro, propiciando a geração de emprego, renda e tributos nesses territórios (APL-SE, 2008).

O grande avanço do setor cerâmico nacional, no entanto, só foi efetivamente acontecer a partir de meados da década de 1960, dada a implementação de políticas públicas habitacionais, em especial, a instituição do Sistema Financeiro da Habitação e do Banco Nacional da Habitação. Durante a década de 1970, sustentado por uma demanda continuada, ocorreu um grande desenvolvimento da Construção Civil no País, provocando a expansão da indústria cerâmica nacional. Na esteira dessa ampliação do setor, houve a incorporação de processos inovadores e o lançamento de novas linhas de produtos, tendo-se, por extensão, o crescimento e a diversificação da produção de minerais industriais para a indústria cerâmica brasileira.

A Figura 3.1 ilustra a posição dos principais pólos produtores e indústrias de cerâmica vermelha nas regiões Sul e Sudeste.

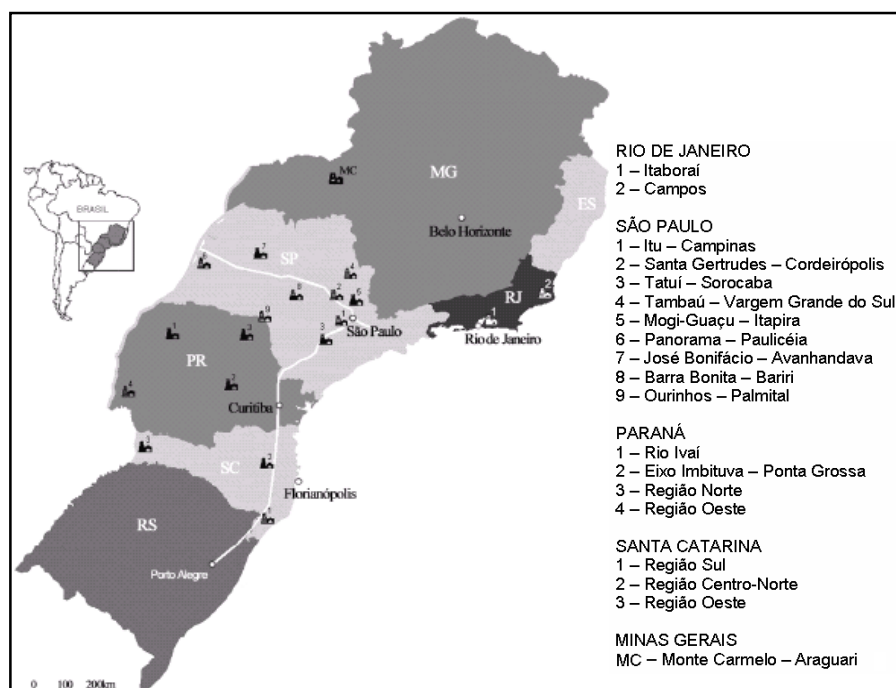


Figura 3.1. Principais pólos de cerâmica vermelha das regiões Sul e Sudeste. **Fonte:** Modificado do Anuário da Associação Brasileira de Cerâmica, 2003.

3.2.1. Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas na composição de massa para fabricação de cerâmica vermelha podem ser reunidas em dois grupos: matérias-primas plásticas e não plásticas (SÁNCHEZ *et al.*, 1990; BELTRÁN, 1996; MOTTA *et al.*, 1998). A seguir é apresentada uma descrição das matérias-primas comumente empregadas na fabricação de cerâmicas vermelha, bem como a abordagem mais detalhadas de materiais objeto de estudo deste trabalho.

3.2.1.1. Matérias-primas plásticas

As matérias-primas plásticas têm a finalidade principal de conferir plasticidade à massa cerâmica e são basicamente representadas pelas argilas e caulins. As argilas são constituídas essencialmente por minerais argilosos ou argilominerais, matéria

orgânica e impurezas. Os argilominerais possuem grande interesse tecnológico, sendo os principais a illita, caulinita e montmorilonita. Quando o mineral argiloso predominante é a caulinita, estas são denominadas “argilas caulíníticas”. Já as argilas com predominância do argilomineral illita, são denominadas “argilas ílíticas”.

Estas matérias-primas são responsáveis por conferir certas características à peça cerâmica durante a etapa de conformação, como, por exemplo, trabalhabilidade e resistência mecânica a verde. Entretanto, sua presença requer maior quantidade de água para conformação, levando a um maior tempo na etapa de secagem. Já no processo térmico, a matéria-prima plástica confere ao corpo estrutura e coloração (SANTOS, 1989).

As argilas plásticas são denominadas de “gordas” ou “fortes”, devido ao alto percentual de minerais argilosos, possuem granulometria fina e uma grande quantidade de matéria orgânica em sua composição (SILVEIRA; SILVA, 2000). Sua alta plasticidade dificulta o processamento, sendo necessária a incorporação de argila denominada “magra” ou “fraca”, de baixa plasticidade, ou ainda a utilização de matéria-prima não plástica com a finalidade de redução da plasticidade como, por exemplo, a areia (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997).

A Tabela 3.1 mostra a composição química de argilas “fraca” e “forte” de São Gonçalo do Amarante – RN, estudadas por Silveira e Silva (2000).

Tabela 3.1. Composição química das argilas “fraca” e “forte”,
(SILVEIRA; SILVA, 2000)

Minerais	Características dos materiais (% em peso)	
	Argila “fraca”	Argila “forte”
SiO ₂	66,46	54,7
Al ₂ O ₃	16,05	18,96
Fe ₂ O ₃	4,27	9,01
CaO	2,46	1,4
MgO	1,54	2,92
Na ₂ O	3,53	2,17
K ₂ O	2,26	2,55
MnO	0,07	0,12
TiO ₂	0,78	1,03
P ₂ O ₅	0,12	0,12
Perda ao Fogo (PF)	3,0	7,62
Total	100,0	100,0

A caulinita é o argilomineral mais comumente encontrado nas argilas. A estrutura básica é $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Argilas constituídas essencialmente pelo argilomineral caulinita possuem características mais refratárias.

A montmorilonita é caracterizada por partículas extremamente finas, sua fórmula geral é dada por $(\text{OH})_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$. Sua principal característica é a capacidade para absorver moléculas de água entre as camadas, devido a isto, argilas ricas neste argilomineral apresentam uma forte tendência a causar trincas de secagem, além de apresentar elevada plasticidade.

As illitas apresentam uma parte do silício substituído por alumínio, além de conter mais água entre as camadas e ter uma parte do potássio substituído por cálcio e magnésio. Sua composição química exata é de difícil determinação devido ao fato de apresentarem sempre contaminação por impurezas de difícil eliminação. Por terem potássio em sua estrutura, apresentam uma boa resistência após a sinterização.

Para a produção de cerâmica vermelha a característica de plasticidade nas argilas é essencial e fundamental, uma vez que elas, normalmente, são moldadas por extrusão, etapa de grande importância durante o processamento (ABAJO, 2000). Procura-se determinar a mínima quantidade de água necessária para permitir uma moldagem adequada, uma vez que, teores excessivos de água podem gerar elevadas contrações durante as etapas de secagem e queima (resultando em deformações e fissuras) e um aumento na porosidade da cerâmica, com conseqüente perda de resistência mecânica e aumento da permeabilidade à água.

A plasticidade de um sistema pode ser definida com a propriedade de se deformar pela aplicação de uma força e manter essa deformação após a retirada dessa força (SANTOS, 1989). Esta propriedade das argilas está diretamente correlacionada com fatores da própria matéria-prima, tais como: formação geológica, composição mineralógica, tempo de contato da argila com a água, temperatura, quantidade de água, dimensões e formato das partículas, e da presença de outros minerais, além dos argilominerais (CANNON; WYNN, 1999; SANTOS, 1989; SINGER, SINGER, 1963). A plasticidade será maior em argilas com maior teor de minerais argilosos e maior porcentagem de grãos finos.

De forma geral a plasticidade se desenvolve quando a argila apresenta água suficiente para cobrir toda a superfície acessível dos argilominerais com uma água não

orientada, que age como meio lubrificante facilitando o deslizamento das placas dos argilominerais umas sobre as outras quando uma tensão tangencial é aplicada.

Existem diversos métodos de medição e caracterização da plasticidade de uma massa argilosa, embora a sua determinação experimental dependa, em alguns casos, da maior ou menor habilidade do operador. Entre eles será destacado neste trabalho, o índice de plasticidade de Atterberg que é determinado por: Limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP).

O limite de plasticidade (LP) indica a quantidade de água mínima que a argila ou massa cerâmica devem conter para serem conformadas, por exemplo, em uma extrusora a vácuo. Valores considerados razoáveis para se extrudar uma massa estão situados entre 22-24% (MÁS, 2002).

O limite de liquidez (LL) corresponde à máxima quantidade de água que a argila ou massa cerâmica possam conter para ainda serem moldáveis. Já o índice de plasticidade (IP) representa a diferença entre o limite de liquidez e limite de plasticidade. Ou seja, representa a quantidade de água que ainda pode ser adicionada a partir do limite de plasticidade, sem alterar o estado plástico da argila ou massa cerâmica. O índice de plasticidade considerado mínimo é de 10% (ABAJO, 2000). Abaixo deste valor torna-se muito perigosa a etapa de conformação, já que há um grande risco de mudança no comportamento plástico com pequena alteração na quantidade de água utilizada.

3.2.1.2. Matérias-primas não plásticas

As matérias-primas não plásticas podem ser divididas em fundentes, inertes e modificadores de fundência. Apresentam em comum determinadas características como redução da plasticidade da massa. Elas facilitam a defloculação, melhoram o empacotamento e aumentam a permeabilidade das peças. A permeabilidade é aumentada pela redução da interação entre argila e água causada pelo desplastificante através da formação de pontos de descontinuidade, produzindo poros que permitem a passagem de água do interior da peça para sua superfície.

Na fase de conformação, as matérias-primas não plásticas reduzem a necessidade de água, reduzindo posterior retração da peça e o tempo de secagem.

Porém, sua maior importância se encontra na etapa de processamento térmico, onde as matérias-primas não plásticas controlam transformações, deformações e a sinterização, além de formar novas fases quando da reação com as demais matérias-primas (MOTTA *et al.*, 2004).

Os materiais fundentes são basicamente os feldspatos e os filitos e têm como função diminuir a temperatura de formação de fase líquida durante a etapa de queima. São materiais, portanto, responsáveis pela diminuição da porosidade das peças cerâmicas, principalmente, para produtos de grês e grês porcelanato, abaixando os índices de absorção de água (RIELLA *et al.*, 2002; RODRIGUEZ *et al.*, 2004), e consequentemente aumentando os valores de resistência mecânica (carga de ruptura) dos revestimentos cerâmicos.

O feldspato pertence ao grupo dos minerais mais abundantes na crosta terrestre e pode ser encontrado em rochas como: granito, cianito e outras. Segundo Almada e Vlcek (2000), os feldspatos são minerais constituídos de silicatos de alumínio em proporções variáveis de sódio, potássio e cálcio. Podem ser quimicamente distinguidos em (SANTOS, 1975; RIELLA *et al.*, 2002):

- Ortoclásio: feldspato potássico - KAlSi_3O_8 ;
- Albita: feldspato sódico – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; e
- Anortitas: feldspato cálcico – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Para promover a formação de fase líquida, os compostos mais eficazes são os óxidos de metais alcalinos, Na_2O e K_2O , e alcalinos terrosos, CaO e MgO . Porém, nesta fase líquida, um ponto importante é a viscosidade, que pode ser determinada e/ou controlada pela proporção de óxidos formadores de vidro (SiO_2 e Al_2O_3) e dos óxidos modificadores de rede (Na_2O e K_2O) (RODRIGUEZ *et al.*, 2004).

Os filitos são rochas metamórficas, constituídas por caulinita $[\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4]$, quartzo (SiO_2) e mica $[\text{Al}_2\text{K}(\text{Si}_{1,5}\text{Al}_{0,5}\text{O}_5)_2(\text{OH})_2]$, e que são utilizados para substituição parcial dos feldspatos pelo alto teor de potássio que pode ser encontrado e verificado pela análise química de sua composição. Na natureza, são materiais altamente friáveis, porém se apresentam como uma rocha dura (material rochoso). Com um grande valor prático para o processo cerâmico, os filitos têm baixo resíduo em peneiras de malha 200 Mesh (VAN VLACK, 1970), o que possibilita o seu uso sem praticamente nenhum

beneficiamento prévio na composição de massas cerâmicas, em quaisquer que sejam as finalidades (SANTOS, 1975).

Podem ser encontrados na natureza com cores variadas, partindo do branco ou branco-acinzentado a avermelhado, passando pelo amarelo, bege ao verde claro (SANTOS, 1975).

O talco é considerado um material modificador de fundência, pois reage com os feldspatos formando eutéticos (EMILIANI; CORBARA, 1999; BARBA *et al.*, 2002). É um filossilicato cuja fórmula teórica é $\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Mg}_3(\text{OH})_2$, e suas propriedades principais são: partículas com forma laminar, alto ponto de fusão, baixa capacidade de absorção e alta resistência mecânica. A adição de talco é geralmente limitada a 10% em peso, para não prejudicar o coeficiente de expansão térmica da cerâmica e não reduzir demasiadamente a faixa de temperatura de queima (SABEDOT; VOLKMANN; SAMPAIO, 2005).

Os inertes, fundamentalmente quartzo, quartzito ou areia feldspática e chamotes de blocos de vedação atuam na redução da retração de queima e regulam a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, importante parâmetro para a formação da mulita (fase de aluminossilicato, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). A reatividade do quartzo livre com relação aos óxidos presentes na massa depende de sua granulometria e do ciclo de queima utilizado (RESTREPO; DINGER, 2003).

O quartzo, um material inerte amplamente utilizado em cerâmica vermelha, apresenta variação polimórfica, com a transformação de inversão de quartzo de baixa (α) para quartzo de alta temperatura (β), que ocorre a 573°C , com uma variação de volume de 0,8%. As transformações de inversão são severas porque acontecem rapidamente e acompanhadas de acentuadas variações de volume.

As matérias-primas não plásticas, quando usadas em demasia, podem trazer desvantagens como:

- redução da resistência mecânica, tanto a seco quanto queimada, devido a grande descontinuidade provocada na cadeia dos elementos ligantes;
- retração de resfriamento no forno e fissuras capilares com o emprego de desplastificantes silicosos;
- Gastos com equipamentos de homogeneização para introduzir o desplastificante à massa e outros.

3.2.1.3. Argilito

Os argilitos são rochas de origem sedimentar compactas de grãos finos e laminados, contendo feldspato, quartzo, argilominerais e clorita $[\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}_3(\text{OH})_6]$ (LEINZ; AMARAL, 1998). São considerados um misto entre matéria-prima plástica e não plástica por apresentarem características de ambos os grupos de matérias-primas.

Na região oeste do estado de São Paulo prevalece a formação Bauru, que pode ser constituído de arenitos e feldspatos, predominando, em sua composição, quartzo, mica, feldspato e outros minerais (MONIZ *et al.*, 1973). As rochas sedimentares possuem argila com predominância de minerais do grupo das micas (ilita). Dessa forma, esses materiais apresentam composição química com quantidades maiores de potássio, dando a eles um caráter fundente.

O argilito é empregado na fabricação de cerâmica estrutural na região de Itu-SP, uma vez que sua composição química e mineralógica é similar às da argila da região. Este material atua como inerte durante a secagem e apresenta, durante a queima, comportamento físico-químico semelhante ao da argila. O argilito apresenta maior teor de óxidos fundentes e menor perda ao fogo. Com relação à composição mineralógica, o argilito é constituído de caulinita, mineral micáceo, hematita, quartzo e microclina (VIEIRA; EMILIANO, 2005). Na queima, o quartzo atua como inerte, podendo ainda apresentar uma parte dissolvida na fase líquida formada. Já os feldspatos e mica favorecem a formação da fase líquida e contribuem para a diminuição da porosidade das peças. A Tabela 3.2 apresenta a composição química do argilito.

Tabela 3.2. Composição química do argilito (VIEIRA; EMILIANO, 2005)

Minerais	% em peso
SiO ₂	56,02
Al ₂ O ₃	17,70
Fe ₂ O ₃	9,04
TiO ₂	1,05
CaO	1,11
MgO	4,09
K ₂ O	5,77
Na ₂ O	0,21
PF	4,80

Vieira e Emiliano (2005), utilizaram argilito para melhorar as propriedades tecnológicas das telhas produzidas na região de Campos dos Goytacazes. Foi observado que a incorporação de 30% de argilito a uma argila caulínica de Campos dos Goytacazes melhorou significativamente a trabalhabilidade e as propriedades tecnológicas de queima, através da redução da porosidade. Como consequência, ocorreu uma redução da absorção de água e aumento da resistência mecânica em comparação com a massa para telhas da região. Mostrando que o argilito é excelente matéria-prima e produz efeito benéfico na fabricação de produtos com maior valor agregado na região, resolvendo o problema de refratariedade das argilas campistas.

3.2.2. Massa cerâmica

O termo massa cerâmica corresponde a uma mistura de matérias-primas preparadas para a fabricação de um produto cerâmico. As massas cerâmicas tradicionais são denominadas de acordo com características particulares, tais como cor, textura e conformação (CORREIA, 2004).

A indústria cerâmica possui uma massa para cada produto. Essa massa estabelece a proporção, em peso ou volume, das diversas matérias-primas utilizadas. Uma boa massa deve ser facilmente processada, resultar em um produto com as características desejadas e ter um baixo custo de produção. Entretanto, sendo as matérias-primas utilizadas de origem natural, é inevitável que suas características variem com o tempo (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997). A formulação de massas para a fabricação de produtos cerâmicos é uma etapa de pesquisa associada a vários testes até o desenvolvimento de uma massa cerâmica adequada à produção industrial.

Segundo Vieira (2001), uma massa cerâmica deve possuir características necessárias para possibilitar uma adequada trabalhabilidade durante o processamento e para a obtenção das propriedades finais requeridas. Na fabricação de peças cerâmicas é bastante comum a mistura de dois ou mais materiais para a composição da massa.

Muitos métodos são utilizados para se desenvolver formulações de massas cerâmicas. A maioria destes métodos utiliza técnicas empíricas, e o procedimento consiste basicamente na escolha das matérias-primas e formulação.

Quando as propriedades finais do produto dependem principalmente da proporção de matérias-primas utilizadas, pode-se fazer uso de uma metodologia específica de experimentos com misturas. Esta técnica representou, em todos os casos relatados, um aumento na abrangência, eficiência e na confiabilidade dos resultados obtidos, requerendo menos tempo, recursos humanos e materiais, contribuindo assim para reduzir o custo de pesquisa e desenvolvimento (CORREIA, 2004).

As massas cerâmicas são formuladas de acordo com alguns fatores dependendo do tipo de processamento e produto final. Muitos autores trabalharam diferentes técnicas de formulação de massas, dependendo da utilização da mesma.

3.2.3. Processo de produção de cerâmica vermelha

O processo produtivo de cerâmica vermelha normalmente compõe as etapas de preparação da matéria-prima e da massa, concepção das peças, tratamento térmico, e acabamento. Antes de iniciar o processo os materiais devem ser beneficiados, desagregados ou moídos e classificados com a granulometria. A Figura 3.2 apresenta o fluxograma do processo (Anuário Brasileiro de Cerâmica, 2003).

A característica marcante do processo é o fato de uma única matéria-prima satisfazer a necessária para a produção. Entretanto, é prática usual a mistura de mais de um tipo de argila com o intuito de alcançar, em alguns casos, as propriedades estabelecidas pela legislação. Quando uma única argila atente a norma, a mistura é usada para melhorar a qualidade final do produto. Assim, normalmente utiliza-se a mistura de uma argila “forte”, caracterizada por elevada plasticidade, granulometria fina, e grande quantidade de argilomineral; com uma argila “fraca”, que é rica em quartzo e possui baixa plasticidade.

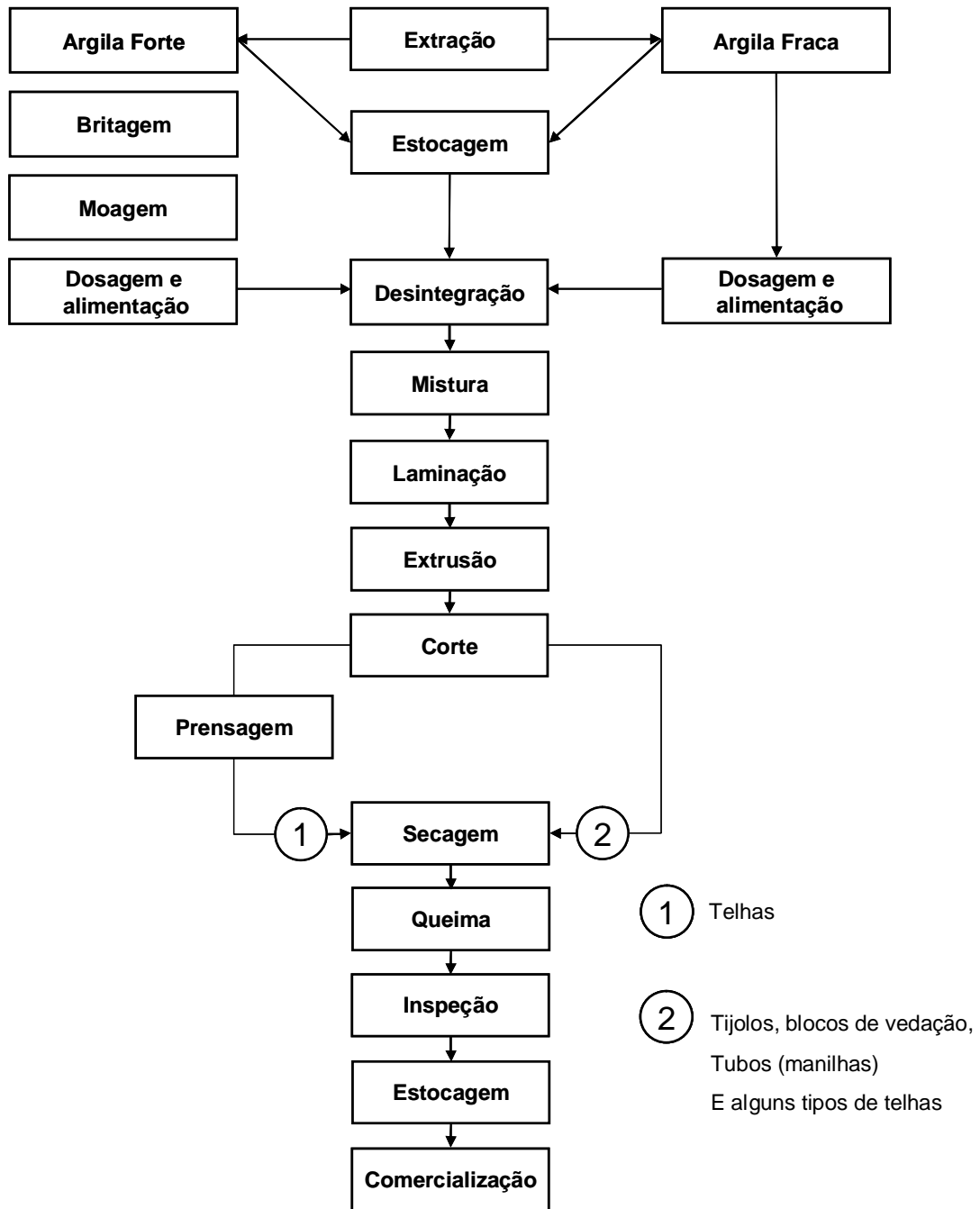


Figura 3.2. Fluxograma de fabricação de cerâmica vermelha. **Fonte:** Modificado de ABC (2008).

3.2.3.1. Preparação das matérias-primas

A preparação das matérias-primas pode ser reunida em dois grupos distintos, que são: preparação indireta e preparação direta.

A preparação indireta consiste na formação de pilhas conhecidas como pilhas de homogeneização ou pilhas de descanso, onde a matéria-prima é misturada com água. O principal objetivo da formação de pilhas de homogeneização e envelhecimento, durante períodos de meses e até mesmo anos, é minimizar variações nas propriedades das matérias-primas pela decomposição de compostos como sulfatos e matéria orgânica (ABAJO, 2000; NAVARRO; ALBARO, 1981). Este procedimento aumenta a plasticidade das massas e diminui o risco de trincas na peça durante secagem.

As pilhas devem ser formadas por camadas horizontais de materiais intercalados, devido à variabilidade dos mesmos. Sua altura deve oscilar entre 5 e 8 m, com um comprimento variável de 5 a 25 m. Durante esta etapa irá ocorrer dois fatos de extrema importância, a homogeneização e o envelhecimento da matéria-prima. A homogeneização irá corrigir irregularidades na composição do material, o envelhecimento diminui a tendência de fissuração na secagem devido ao aumento da plasticidade das massas.

A estocagem de argilas em pilhas e sua exposição às intempéries favorecem a ocorrência de processos físicos, químicos e biológicos fundamentais para o aumento da plasticidade das matérias-primas. Este aumento na plasticidade implica principalmente em uma boa trabalhabilidade das argilas nas etapas posteriores do processamento cerâmico como a extrusão e/ou prensagem. Além disso, a estocagem em pilhas durante determinados períodos de tempo promove uma maior homogeneização das argilas. As principais vantagens das pilhas de homogeneização são (GARI GUIU, 1992):

- A produção é feita independentemente da extração, das condições meteorológicas, do estado das vias de acesso a jazida, do nível freático da água da jazida etc.
- A matéria-prima pode ser extraída nos períodos mais favoráveis do ano, ou seja, mais secos, com benefícios econômicos provenientes do menor consumo de energia do secador e menor deformação das peças.
- Minimizam-se as diferenças entre diversos pontos da jazida

A preparação direta ocorre no pátio da indústria e é dependente de maquinários, elevando seu custo. Esta etapa se divide em: destorroamento, dosagem, moagem, mistura ou homogeneização.

No destorroamento utilizam-se britadores de mandíbulas ou moinho de bolas para diminuir o tamanho das partículas do material. A dosagem tem por objetivo misturar diferentes argilas e desplastificantes, tornar independente o funcionamento das máquinas, estabelecer uma alimentação constante, evitando-se atrasos e paradas (MÁS, 2002; MOTTA *et al.*, 2001).

A moagem é a etapa em que se controla a granulometria da massa, parâmetro de grande importância já que irá influenciar na compactação e nas propriedades pós queima. A etapa de homogeneização tem a finalidade de permitir a produção de peças com propriedades finais as mais semelhantes possíveis, garantindo uma reprodutividade padronizada (VERDUCH, 1995).

3.2.3.2. Conformação

Compreende as etapas de extrusão e corte. A extrusão é uma técnica de conformação amplamente empregada e possui grande relevância no processamento de cerâmica vermelha (RIBEIRO *et al.*, 2003). É uma técnica de produção associada a uma elevada produtividade, principalmente para produtos de seção transversal constante (tijolo) e muito importante em termos de homogeneização e retirada do ar da massa (BLACKBURN; LAWSON, 1992; REED *et al.*, 1996). A máquina utilizada é uma extrusora de vácuo também conhecida como “maromba”. A extrusora possui um caracol de forma helicoidal, que vai empurrando a massa, que é cortada em tamanhos pré-determinados.

Como citado anteriormente, a plasticidade das massas tem grande influência na etapa de extrusão e na qualidade final dos produtos extrudados. Portanto as massas devem estar na zona de máxima plasticidade evitando situações desvantajosas (RIBEIRO, *et al.*, 2003).

Segundo Cordeiro (1993) e Carty e Lee (1996), para atingir bons resultados na extrusão de produtos cerâmicos a massa deve apresentar as menores variações possíveis, em termos de: composição, grau de moagem, teor de umidade.

Como as condições de fluxo do material argiloso através da extrusora dependem basicamente da sua plasticidade, compreende-se facilmente a necessidade de manter o mais constante possível as características da massa (composição, grau de moagem, teor de umidade etc.) para que o valor da plasticidade se mantenha dando estabilidade ao processo (RIBEIRO *et al.*, 2003).

O controle rigoroso nas etapas de preparação das matérias-primas, bem como o controle de umidade para se obter a plasticidade mais adequada, são requisitos fundamentais para obtenção de elevados rendimentos e bons níveis de qualidade na extrusão de produtos cerâmicos. A falta de controle no processo pode acarretar defeitos nas peças tais como trincar e rachaduras nas etapas seguintes.

2.3.3.3. Tratamento Térmico

É a etapa onde as peças são submetidas ao efeito do aumento de temperatura. Fazem parte desta etapa a secagem e a sinterização. O objetivo da secagem é o de eliminar a água, utilizada na etapa de conformação, necessária para a obtenção de uma massa plástica (VIEIRA; FEITOSA; MONTEIRO, 2003).

A secagem pode ser feita em galpão ou estufa, sendo a secagem em galpão mais utilizada pelas olarias. As perdas durante o processo de secagem giram em torno de 5%. Após a secagem, o produto deve ter resistência suficiente para possibilitar a manipulação que o acabamento e o transporte até a queima do corpo cerâmico exige (SOARES, 2004).

Em seguida temos o processo de densificação, através da sinterização, onde os produtos adquirem suas propriedades finais. A sinterização é uma das etapas mais importante na fabricação dos materiais cerâmicos, cujo objetivo é a ocorrência das reações e as transformações químicas e físicas dos componentes da massa, de maneira a conferir ao corpo cerâmico as propriedades necessárias à sua utilização.

São destacados dois processos de sinterização de acordo com suas fases envolvidas: a sinterização por fase sólida e a sinterização por fase líquida.

A sinterização sólida segundo Kingery (1960) citado por Santos (2003), pode ser dividida em três estágios, que são:

- estágio inicial, caracterizado pela formação de contatos interpartículas, desde a compactação seguida pela formação e crescimento de pescoços, até o ponto onde eles começam a se interferir;
- estágio intermediário, caracterizado pela densificação do compacto e pelo decréscimo dos diâmetros dos poros interligados;
- estágio final, caracterizado pelo isolamento e eliminação gradual da porosidade.

Na sinterização sólida o transporte de matéria-prima ocorre através do mecanismo de difusão atômica através da rede da superfície do contorno do grão.

Na sinterização por fase líquida, é necessário que a fase seja distribuída de forma homogênea no sistema para se evitar taxa de densificação diferenciada dos corpos sinterizados. O líquido aproxima as partículas, sendo que, partículas angulares podem rotacionar permitindo seu deslizamento e arranjo espacial para uma configuração mais empacotada (KINGERY, 1960 citado por SANTOS, 2003).

Quando a fase líquida molha as partículas sólidas, cada espaço entre ela sofre pressão capilar devido ao líquido existente entre as partículas. A densificação é uma consequência da pressão capilar através de diferentes processos que ocorrem ao mesmo tempo durante a sinterização.

Com a formação dessa fase líquida, acontece uma reorganização das partículas para a formação do pescoço mais eficaz. Este processo pode conduzir uma completa densificação se o volume do líquido presente for suficiente para ocupar completamente os interstícios.

De acordo com estudos realizados pela Divisão de Engenharia Mecânica do IPT-SP apud Funtac e IEL (1990) os principais fenômenos que podem ocorrer na queima de um corpo cerâmico são os seguintes:

- i. Até aproximadamente 200°C dá-se a eliminação da água livre (mesmo a que fica intercalada entre os argilo-minerais) e a eliminação da água proveniente de matéria orgânica;
- ii. Entre 350°C e 650°C ocorre a combustão de substâncias orgânicas contidas na argila e a dissociação de compostos sulfurosos;
- iii. Entre 450°C e 650°C ocorre a decomposição das argilas, com liberação sob a forma de vapor, da água de constituição (quimicamente combinada ao argilomineral);

iv. Em temperaturas em torno de 570°C dá-se a rápida transformação de quartzo de sua forma cristalina alfa para beta, acompanhada de uma violenta expansão durante o aquecimento e de beta para alfa durante o resfriamento, acompanhado de fortes contrações;

v. Acima de 700°C, começam a se desenvolver reações químicas da sílica e da alumina com elementos fundentes, formando sílico-aluminatos complexos que dão à massa cerâmica característica como dureza, estabilidade, resistência mecânica etc. Atinge-se assim o início da sinterização;

vi. Entre 800°C e 950°C os carbonatos se decompõem e liberam CO₂;

vii. Acima de 1000°C, os sílico-aluminatos que estão na forma vítrea começam a amolecer, dando ao corpo maior dureza, compacidade e impermeabilidade.

3.4. Pólo Cerâmico Campista

O município de Campos de Goytacazes localizado no norte do Estado do Rio de Janeiro, representado na Figura 3.3, possui área territorial de 4.032 Km² com uma população de 426.000 habitantes (IBGE, 2007). A cidade é o maior município do estado e está aproximadamente a 280 Km da capital Rio de Janeiro. Mais da metade do município é uma planície formada sobre uma baía antiga regada pelo Rio Paraíba do sul. Esta planície é constituída por sedimentos quaternários com abundância em material argiloso (LAMEGO, 1945).

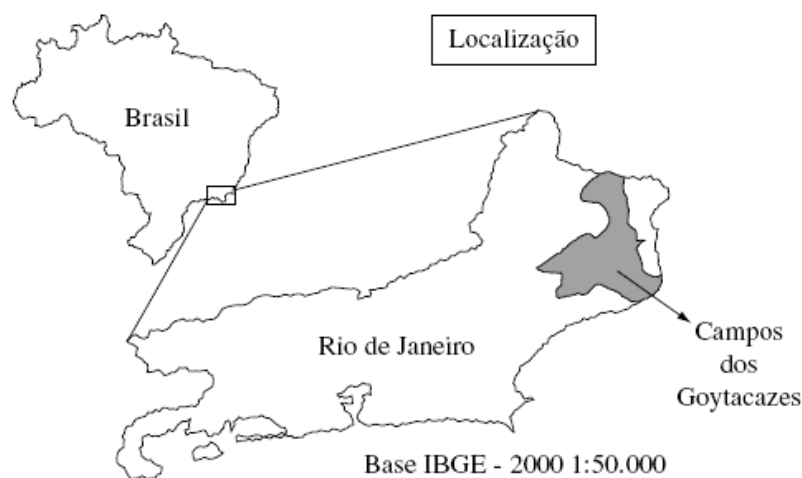


Figura 3.3. Localização do município de Campos dos Goytacazes. **Fonte:** IBGE (2007).

Uma das principais atividades industriais do município se concentra na produção de cerâmica vermelha tendo como principal produto os blocos de vedação, além de uma pequena produção de telhas, pisos extrudados, plaquetas para revestimento, bloco estrutural e tijolos aparente. Os blocos de vedação são produtos de baixo valor agregado e corresponde a 90% da produção. Os outros produtos como as telhas, por exemplo, apresentam porosidade excessiva acarretando absorção de água fora das especificações técnicas, justificando assim a pequena parcela produzida (VIEIRA; SOUZA; MONTEIRO, 2004).

O pólo cerâmico campista, com mais de 40 anos de existência é considerado uma dos maiores pólos de cerâmica vermelha do estado. A motivação para a implantação do pólo no município de Campos dos Goytacases se deve à grande quantidade de matéria-prima disponível na região. Possui cerca 100 indústrias e é responsável por aproximadamente 40% da produção estadual (VIEIRA *et al.*, 2007).

A indústria de cerâmica vermelha desempenha um papel relevante na economia campista, gerando cerca de 5 mil empregos diretos e 25 mil indiretos. As unidades fabris estão em sua maioria situadas à margem direita do rio Paraíba do Sul (MILLER *et al.*, 2008).

3.4.1. Aspectos geomorfológicos e geológicos de Campos dos Goytacazes

O município de Campos dos Goytacazes apresenta três divisões geológica-geomorfológicas distintas: planície quaternária, tabuleiros e embasamento cristalino (LAMEGO, 1974).

1 – A Planície Quaternária é a feição geomorfológica dominante do município, sendo dividida em planície marinha e flúvio-lagunar. A planície marinha é constituída por uma sucessão de cordões arenosos e superfície sub-horizontais de micro-relevo ondulado. Possui uma amplitude inferior a 5m e são terrenos bem drenados (FERREIRA, 1999).

2 – O Embasamento Cristalino apresenta dois padrões. O primeiro é a região mais externa que são morros com altitude de aproximadamente 15m em forma de meia laranja, podendo ser confundidos com os tabuleiros de barreiras. O segundo é o mais interno que apresentam relevo forte, serras e morros íngremes (FERREIRA, 1999).

3 – Os Tabuleiros ou série barreiras são elevações de topo plano com suave declividade para o mar e são os mais extensos depósitos continentais terciários do mundo. Eles apresentam formas suavemente dissecadas com extensas superfícies de gradientes muito suaves ou colinas tabulares com topos planos-alongados e vertentes retilíneas nos vales em forma de “U” resultantes da dissecação fluvial recente (BARROSO, 1997). Formam uma faixa estreita entre o embasamento cristalino e o mar, com elevação máxima de 40m.

Os sedimentos marinhos são constituídos exclusivamente de areias quartzosas litorâneas de coloração amarelada e acinzentada. São geralmente, bem selecionadas, com granulometria variando de fina a grossa.

Os sedimentos flúvio-lacustres apresentam uma granulometria diversa, de acordo com a sua origem. Os sedimentos fluviais são constituídos por argilas e siltes micáceos, de coloração acinzentada, formando planícies de inundação. Também fazem parte deles, as areias quartzosas de coloração branco-amarelado com granulometria variando de média a grosseira. Os de origem lacustre são depositados em ambientes de água doce a pouco salobra, formados pelos depósitos de lagos e lagoas. O sedimento característico é uma argila plástica de coloração cinza muito escuro a negra, com altos teores de matéria-orgânica. Também faz parte do conjunto, os sedimentos depositados em ambiente de água salobra bastante plásticos e escura (PROJIR, 1984).

Devido a essas características geológicas-geomorfológicas, as matérias-primas argilosas do município de Campos dos Goytacazes possuem grande heterogeneidade além de apresentarem granulometria fina juntamente á alta plasticidade o que favorece sua utilização na indústria de cerâmica vermelha.

3.4.2. Argilas de Campos dos Goytacazes

Segundo Santos (1989), argila é um material natural, de textura terrosa, de baixa granulometria (menor que 2 μm), que adquire plasticidade quando misturado com certa quantidade de água. Após secagem é dura e rígida e após queima em temperaturas acima de 1000 °C adquire elevada dureza.

As argilas de Campos apresentam grande diversidade, sendo originadas de diferentes depósitos formados ao longo de anos. É característica local os depósitos

argilosos apresentarem dois tipos de argilas de forma estratificadas, sendo uma argila "gorda" na camada inferior e uma argila "magra", porém de boa plasticidade, na camada superior (VIEIRA; HOLANDA; PINATTI, 2000). Segundo Alexandre (2002), o mineral argiloso predominante nas argilas campistas é a caulinita, porém, é comum a presença de minerais tais como o quartzo, a mica, a goetita, a gibsita e o rutilo. A Figura 3.4 mostra os difratograma de raios-X de uma argila típica de Campos dos Goytacazes. São observados picos de difração predominantes de caulinita, quartzo, mica e gibsita, além de picos menos intensos de goetita e rutilo.

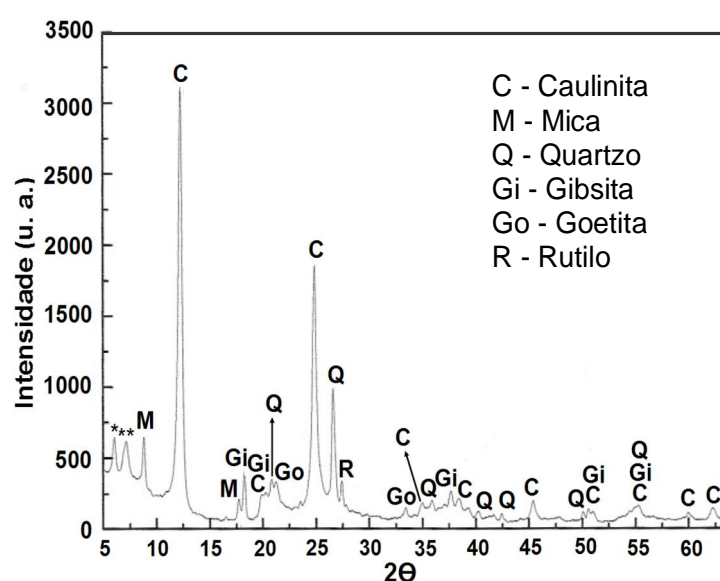


Figura 3.4. Difratograma de raios-X de uma típica argila campista. **Fonte:** Adaptado de VIEIRA, (2001).

As argilas campistas possuem relativamente baixo teor de sílica e teores elevados de alumina revelando elevado percentual de argilomineral e baixo teor de quartzo livre. Este elevado percentual de alumina (Al_2O_3) tende a aumentar a refratariedade das argilas de Campos (VIEIRA *et al.*, 2001). Entretanto, a presença de gibsita ($Al(OH)_3$), observada pela técnica de difração de raios-X, mostra que nem toda alumina presente encontra-se associada aos argilominerais. A gibsita contribui para aumento da perda ao fogo e refratariedade do material.

Observa-se que os teores de óxidos de cálcio e magnésio são baixos, fato explicado pela ausência de carbonatos nas matérias-primas. Observam-se também baixos teores de óxidos alcalinos ($Na_2O + K_2O$). Estes óxidos são os principais

responsáveis pela formação de fase líquida. Em temperaturas superiores a 1000° C ocorre uma reação destes óxidos com a SiO₂ proveniente da decomposição dos argilominerais formando fase líquida que promove a densificação do material (VIEIRA *et al.*, 2001),

Segundo Vieira (2001), os teores elevados de perda ao fogo nas matérias-primas estão relacionados com a fração significativa de argilomineral. Portanto, para a fabricação de produtos de maior valor agregado pelo pólo cerâmico de Campos há a necessidade de desenvolvimento de massas com teores mais elevados de sílica e de óxidos alcalinos. A Tabela 3.3 mostra a composição química das argilas de Campos dos Goytacazes estudadas por Vieira e Monteiro (2005) e Souza e Holanda (2005).

Tabela 3.3. Composição química das argilas de Campos dos Goytacazes

Composição	% em peso	
	Vieira e Monteiro (2005)	Souza e Holanda (2005)
SiO ₂	50,20	46,42
Al ₂ O ₃	25,50	27,90
Fe ₂ O ₃	8,90	9,10
TiO ₂	1,30	1,32
K ₂ O	2,00	1,67
Na ₂ O	0,50	0,36
CaO	0,40	0,22
MgO	1,10	0,71
P ₂ O ₅	-	0,21
MnO	-	0,11
PF	10,20	11,96

Vieira e Monteiro (2004), investigaram dois tipos de argilas, uma “forte” e outra “fraca” da região de Campos dos Goytacazes usadas na produção de cerâmica vermelha. As argilas foram coletadas em 3 jazidas distintas, as quais foram retiradas de camadas superiores e inferiores. As argilas investigadas foram localizadas no diagrama Winkler. Nele estão delimitadas regiões apropriadas para a fabricação de determinados produtos tais como tijolo maciço, região I, blocos vazados, região II, telhas, região III e produtos com dificuldade de produção, região IV (WINKLER, 1954). De acordo com o diagrama, apenas uma das argilas (W1 – argila fraca jazida 1) mostrou ser adequada para ser processada por extrusão (área I). Todas as outras amostras ficaram fora das regiões estabelecidas pelo diagrama. Este fato indica a necessidade de acrescentar materiais não plásticos, a fim de adequar as massas para produção de cerâmica

vermelha. A Figura 3.5 mostra a localização das argilas estudadas no diagrama de Winkler.

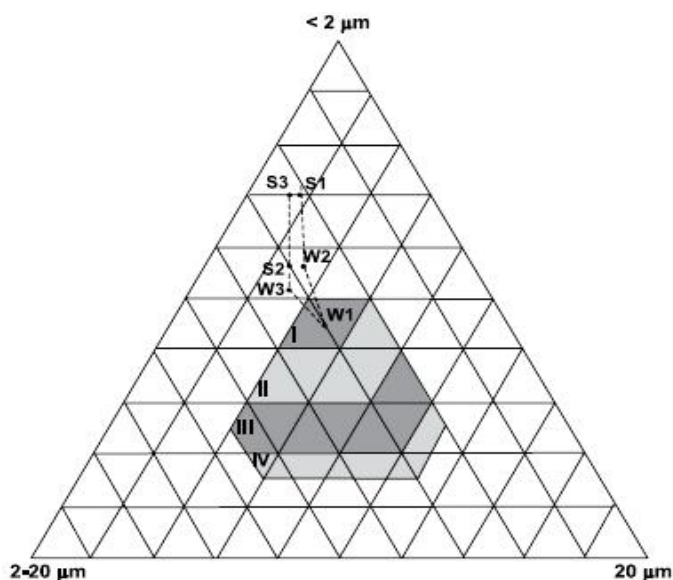


Figura 3.5. Localização no Diagrama de Winkler das matérias-primas de Campos dos Goytacazes, W = argila fraca; S = argila forte. **Fonte:** Monteiro e Vieira (2004).

As argilas de Campos possuem caráter predominantemente caulínico, isto acarreta um comportamento de queima refratário. Este comportamento, que associado à elevada perda de massa durante a queima, devido ao alto percentual de minerais argilosos, geram produtos com excessiva porosidade o que acarreta valores de absorção de água fora das especificações técnicas. Estas características indicam que as argilas de Campos dos Goytacazes são adequadas para a fabricação de blocos de vedação (VIEIRA; SOUZA; MONTEIRO, 2004)

Entretanto, a necessidade de expandir o mercado consumidor e a busca por novos produtos, faz com que as indústrias busquem alternativas para a confecção de produtos de maior valor agregado como, por exemplo, a produção de telhas e pisos cerâmicos extrudados. Estes produtos necessitam de propriedades tecnológicas bem mais restritas do que as exigidas para os blocos de vedação.

3.5. Pavimentos

Os pavimentos são estruturas formadas por diferentes camadas construídas sobre o solo para permitir a circulação de pessoas e veículos garantindo comodidade, segurança e conforto. Segundo a ABNT NBR- 7207 (1992), as principais funções dos pavimentos são:

- resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;
- melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança;
- resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento;
- resistir às ações do intemperismo.

Em função da maior ou menor rigidez da estrutura, o pavimento pode ser denominado rígido ou flexível (SÓRIA, 1997).

Os pavimentos rígidos são constituídos, predominantemente, por camadas que trabalham a tração com pouca deformação e são formados, principalmente, por cimento Portland.

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas que trabalham muito pouco a tração, quando comparadas às dos pavimentos rígidos (MARQUES, 2002). Todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas, sob um carregamento aplicado, e a carga é distribuída em parcelas equivalentes entre suas camadas (PINTO; PREUSSLER, 2002). Para SHACKEL (1990), os pavimentos intertravados constituídos de blocos de concreto podem ser considerados pavimentos flexíveis, devido às suas características, que se assemelham às dos pavimentos asfálticos, tais como de distribuição de cargas, de deflexão, entre outras.

3.5.1. Pavimentos intertravados

Durante centenas de anos foram utilizados diferentes tipos de pavimentos, para calçar estradas e cidades, tais como pavimentos de pedra, de madeira, de cerâmica e os elaborados com cimento (ANFALIT, 2007).

No início do século XIX, os revestimentos de peças de madeira eram utilizados objetivando diminuir o nível de ruído, principalmente onde o tráfego era composto de

carruagens equipadas com rodas de ferro. As peças eram envolvidas por uma camada de mastique betuminoso onde polvilhavam-se grãos pequenos de pedra para auxiliar sua ancoragem à base do pavimento.

No século XVIII, surgiam os primeiros modelos de assentamento de pedras talhadas em fileiras ou tipo espinha de peixe. Este tipo de pavimento, embora mais resistente do que os de madeira, provocavam muito ruído o que causava grande incomodo à população.

Os pavimentos de madeira e de pedra foram deixados de lado com o aparecimento de novos tipos de pavimentos. Embora tenham caído em desuso, os pavimentos de pedra, os paralelepípedos como são conhecidos, ainda são usados em cidades de interior do Brasil. Ruas calçadas com paralelepípedos são encontradas em cidades históricas como Tiradentes, São João Del Rei, Diamantina e Ouro Preto em Minas Gerais e Paraty no Rio de Janeiro, mostradas nas Figuras 3.6 e 3.7 (CRUZ, 2003; MÜLLER, 2005).



Figura 3.6. Rua calçada com pedra em São João Del Rei – MG.
Fonte: MÜLLER (2005).



Figura 3.7. Rua calçada com pedra em Paraty - RJ. **Fonte:** MÜLLER (2005).

Tijolos de argila também eram usados como pavimentos. Nesta técnica, os tijolos eram aplicados sobre uma camada de betume objetivando garantir a aderência dos tijolos ao leito do terreno. Mesmo assim, a durabilidade destes blocos não era grande devido ao excessivo desgaste superficial gerado pela ação do tráfego da época. Sua utilização ficava restrita a regiões que não dispunham de outro material de maior resistência. No final do século XIX, apareceram os primeiros fornos que queimavam os tijolos em altas temperaturas. Esta técnica resultava no aumento de resistência mecânica dos tijolos, passando então a ser muito utilizada na Europa e América. Porém, com o surgimento de peças pré-moldadas de concreto (PPC) o uso dos tijolos de argila perdeu mercado.

Entretanto, há ocorrência de cidades Brasileiras que ainda utilizam tijolos maciços de argila como pavimentação. É o caso de cidades como Rio Branco no Acre, que vem utilizando este tipo de pavimentos desde 1940, mostrada na Figura 3.8. A inexistência de pedra naquela região do país, aliada à grande disponibilidade de material para a produção de tijolo cerâmico contribuiu de forma decisiva para este fato (NASCIMENTO, 2005).



Figura 3.8. Pavimentação com tijolo maciço de argila em Rio Branco – AC.
Fonte: NASCIMENTO (2005).

Os primeiros avanços no desenvolvimento da utilização da pavimentação com **PPC** ocorreram na Holanda e Alemanha no período de reconstrução destes países após a Segunda Guerra Mundial. A partir de 1950, houve uma evolução dos modelos de fôrmas existentes para a sua fabricação. Primeiramente as peças imitavam os tijolos e pedras aparadas da época, objetivando obter sua substituição gradual. Nesta fase, as únicas vantagens de utilização eram os custos mais baixos e a homogeneidade dimensional.

Passado este período, foi incorporado um maior refinamento das peças, disponibilizando outros modelos. O conceito de intertravamento e melhor controle de espessuras das juntas começavam a ser implantados. Benefícios práticos para o assentamento das peças eram facilmente detectados. Por fim, o desenvolvimento da pavimentação de **PPC** permitiu relacionar a escolha da forma geométrica com o desempenho do pavimento (MÜLLER, 2005; CRUZ, 2003; PREGO, 2001; SHACKEL, 1990).

Shackel (1990) relata que a pavimentação de peças segmentadas vem sendo aplicada pelo homem desde a Idade Média. A natureza das peças utilizadas era basicamente função da oferta dos materiais locais aliada ao desenvolvimento das técnicas de execução. Desde então vem evoluindo ao longo dos anos, buscando a

produção de pavimentos com características técnicas adequadas associadas à durabilidade, conforto e comodidade dos usuários.

Na sua evolução surgiram, então, pavimentos intertravados de vários tipos de materiais, possuindo características distintas; Sendo o objetivo da discussão deste trabalho um produto pouco difundido no Brasil e que se apresenta um produto com futuro promissor devido suas características técnicas, econômicas e ambientais, chamado de adoquim cerâmico.

3.6. Adoquim cerâmico

Os materiais cerâmicos foram usados pelo ser humano durante muitos séculos para pavimentar suas estradas. Foram encontrados, em escavações na Mesopotâmia, alguns indícios deste tipo de pavimento datados de aproximadamente 5.000 anos atrás. Entretanto, sua utilização começou a crescer há poucas décadas atrás, pelo fato do adoquim cerâmico ter conseguido alcançar propriedade técnicas e estéticas avançadas. Seus benefícios técnicos estão relacionados à qualidade “*klinker*” do adoquim sinterizado, que proporciona ao produto final alta densidade, alta resistência e baixa absorção de água (MALPESA, 2006).

O “*Klinker*” é um produto técnico por excelência em virtude da perfeita e controlada redução granulométrica das matérias-primas, que possibilitam a queima a altas temperaturas, adquirindo ótima qualidade técnica (MANFREDINI; SCHIANCHI, 2002). É caracterizado por uma estrutura compacta de excelente resistência mecânica, química e de abrasão. É produzido a partir de argilas aditivadas com óxidos corantes, fundentes enérgicos e chamote (FERRO, 2003).

A melhoria das propriedades técnicas e a larga variedade de formatos proporcionaram sua utilização como pavimentos com diferentes finalidades e com grande facilidade de implantação, devido à sua característica de intertravamento. A Figura 3.9 apresenta um esquema de implantação de adoquins retangulares, podendo observar inúmeras opções de intertravamento.

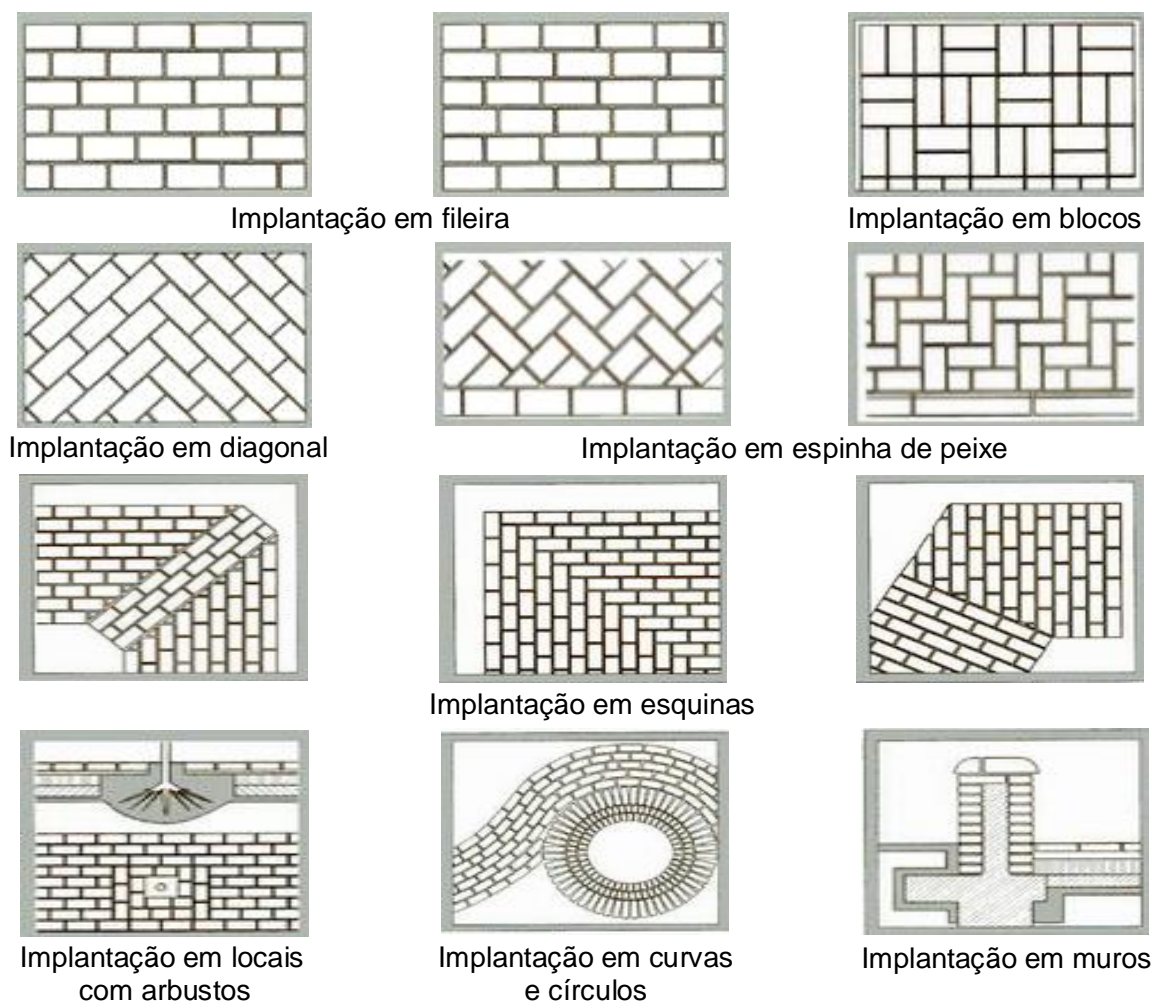


Figura 3.9. Exemplificação de implantação dos adoquins cerâmicos. **Fonte:** BIA (2006).

Os adoquins apresentam uma grande diversidade de cores que confere à área uma beleza exuberante e, além disso, possuem vida útil longa. A Figura 3.10 mostra uma área pavimentada com adoquim cerâmico.

Estes pavimentos são pequenos e de fácil manejo, suas formas geométricas foram desenvolvidas, não só para obter facilidade de instalação, mas também para uma correta distribuição de cargas impostas pelos diversos tipos de tráfego. Suas geometrias permitem uma diversidade de combinações, proporcionando um ambiente com uma estética harmoniosa. Os adoquins permitem a pavimentação de estradas para todos os tipos de tráfego, calçadas, zonas de pedestres, pátios e jardins, dentre outros (CONORSA, 2008).



Figura 3.10. Pavimentação na Espanha com adoquim cerâmico: exuberância de cores e formas de implantação. **Fonte:** MALPESA (2006).

Países como Espanha, Estados Unidos e Colômbia estão investindo nesse tipo de produto. Algumas regiões dos Estados Unidos nas cidades de Orlando, Houston e Columbus, os adoquins são usados em áreas que variam desde jardins até rodovias com trânsito veicular pesado. Nestas cidades observam-se ambientes com aspecto rústico e inovador proporcionado pelos adoquins, Figura 3.11.



Figura 3.11. Ambiente com aspecto rústico e inovador de Orlando, Houston e Columbus – Estados Unidos. **Fonte:** BIA (2008).

No Brasil os adoquins cerâmicos são pouco conhecidos e possuem como concorrente direto os **PPC**, que adquiriram grande notoriedade a partir de meados do século XX. O Brasil utiliza pavimentos asfálticos em sua maioria, pavimentos de concreto em menor escala e nas últimas duas décadas os **PPC**. O adoquim cerâmico surgiu no mercado brasileiro recentemente, se apresentando como um produto novo para a indústria de cerâmica vermelha com futuro promissor. A seguir são listadas algumas vantagens que este produto apresenta (MALPESA, 2006):

- São desenhados para possibilitar a colocação nas obras manualmente de maneira simples e com poucas ferramentas;
- Para colocação dos pavimentos cerâmicos não há necessidade de equipamentos custosos como para a execução de pavimentos asfálticos ou em concretos;
- As obras construídas podem abrir-se ao tráfego imediatamente após a execução, evitando o tempo de espera para secagem, cura etc.;
- Suportam com resistência a combustíveis, graxas, azeites e lubrificantes, o que em outros tipos de pavimentos ocorre uma rápida degradação diante destes produtos;
- Os níveis sonoros dos pavimentos cerâmicos são muito similares ou inferiores quando comparados com outros tipos de pavimentos quando secos e sensivelmente inferiores quando estão úmidos;

- Redução dos gastos com iluminação da área;
- A resistência ao deslizamento se mantém acima dos outros tipos de pavimentos;
- Tem um grande período de vida útil, cerca de 30 anos, a qual é determinada principalmente pelas camadas inferiores do pavimento;
- Durante os processos de restauração, reutilizam-se entre 90 a 95% dos pavimentos cerâmicos originais. Isto implica em menor custo de manutenção e conservação;
- As possibilidades de aplicação são muito amplas, pois apresentam uma grande diversidade de formas e de texturas;
- Possuem coloração natural e marcante, que juntamente com suas formas geométricas caracterizam ao ambiente uma decoração rústica sem perder a beleza.

3.6.1. Processamento

A matéria prima para a fabricação dos adoquins cerâmicos deve apresentar alto índice de resistência à compressão, para que, quando convenientemente preparada e queimada, dê origem a blocos que apresentem boa resistência à compressão e ao desgaste (FUNTAC, 1997).

Basicamente são usados, na preparação de massas para confecção dos adoquins, matéria-prima argilosa, materiais com características fundentes e chamote, o que representa a vantagem de reutilização destes materiais.

O processo de fabricação de adoquins cerâmicos é o mesmo processo de fabricação de cerâmica vermelha. A etapa de moldagem deste produto normalmente é realizada pelo processo de extrusão, que possui disponível inúmeras formas geométricas. Não conseguindo por extrusão a moldagem pode ser feita por prensagem. Nesta etapa deve ser feito o controle das dimensões das peças.

Assim como acontece para outros produtos da indústria cerâmica, deve-se ter atenção especial voltada para as etapas de secagem e queima. A seleção das matérias-primas garante um produto final de alta qualidade. A utilização de chamotes, material inerte, fornece estabilidade às massas cerâmicas facilitando a secagem por igual reduzindo o encolhimento, empenamento e a deformação pirolástica

(ANAFLORES, 2007). Durante a queima, até sua temperatura de processamento, o chamote irá se comportar como material inerte. Já em temperaturas superiores à qual foi obtido, possibilitará o desenvolvimento de reações de sinterização. Neste caso, a menor perda de massa do chamote em comparação com as argilas também pode contribuir para a redução da porosidade do produto final. Todavia o teor de adição e a granulometria são fatores determinantes para a otimização do processo (VIEIRA; SOUZA; MONTEIRO, 2004; MANFREDINI; SCHIANCHI, 2002; BELTRAN *et al*, 1996).

A temperatura de queima deve ser mais elevada do que as temperaturas usuais de fabricação de cerâmica vermelha, pois os requisitos de resistência mecânica para os adoquins cerâmicos são bem mais elevados que os produtos de cerâmica vermelha convencionais. Na Espanha, a queima deste tipo de produto é realizada em temperaturas que variam de 1100 a 1200°C (MALPESA, 2008).

3.6.2. Classificação

Os adoquins cerâmicos podem ser classificados como pavimentos flexíveis ou rígidos, a diferença se dá no assentamento e acabamento da pavimentação. Os adoquins classificados como flexíveis são assentados sobre uma camada grossa de areia compactada e recebem uma camada de areia mais fina que a primeira para selar as juntas que formam no intertravamento. Já os adoquins classificados como pavimentos rígidos são assentados sobre uma camada de concreto. Logo em seguida são rejuntados com uma massa de cimento, causando um custo maior de implantação (MALPESA, 2003; BIA, 2008).

A Figura 3.12 ilustra um esquema de implantação de adoquins como pavimentos flexíveis. A camada de base, que pode ser o cascalho fino, recebe as tensões distribuídas pela camada de revestimento. Sua principal função é a de resistir e distribuir os esforços ao subleito (material de origem do local), evitando assim as deformações permanentes e a conseqüente deterioração do pavimento. Ocorre a necessidade de subbase quando o lençol freático está muito próximo do subleito. O material usado como subbase deve ser granular, na maioria das vezes é usado um cascalho grosso (MALPESA, 2008; CRUZ, 2003; MÜLLER, 2005). A Figura 3.13 mostra

o conjunto de ações necessárias à implantação dos adoquins como pavimentos flexíveis.

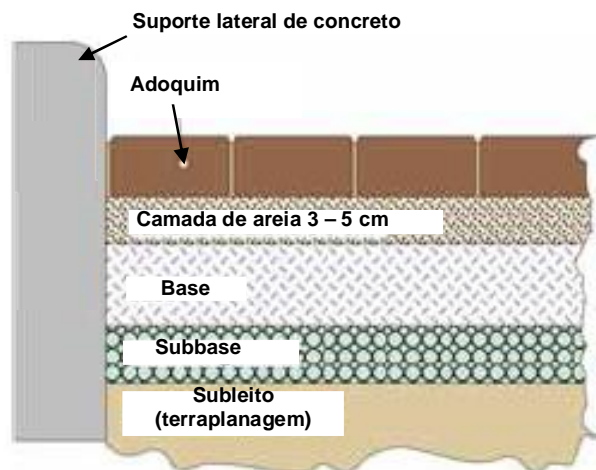


Figura 3.12. Estrutura típica de pavimentos intertravados flexíveis. Fonte: Adaptado de MALPESA (2008).

A escolha de um sistema flexível apresenta algumas vantagens que o torna mais desejável, exceto para áreas com alta declividade, acima de 9%, e em locais com intensa utilização de água, que nestes casos recomenda-se o sistema rígido. A seguir serão listadas as vantagens da utilização do sistema flexível (MALPESA, 2003).

- O uso de areia ao concreto representa menores custos;
- Havendo necessidade de reforma ou de reparos em redes públicas sob os pavimentos, estes podem ser removidos com facilidade e reaproveitados. No caso do sistema rígido ocorre deterioração dos pavimentos gerando gastos mais elevados;
- Se bem executado permite com total segurança a circulação de tráfego veicular pesado;
- As áreas pavimentadas são liberadas imediatamente após sua implantação sem necessidade de esperar os materiais de preenchimento adquirirem resistência.



Figura 3.13. Implantação dos adoquins cerâmicos como pavimentos flexíveis. **Fonte:** MALPESA (2008).

Como pavimentos rígidos os adoquins cerâmicos são indicados para áreas com inclinação superiores a 9%, em áreas que requerem frequentemente lavagem. A forma de implantação é a mesma utilizada para o sistema flexível, com subleito, subbase e base. Porém, a base é uma soleira de cimento sobre a qual os adoquins são colocados, cuja espessura dependera da carga prevista para a área. Após o assentamento se faz necessário um rejunte das juntas, para finalizar, faz-se uma lavagem do local (SAEZ, 2004).

3.6.3. Legislação e propriedades tecnológicas

No Brasil não existe uma norma que estabelece padrões tecnológicos para adoquins cerâmicos. Com a expansão do produto ocorre a necessidade de padrões específicos, determinando propriedades tecnológicas, uso apropriado e recomendações de execução do pavimento. Para fins comparativos, serão relatados a seguir, requisitos estabelecidos por normas internacionais de países em que os adoquins cerâmicos já se

consolidaram. São normas da ASTM (Estados Unidos), NTC (Colômbia) e UNE-NE (Espanha). A Tabela 3.4 mostra as especificações técnicas das normas ASTM e NTC, determinando os parâmetros admissíveis para os adoquins cerâmicos.

A ASTM C902/2006 e a NTC 3829/2002 estabelecem padrões para utilização de adoquins em locais com circulação de pedestres e tráfego veicular leve e para regiões com baixa, média e alta circulação de pedestres. A ASTM C1272/2006 e a NTC 5282/2002 estabelecem requisitos para a utilização de adoquins cerâmicos em regiões com tráfego veicular pesado, calçadas comerciais e aplicações industriais.

Tabela 3.4. Especificações técnicas para os adoquins cerâmicos segundo as normas americana (ASTM) e colombiana (NTC)

Normas		Especificações técnicas (média para 5 unidades)			
ASTM		AA (%)	RC (MPa)	IA	VA (cm ³ /cm ²)
C 1272	Tipo R	6	55,2	0,11	1,7
C 1272	Tipo F	6	69	0,11	1,7
C 902/	SX	8	55,2	-	-
C 902	MX	14	20,7	-	-
C 902	NX	Sem limite	20,7	-	-
NTC					
5282	Tipo R	6	55	0,11	1,7
5282	Tipo F	6	69	0,11	1,7
3829	Tipo I	8	55,2	0,11	1,7
3829	Tipo II	14	38	0,25	2,7
3829	Tipo III	Sem limite	20,7	0,50	4

AA – absorção de água; RC – resistência à compressão; IA – índice de abrasão; VA – volume de abrasão

As siglas R e F significam sistemas de implantação rígidos e flexíveis respectivamente, SX e Tipo I pavimentos indicados para exteriores submetidos a condições de congelamento e descongelamento, MX e Tipo II indicam uso exterior e não expostos a temperaturas frias e NX e Tipo III indicados para interiores.

Na Espanha a norma regulamentadora é UNE-NE-1344 que estabelece padrões para adoquins cerâmicos extrudados e prensados. A Tabela 3.5 mostra os parâmetros estabelecidos por esta norma. A norma DIN 18503/2003 instituiu requisitos específicos para a absorção de água (máximo 6%) e para densidade aparente (média – mínima de 2 kg/dm³ e valor único – mínimo de 1,9 kg/dm³).

Tabela 3.5. Características técnicas dos adoquins cerâmicos estabelecidos pela UNE-NE-1344/2002

Propriedades	Adoquim cerâmico extrudado	Adoquim cerâmico prensado
Resistência ao gelo/degelo	Resistente	Resistente
Carga de ruptura transversal	Valor médio ≥ 80 N/mm	Valor médio ≥ 30 N/mm
Resistência à abrasão	Valor médio ≤ 450 mm ³	Valor médio ≤ 450 mm ³
Resistência ao deslizamento	≥ 45	≥ 45
Resistência aos ácidos (perda de massa média de 5)	$\leq 7\%$	$\leq 7\%$
Tolerância dimensional por dimensão	$\leq 0,5 \sqrt{d}$ mm	$\leq 0,5 \sqrt{d}$ mm

De modo geral as normas tendem a seguir um modelo, entretanto, deve se ater às condições ambientais de cada país. O Brasil por ser um país tropical, possui condições ambientais bem diferentes dos países que já possuem normas para utilização dos adoquins cerâmicos. Este fato associado à aceitação do produto no mercado brasileiro são fatores relevantes para a elaboração de uma norma que especifique limites aceitáveis deste produto no Brasil. Além disto, é essencial criar recomendações para a implantação dos pavimentos, limitando espessura do colchão de areia, definindo materiais e espessura das camadas de base, e técnicas de assentamento.

No que se refere aos padrões brasileiros normativos de pavimentos intertravados, podemos citar, para fins comparativos, a norma que regulamenta requisitos de produção de **PPC**, onde são estabelecidos alguns parâmetros com limites admissíveis. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Requisitos físicos para a produção de **PPC** (ABNT 9781/1987)

Requisitos físicos		Limites admissíveis
Tolerância dimensional (mm)	Comprimento	$\pm 3,0$ mm
	Largura	$\pm 3,0$ mm
	Altura	$\pm 5,0$ mm
Resistência à compressão axial (MPa)	1	$\geq 35,0$ Veículos comerciais de linhas $\geq 50,0$
	2	Veículos especiais ou cargas que produzem acentuados efeitos de abrasão

O fato de o adoquim ser um produto novo no Brasil gera certo receio no mercado, sendo assim, como o **PPC** é o concorrente direto, a comparação de parâmetros técnicos entre eles é de extrema importância para eliminar dúvidas a respeito da qualidade do mesmo.

3.7. Considerações finais

Apesar de ser prática consolidada em países como Colômbia e Espanha, as pesquisas relacionadas ao tema ainda são incipientes e com pouca literatura disponível. As referências encontradas são de empresas que já produzem o adoquim cerâmico, com produção pouco praticada na última década do século XX, mas que se consolidou no início deste século. As empresas fornecem documentos com características técnicas, bem como recomendações de uso.

Juntamente com o produto surge a preocupação com padrões relacionados à sua aplicação, impulsionando os órgãos normatizadores a elaborarem normas que tratam especificamente sobre o assunto. Assim surgiram normas que versam sobre o uso e aplicação dos adoquins cerâmicos, estabelecendo recomendações e limites aceitáveis para implantação deste tipo de pavimento, como exemplo, pode-se citar a norma Americana ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS), a NTC (Norma Técnica Colombiana) e a Norma Européia UNE-NE.

O surgimento deste produto no mercado brasileiro chegou por influência da Colômbia. No Mato Grosso do Sul já existe uma unidade produzindo adoquim, embora as pesquisas sobre o tema estejam iniciando agora.

O interesse pelo adoquim cerâmico surgiu de suas altas qualidades tecnológicas, de sua durabilidade, além do aspecto econômico-ambiental associado ao mesmo. Matéria-prima abundante, e com possibilidades de assimilarem rejeitos, tal como o chamote, são características que engrandecem o seu interesse.

A produção de adoquins cerâmicos pelo pólo cerâmico campista surge com a expectativa de aprimorar os produtos da região, atrair novos mercados e concretizar as pesquisas, para desenvolvimento na região, de produtos com alto valor agregado. Embora o pólo encontre dificuldades devido à característica de refratariedade das

argilas de Campos, matérias-primas de outras regiões do país, como o argilito de Itu-SP e/ou a introdução de matérias-primas alternativas podem solucionar o problema.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir estão descritos os materiais e metodologia que foram utilizados neste trabalho. A Figura 4.1 descreve as etapas realizadas.

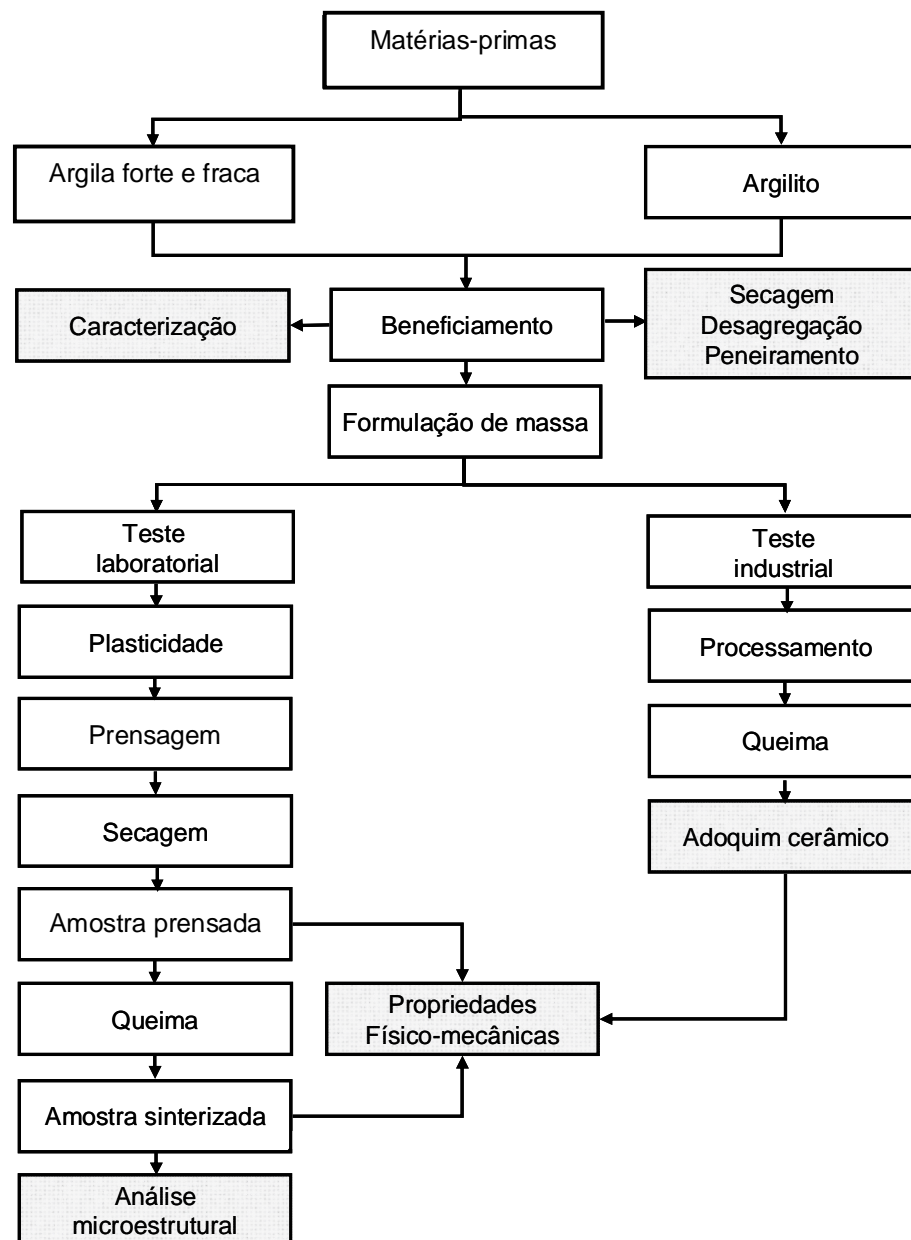


Figura 4.1. Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental.

4.1. Materiais

No desenvolvimento deste trabalho foram usadas como matérias-primas dois tipos de argilas do município de Campos dos Goytacazes provenientes de jazidas da Cerâmica Stilbe e o argilito, em forma de pó, proveniente da região de Itú – SP, usado para fabricação de cerâmica estrutural. As matérias-primas foram coletadas e encaminhadas ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. A Figura 4.2 apresenta a jazida de argilito em Itú-SP.



Figura 4.2. Jazida de argilito em Itú-SP.

4.2. Métodos

Na parte experimental foi realizada a caracterização das matérias-primas, a formulação das massas, um teste laboratorial, onde foi determinada a formulação ótima, seguido por um teste industrial e determinação das propriedades tecnológicas do produto.

I. Teste Laboratorial

4.2.1. Beneficiamento das matérias-primas

Após coleta, as matérias-primas foram secas em estufa laboratorial a 110°C durante 24 horas. Posteriormente foram desagregadas manualmente com almofariz e pistilo de porcelana até passagem completa em peneira de 35 mesh (abertura de 425µm).

4.2.2. Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas foram inicialmente submetidas a ensaios de caracterização mineralógica, química e física por meio do emprego das técnicas de difração de raios-X, fluorescência de raios-X, análise térmica diferencial e termo-gravimétrica, sedimentação por peneiramento e gravimetria e dilatométrica. A caracterização morfológica das matérias-primas foi realizada por microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.2.2.1. Difração de Raios-X (DRX)

Os minerais presentes nas matérias-primas foram determinados por difração de raios-X. Foram utilizadas amostras em forma de pó para identificação das fases cristalinas presentes. A análise foi realizada em difratômetro XRD 7000, marca SHIMADZU operando com radiação cobre (Cu-K_α) e 2θ variando de 5 a 60°, do LAMAV/UENF.

4.2.2.2. Composição química

Para a identificação dos componentes químicos das amostras, foi realizada análise química quantitativa utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X da marca Philips modelo PW 2400 do LAMAV/UENF.

4.2.2.3. Análises Térmicas (ATD/TG/DTG)

A análise termogravimétrica foi realizada em equipamento termoanalisador STA 409C, com taxa de aquecimento de 10°C/min. Esta análise foi realizada em equipamento BP engenharia, modelo BP 300.

4.2.2.4. Dilatometria

A dilatometria é uma técnica onde a mudança das dimensões de uma amostra, que está sendo submetida a uma programação controlada, é medida em função do tempo. Corpos de prova foram confeccionados com 2mm de diâmetro e 9mm de altura. Neste trabalho foi utilizado dilatômetro da marca BP engenharia, modelo BP 300, com taxa de aquecimento de 10°C.min⁻¹ e temperatura final de 1200°C.

A mudança de comprimento da amostra é usualmente expressada como:

$$(L_T - L_0)/L_0 \quad (4.1)$$

Onde L_T é o comprimento à temperatura T e L_0 é o comprimento em alguma temperatura padrão, geralmente 25°C. O Coeficiente de expansão α , a dada temperatura, é a derivada da expressão (4.1) pela temperatura.

4.2.2.5. Distribuição de tamanho de partículas

A análise granulométrica das matérias-primas foi realizada por peneiramento e sedimentação de acordo com a norma NBR 7181 (1984) no Laboratório de Engenharia Civil, LECIV/UENF. Inicialmente, as amostras passaram por operações preliminares de peneiramento grosseiro (até a peneira de 2mm – 10 mesh) e peneiramento fino (até a peneira de 0,075mm – 200 mesh). Para a realização do ensaio de sedimentação o material foi passado na peneira 200 mesh. O procedimento para o ensaio de sedimentação baseia-se na Lei de Stokes, na qual a velocidade terminal de sedimentação depende do tamanho de partícula e viscosidade do fluido determinado por:

$$V = gd^2 \frac{(\rho - \rho_f)}{18\eta} \quad (4.2)$$

Onde: V = velocidade terminal; g = gravidade; d = diâmetro esférico equivalente; ρ = massa específica do material; ρ_f = massa específica do fluido; η = viscosidade do meio fluido.

4.2.2.6. Microscopia ótica (MO)

A morfologia das matérias-primas foi avaliada por microscopia ótica em microscópio ótico TECNIVAL modelo CGA e posteriormente capturadas as imagens formadas.

4.2.2.7. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia das matérias-primas foi avaliada, também, por microscopia eletrônica de varredura no Laboratório de Microscopia Eletrônica do programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Para tal análise foi usado um microscópio Jeol, Modelo FSM 6460 LV. As amostras foram passadas em peneira de 20 mesh e posteriormente recobertas com ouro em metalizador Shimadzu modelo IC-50

4.2.3. Preparação das formulações

O objetivo desta etapa foi o de formular uma massa cerâmica compatível para a obtenção do pavimento cerâmico extrudado. Para isso, foi necessário considerar a plasticidade das formulações, fundência e granulometria. A Tabela 4.1 apresenta as formulações em porcentagem das matérias-primas usadas. A massa argilosa é uma mistura de duas argilas composta por 50% argila “forte” e 50% argila “fraca”, ambas da Cerâmica Stilbe.

Tabela 4.1. Composições estudadas. M – massa argilosa; A – argilito; AFO – argila FO

Composições	Massa argilosa (%) em peso	Argila forte (%) em peso	Argilito (%) em peso
M	100	-	-
M25A	75	-	25
M50A	50	-	50
AFO	-	100	-
AFO50A	-	50	50

A homogeneização das massas foi realizada em moinho de porcelana lisa e bolas durante 15 minutos e posteriormente as composições foram armazenadas em sacos plásticos.

4.2.3.1. Plasticidade

Foi realizado ensaio de plasticidade, no LECIV/UENF, nas formulações preparadas a fim de investigar o comportamento de extrusão das mesmas. A plasticidade foi determinada de acordo com as normas da ABNT NBR-7180 (ABNT, 1984a) e ABNT NBR-6454 (ABNT, 1984b), por meio da determinação dos limites de Atterberg. O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado por:

$$IP = LL - LP \quad (4.3)$$

Onde o limite de plasticidade (LP) é o teor de água, expresso em % do peso de pasta seca a 110°C, acima do qual a massa argilosa pode ser moldada em cilindros, com cerca de 3 a 4mm de diâmetro e 15cm de comprimento. O limite de liquidez (LL) é o teor de água, expresso em % do peso da pasta seca a 110°C, acima do qual a massa argilosa, ensaiada no aparelho de Casagrande, ao receber 25 golpes, consegue juntar os dois lados do sulco formado na massa.

4.2.4. Processamento dos corpos de prova

As formulações preparadas foram umedecidas com spray de água, até 8%, de modo a possibilitar a conformação por prensagem dos corpos de prova. Foram confeccionados sete corpos de prova por prensagem uniaxial e moldados em matriz cilíndrica com diâmetro igual a 20,25mm.

A prensagem, forma pela qual os corpos de prova foram conformados, pode minimizar a formação de defeitos superficiais e rugosidade. Os corpos de prova foram elaborados em duas faixas de massa específica que variou entre: faixa I de variação – 1,95 a 2,09g/cm³; faixa II de variação – 2,15 a 2,28g/cm³. A faixa I de variação é a faixa de massa específica geralmente usada na região de Campos dos Goytacazes, já a faixa II de variação foi empregada devido a sua utilização para a fabricação de adoquim no Mato Grosso, lá conhecido como Tropeiro. As duas faixas de variação de massa específica foram usadas para definir qual delas teria as melhores propriedades tecnológicas.

Posteriormente os corpos de prova foram secos em temperatura ambiente por 24 horas e após a secagem natural os corpos de prova foram encaminhados para uma estufa com temperatura de 110°C até alcançarem peso constante. Este procedimento foi realizado para estabilizar a massa dos corpos de prova evitando o trincamento das peças durante a queima.

Os corpos de prova foram queimados em forno laboratorial tipo mufla da EDG, modelo 3P-S, nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C. O ciclo de queima utilizado simulou, dentro das limitações laboratoriais, condições industriais de queima. A taxa de aquecimento foi de 2°C/min, com 30 minutos na temperatura de patamar. O resfriamento foi realizado por convecção natural, desligando-se o forno.

4.2.5. Ensaio físicos e mecânicos

Após a queima, os corpos de prova das composições elaboradas, foram submetidos à determinação de propriedades tecnológicas tais como: massa específica aparente, absorção de água, retração diametral e compressão uniaxial de acordo com os procedimentos técnicos.

4.2.5.1. Massa específica aparente

Para a determinação da massa específica aparente das peças secas e queimadas foi utilizado o método dimensional, de acordo com a norma ASTM C 373-72 (1997). A massa específica aparente foi calculada utilizando a seguinte expressão:

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \quad (4.4)$$

Onde ρ_{ap} é a densidade aparente da peça seca ou queimada (g/cm^3); M é a massa (g) e V é o volume (cm^3) dos corpos de prova, secos ou queimados, respectivamente.

4.2.5.2. Retração diametral de queima

As dimensões das peças secas ou queimadas foram determinadas com o auxílio de um paquímetro digital marca MITUTOYO (resolução $\pm 0,01\text{mm}$). Posteriormente a retração diametral (R_D) foi calculada por meio da seguinte expressão:

$$R_D (\%) = \frac{(D_s - D_q)}{D_s} 100 \quad (4.5)$$

Onde D_s e D_q representam o diâmetro do corpo de prova após secagem e queima, respectivamente.

4.2.5.3. Absorção de Água

Após a etapa de queima os corpos de prova foram submetidos a ensaios de absorção de água de acordo com a norma ASTM C373-72 (ASTM, 1977). Os corpos de prova foram pesados e em seguida foram colocados em recipiente com água fervente por 2 horas e resfriados submersos em água. Em seguida retirou-se a água superficial de cada peça e registrou-se a massa. A absorção de água (AA) foi calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$AA (\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} 100 \quad (4.6)$$

Onde P_u e P_s são as massas (g) das peças saturadas em água (úmidas) e secas, respectivamente.

4.2.5.4. Resistência a compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial foi determinado de acordo com a norma ASTM D-2938/C-170 em máquina universal de ensaios de acionamento mecânico, marca Instron, modelo 5582, com velocidade igual a 1mm/min. A resistência a compressão (σ) foi determinada pela seguinte expressão:

$$(\sigma) = \frac{F}{\pi r^2} \quad (4.7)$$

Onde σ é a resistência à compressão, (MPa); F é a carga aplicada no corpo de prova no momento da ruptura, (Newton); r é o raio do corpo de prova (mm).

4.2.6. Análise microestrutural

As cerâmicas queimadas às temperaturas de 850 e 1050°C foram selecionadas para avaliação microestrutural por meio de MO e MEV. Foram investigadas também as fases formadas durante a queima por meio da técnica de DRX.

4.2.6.1. Microscopia ótica (MO)

As cerâmicas destinadas à análise de MO foram previamente preparadas com lixa nº 1200 apropriada para superfícies molhadas. As cerâmicas avaliadas foram queimadas em 850 e 1050°C, para ambas as faixas de variação de massa específica. Para a realização da análise por MO, foi usado um microscópio ótico TECNIVAL modelo CGA.

4.2.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A superfície das cerâmicas queimadas foi analisada por MEV, em amostras lixadas com lixa nº 1200. Após o preparo da superfície, as amostras foram secas e metalizadas em metalizador SHIMADZU, modelo IC-50. A análise foi realizada na COPPE/UFRJ como descrito no item 4.2.2.6. As cerâmicas usadas foram queimadas

em temperaturas de 850 e 1050°C, para ambas as faixas de variação de massa específica.

4.2.6.3. Difração de Raios-X (DRX)

A técnica de difração de raios-X foi utilizada para determinar as fases presentes nas cerâmicas queimadas a 850 e 1050°C, para ambas as faixas de variação de massa específica. O equipamento utilizado foi o mesmo empregado no item 4.2.2.1.

II. Teste industrial

Esta etapa consistiu na produção de adoquins cerâmicos em escala industrial na Cerâmica Stilbe Ltda. Para o teste industrial foram escolhidas as formulações **M**, **AFO** e **AFO50A**. A escolha da argila forte teve o objetivo de maximizar a resistência mecânica das peças em detrimento a uma plasticidade ótima quando se utiliza a argila fraca. Para o adocim **AFO50A** a plasticidade é controlada pelo quartzo presente no argilito. A Figura 4.3 apresenta o argilito moído com tamanho inferior a 2,5mm, a argila forte e a argila fraca no pátio da cerâmica Stilbe.



Figura 4.3. Argilito (a); Argila forte (b); Argila fraca (c).

Para a realização deste teste, foi construído um forno cerâmico intermitente tipo abóboda com material refratário compatível com comportamento térmico das argilas de Campos dos Goytacazes. Este forno suporta temperaturas que possibilitam alcançar o nível de porosidade compatível com as características do produto.

Os fornos atuais das cerâmicas de Campos dos Goytacazes foram construídos com tijolos refratários que não suportam temperaturas acima de 950°C. A utilização de

temperaturas de queima acima de 950°C possibilita, juntamente com a presença de fundente na massa cerâmica, obter pavimentos com uma microestrutura, porosidade e fases formadas compatível com os valores de absorção de água e de resistência mecânica exigidos por norma. A Figura 4.4 apresenta o forno construído para a produção de adoquins.



Figura 4.4. Forno industrial tipo abóboda.

4.2.7. Processo de confecção do adoquim cerâmico

O teste industrial consistiu na dosagem das matérias-primas, desagregação, laminação, extrusão, secagem e queima, conforme ilustrado na sequência da Figura 4.5. A temperatura de queima utilizada neste teste foi de aproximadamente 950°C. Esta temperatura foi escolhida com o intuito de diminuir gastos de energia durante a queima do produto e por ter apresentado resultados satisfatórios no teste laboratorial. Esta temperatura associada à massa específica na faixa II de variação resultará um produto com propriedades tecnológicas dentro das normas. Porém, torna-se necessário uma adequação do processo produtivo para que a massa específica fique dentro da faixa II de variação.

As peças foram colocadas em uma única camada na parte superior do forno e a temperatura de queima foi controlada, permanecendo em torno de 950°C.



Figura 4.5. Processamento industrial do adoquim. Dosagem das matérias-primas (a), desagregação (b), laminação (c), extrusão (d) e (e), secagem (f) e (g) e queima (h).

4.2.8. Propriedades tecnológicas

Os pavimentos cerâmicos devem atender as características técnicas de ataque químico e absorção de água (ABNT 13818, 1997). A resistência à compressão foi realizada seguindo a norma para **PPC**, (ABNT 9780, 1987), ilustrado na Figura 4.6.



Figura 4.6. Ensaio de resistência mecânica (a) adoquim e (b) **PPC**.

A resistência ao ataque químico avalia mudanças na superfície das peças cerâmicas após o contato com agentes químicos durante um tempo pré-determinado, conforme ensaio descrito na Norma NBR 13818 – Anexo H. Os produtos químicos utilizados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Produtos químicos usados conforme NBR 13818/1997 (Anexo H)

Tipos de reagentes químicos		Peças não esmaltadas
Químicos domésticos		Cloreto de amônia (100g/L)
Tratamento de piscinas		Hipoclorito de sódio 20mg/L
Ácidos	Baixa concentração	Ácido clorídrico (3%) (v/v) Ácido cítrico 100g/L
	Alta concentração	Ácido clorídrico (18%) (v/v) Ácido láctico (5%) (v/v)
Álcalis	Baixa concentração	Hidróxido de potássio (30g/L)
	Alta concentração	Hidróxido de potássio (100g/L)

Os corpos de prova foram mantidos mergulhados parcialmente nas soluções durante 12 dias. Após os 12 dias os mesmos foram retirados do recipiente e deixados submersos em água corrente por 5 dias. A seguir, foram ferveridos por 30 minutos,

mantendo os corpos de prova totalmente submersos na água. Por fim, os corpos de prova foram retirados da água e secos em estufa.

Foi feita uma avaliação visual para se determinar a classe de resistência nos corpos de prova segundo a ABNT 13818, além de verificar a perda de massa ocorrida durante o ensaio.

Passo I – Avaliação visual:

a) os corpos de prova foram examinados a olho nu procurando identificar qualquer alteração na superfície do lado cortado;

b) examinaram-se as arestas que estavam submersas durante o ensaio;

c) os revestimentos cerâmicos não esmaltados foram classificados em classes de resistência química A, B e C de acordo com a solução química utilizada no ensaio e a alteração verificada:

i) para os produtos químicos domésticos e para tratamento de água e piscina, adotar a seguinte classificação:

- Classe UA - Efeitos não visíveis;

- Classe UB - Efeitos visíveis no lado do corte; e

- Classe UC - Efeitos visíveis no lado do corte, no lado sem corte e na superfície.

ii) para os ácidos e álcalis de baixa concentração adotar a seguinte classificação:

- Classe ULA - Efeitos não visíveis;

- Classe ULB - Efeitos visíveis no lado do corte; e

- Classe ULC - Efeitos visíveis no lado do corte, no lado sem corte e na superfície.

iii) para os ácidos e álcalis de alta concentração adotar a seguinte classificação:

- Classe UHA - Efeitos não visíveis;

- Classe UHB - Efeitos visíveis no lado do corte; e

- Classe UHC - Efeitos visíveis no lado do corte, no lado sem corte e na superfície.

Passo II – Perda de massa:

As massas dos corpos de prova foram medidas antes e após o ensaio, em seguida a perda de massa foi determinada pela expressão:

$$PM(\%) = \frac{(M_i - DM_f)}{D_i} 100 \quad (4.8)$$

A norma utilizada para realizar este ensaio não exige determinar a perda de massa, porém a mesma foi verificada para fins comparativos com as normas internacionais.

4.2.9. Análise microestrutural

As cerâmicas queimadas à temperatura de 950°C no teste industrial foram selecionadas para avaliação microestrutural em microscópio confocal OLYMPUS, modelo Lext OLS 4000.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

I. Teste Laboratorial

5.1. Caracterização das matérias-primas

5.1.1. Caracterização das argilas

5.1.1.1. Caracterização mineralógica

Difratometria de raios-X das argilas

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os difratogramas de raios-X das argilas forte e fraca respectivamente. Observa-se que as duas argilas investigadas apresentam composição mineralógica similar com a presença de picos de difração predominantes, correspondentes à caulinita - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e ao quartzo - (SiO_2) . Outros minerais identificados são a gibsita - $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ e mica muscovita - $(\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$. Nota-se também picos de baixa intensidade em 2θ de 6,4 e 7,4 grau. Estes picos de difração podem estar associados a minerais esmectícios. O quartzo se constitui na principal impureza presente. A presença de gibsita em ambas as argilas indica que nem toda a alumina (Al_2O_3) esteja na estrutura dos argilominerais. A gibsita é um mineral que contribui para aumentar a perda ao fogo e refratariedade das argilas e da perda de massa durante a queima (MONTEIRO, VIEIRA, 2004). A mica muscovita é um mineral com textura lamelar que pode ocasionar o aparecimento de defeitos nas peças cerâmicas. Desde que apresente tamanho de partícula reduzido, a mica muscovita pode atuar como fundente devido à presença de óxidos alcalinos.

As argilas caulínicas, predominantes em Campos dos Goytacazes, são caracterizadas por apresentarem um comportamento de queima refratário (VIEIRA, MONTEIRO, 2004; VIEIRA *et al.*, 2005). Temperaturas máximas da ordem de 1200°C a 1350°C são consideradas normais para estas argilas, em aplicações específicas de materiais refratários e porcelanas (ABAJO, 2000).

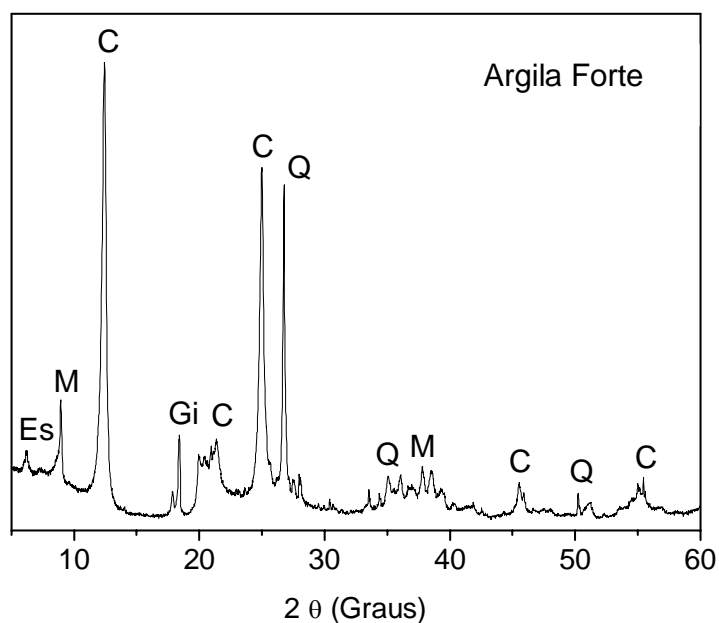


Figura 5.1. Difratograma de raios-X da argila forte. **C** = caulinita; **Q** = quartzo; **M** = mica muscovita; **Gi** = gibsieta; **Es** = minerais esmectícos.

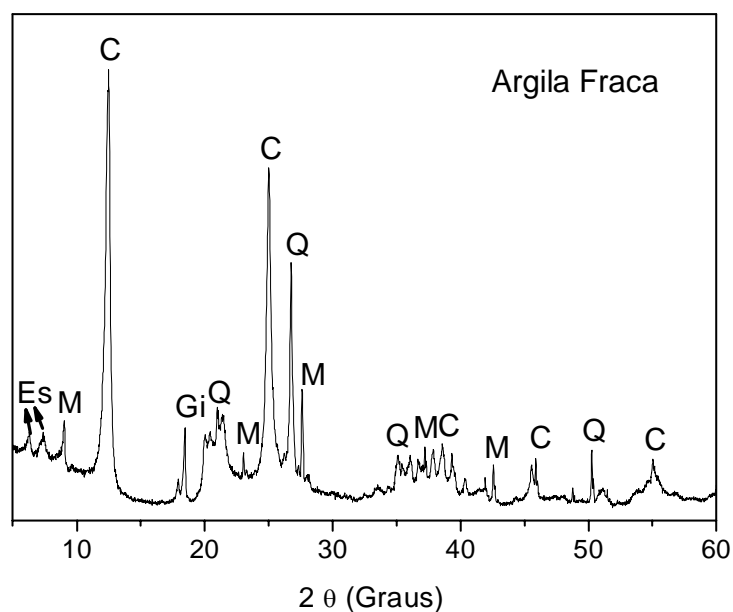


Figura 5.2. Difratograma de raios-X da argila fraca. **C** = caulinita; **Q** = quartzo; **M** = mica muscovita; **Gi** = gibsieta; **Es** = minerais esmectícos.

Análise termogravimétrica das argilas

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam o comportamento térmico das argilas forte e fraca simultaneamente, análise gravimétrica (TG/DTG) e análise térmica diferencial (ATD) respectivamente. Pode-se observar que ambas as argilas possuem

comportamento térmico semelhante. Nas temperaturas iniciais de aquecimento ocorrem perdas de massa de 3,3 e 2% para as argilas forte e fraca, respectivamente. Esta perda de massa inicial é atribuída à eliminação de água de umidade. Entre as temperaturas de 250 e 275°C ocorre uma reação endotérmica com perdas de massa de 5,2 e 2,1% para as argilas forte e fraca, respectivamente. Essas perdas ocorrem devido à eliminação de água de hidróxidos como, por exemplo, a gibisita identificada no DRX. As maiores perdas de massa, 10,1% para argila forte e 5,1% para a argila fraca, estão associadas com a desidroxilação da caulinita, pico endotérmico à aproximadamente 480°C.

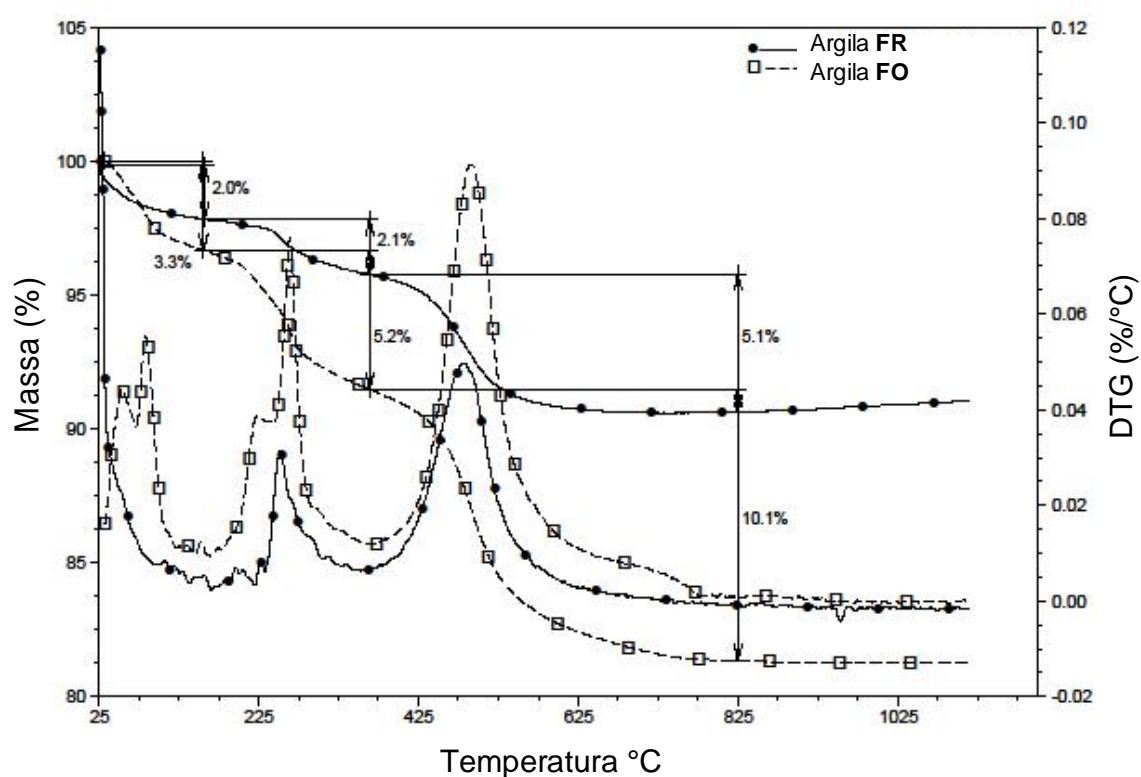


Figura 5.3. Curvas de TG/DTG das argilas.

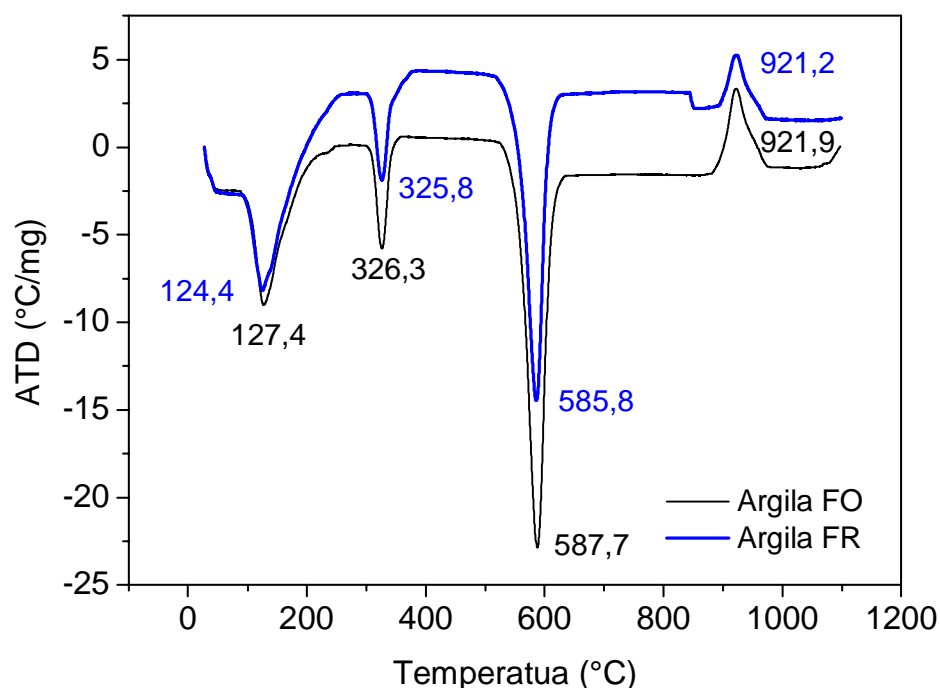


Figura 5.4. Curvas de ATD das argilas.

Dilatometria das argilas

As curvas dilatométricas a cru das argilas são apresentadas na Figura 5.5. De um modo geral, nota-se que ambas as argilas apresentam comportamentos dilatométricos semelhantes. Pode-se observar um comportamento típico de material caulínico (GOMES, 1988). A massa argilosa rica em caulinita apresenta uma pequena dilatação até cerca de 550°C, seguido de duas retrações, sendo a última bem acentuada. A dilatação inicial observada se deve, fundamentalmente, à expansão térmica que os materiais sofrem quando aquecidos. Entretanto, por volta de 573°C, a dilatação mais pronunciada está associada à transformação alotrópica do quartzo (BARBA *et al.*, 1997; EMILIANI, CORBARA, 1999)

A partir de 600°C ocorre uma retração brusca, devido à aproximação das partículas, provocada pela perda de água de cristalização e consequente transformação de caulinita em meta caulinita (PINTO, 1999). A segunda retração por volta de 880°C é atribuída ao início da sinterização por formação de fase líquida.

Por fim, nota-se que até 600°C a argila fraca se expande mais que a argila forte. Isto é devido à maior presença de quartzo na argila fraca. Já a retração das argilas é similar. Entretanto, a argila forte se retrai em temperaturas ligeiramente menores.

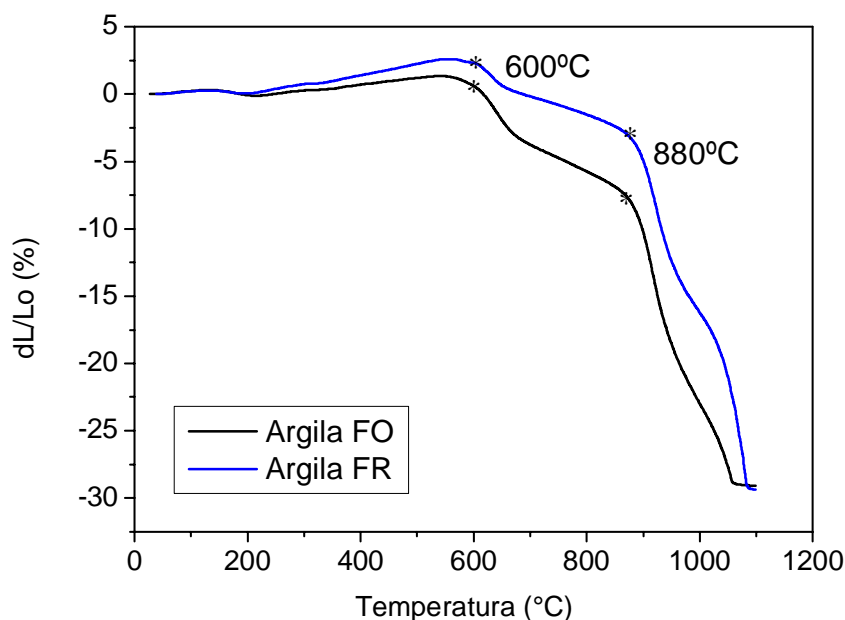


Figura 5.5. Dilatometria das argilas forte e fraca.

5.1.1.2. Caracterização química

Fluorescência de Raios-X das argilas

A Tabela 5.1 apresenta a composição química das argilas. Observa-se que as argilas possuem composição química similar. Nota-se que ambas as argilas são, predominantemente, constituídas de SiO_2 e Al_2O_3 , os quais estão em sua maior parte combinados formando os aluminossilicatos como a mica muscovita e a caulinita, por exemplo.

O elevado teor de óxido de ferro, tanto na argila forte quanto na argila fraca, confere uma coloração avermelhada ao produto após a queima. Quanto aos óxidos fundentes nota-se que aparecem traços para CaO e K_2O e não aparece Na_2O . Os óxidos alcalino-terrosos CaO e MgO estão presentes na estrutura da mica muscovita e eventualmente na montmorilonita. Os óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O) são fundentes muito ativos e tem como finalidade a formação de fase líquida, necessária para uma densificação acentuada da cerâmica após a queima com consolidação das partículas.

Nas argilas de Campos, estes óxidos se encontram formando compostos como a mica muscovita. Traços de feldspatos, mineral que dá origem a argila, são eventualmente identificados nas argilas da região. A perda ao fogo (PF) ocorre principalmente devido à perda de água de constituição dos argilominerais, desidratação de hidróxidos, oxidação de matéria orgânica e decomposição de carbonatos. A elevada perda ao fogo das argilas está associada, sobretudo, à perda de água de constituição da caulinita e ainda à desidratação da gibsita, mostrado no comportamento térmico das argilas.

Tabela 5.1. Composição química das argilas (% em peso)

Composição	Matérias-primas	
	Argila Fraca	Argila Forte
Fe ₂ O ₃	9,92	10,05
Al ₂ O ₃	21,61	26,78
MgO	0,86	0,71
Na ₂ O	-	-
SiO ₂	54,7	46,09
P ₂ O ₅	0,25	0,31
K ₂ O	2,47	1,66
CaO	0,57	0,34
TiO ₂	1,35	1,59
MnO	0,17	-
P.F.	7,56	11,96

5.1.1.3. Caracterização física

Distribuição de tamanho de partículas das argilas

A Figura 5.6 apresenta as curvas de distribuição de tamanho de partículas das argilas. Nota-se que o teor de argilomineral ou “fração argila” é de 50,01% em massa para argila forte e de 32,5% para a argila fraca, o que confere maior plasticidade à argila forte em comparação à argila fraca. A “fração argila” está associada com tamanho de partícula inferior a 2µm e confere à massa cerâmica plasticidade em mistura com água, possibilitando assim alcançar uma consistência plástica que possibilita conformar as peças por extrusão. Isto ocorre porque os argilominerais, responsáveis pelo aporte de plasticidade estão associados a este intervalo de tamanho de partícula (ABAJO, 2000; SANTOS, 1989). A maior plasticidade da argila forte em comparação à argila

fraca é atribuída ao maior percentual de argilominerais. Essa diferença do percentual da fração argila da argila forte para a argila fraca é de 17,51%.

O teor de silte, partículas com tamanhos compreendidos entre 2 e 20 μm , é de 38,32% para argila forte e de 27,5% para a argila fraca. Já o teor de areia, correspondente a partículas maiores que 20 μm , é de 11,67% para argila forte e de 40% para a argila fraca.

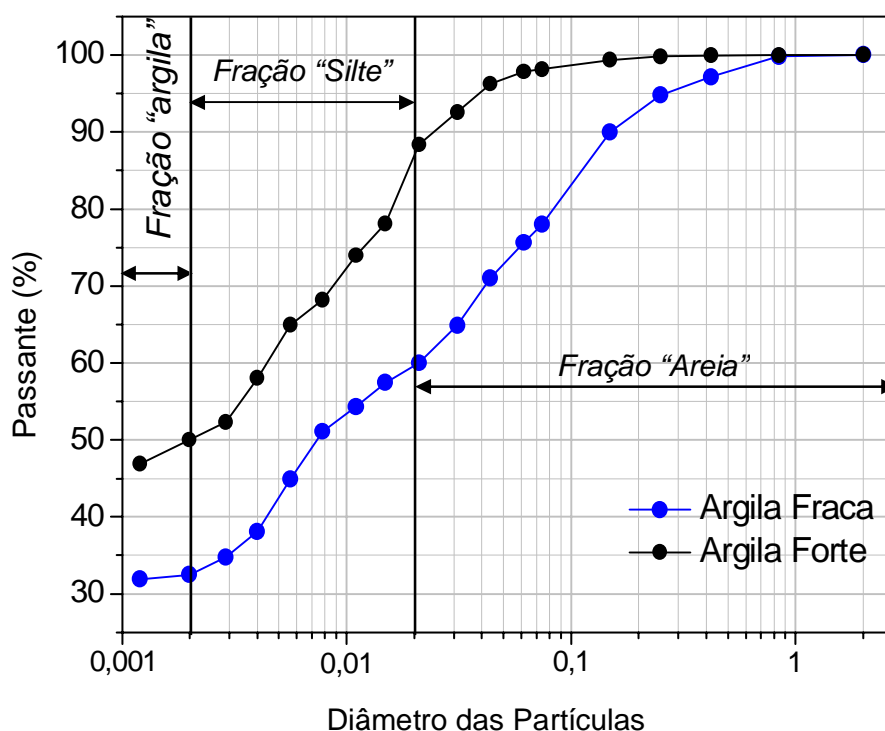


Figura 5.6. Curva de distribuição de tamanho das partículas das argilas fraca e forte.

5.1.1.4. Caracterização morfológica das argilas

Microscopia ótica das argilas

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam a morfologia das argilas forte e fraca obtida por MO. As micrografias (a) e (b) correspondem às partículas retidas na peneira de 230 mesh (0,063mm). Já as micrografias (c) e (d) correspondem às partículas com tamanhos inferiores a 0,063mm. A limitação da técnica de MO dificulta a identificação das partículas. Entretanto, é possível observar com certa clareza a presença de mica,

quartzo e partículas com coloração avermelhada e escuras, além de uma variedade de tamanho de partículas.

Na Figura 5.7 (a), argila forte, nota-se a presença de partículas de mica, circulada em preto. Já na Figura 5.8 (a) e (b), argila fraca, aparecem partículas avermelhadas, circuladas em branco, que podem ser de hidróxidos de Fe, além de minerais ferromagnesianos. Observa-se ainda a presença de partículas de quartzo, indicadas por seta. Já as micrografias (c) e (d), mostram para ambas as argilas um aglomerado de partículas finas de coloração amarelada. As micrografias (c) e (d) mostram partículas com tamanhos variados formados, sobretudo, por aglomerados de agilominerais. A coloração amarelada indica que o ferro pode estar presente na estrutura da caulinita e ainda que hidróxidos de ferro apresentem partículas de pequeno tamanho.

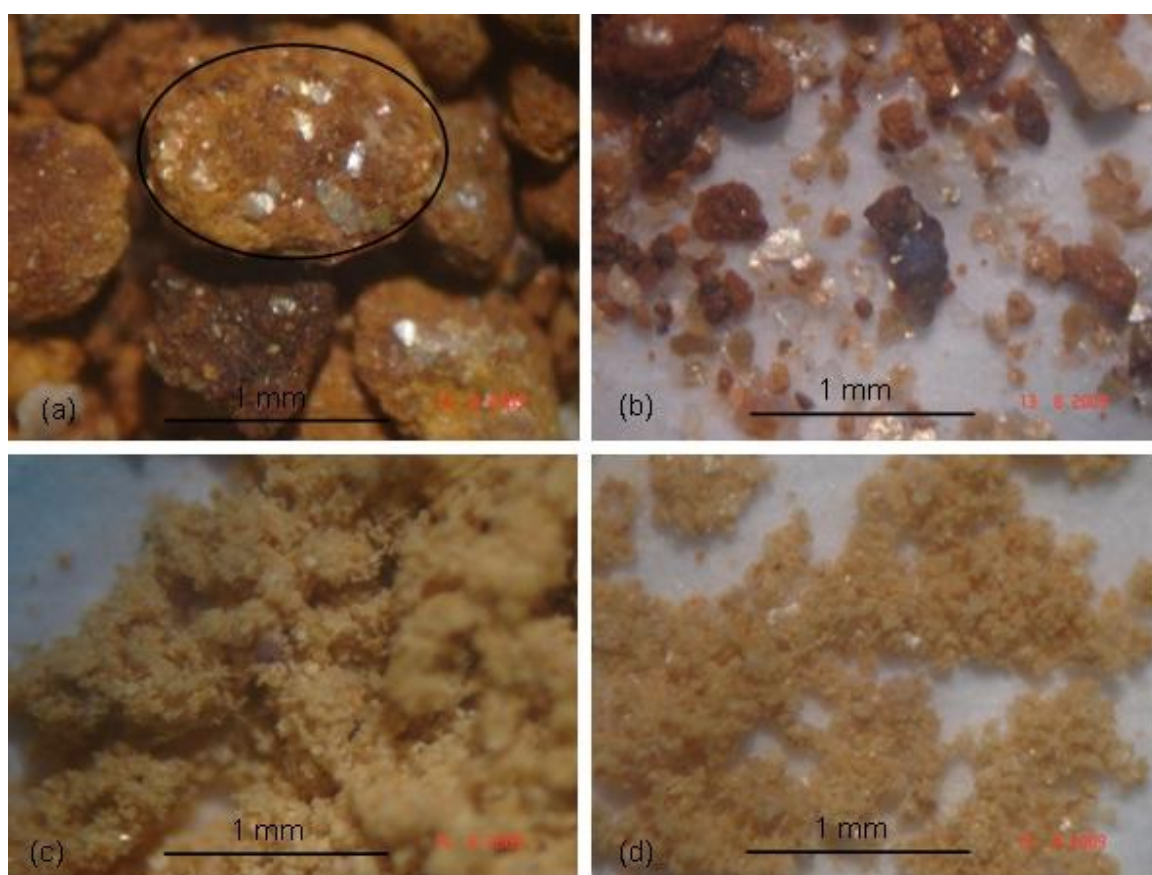


Figura 5.7. Micrografias obtidas por MO da argila forte. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.

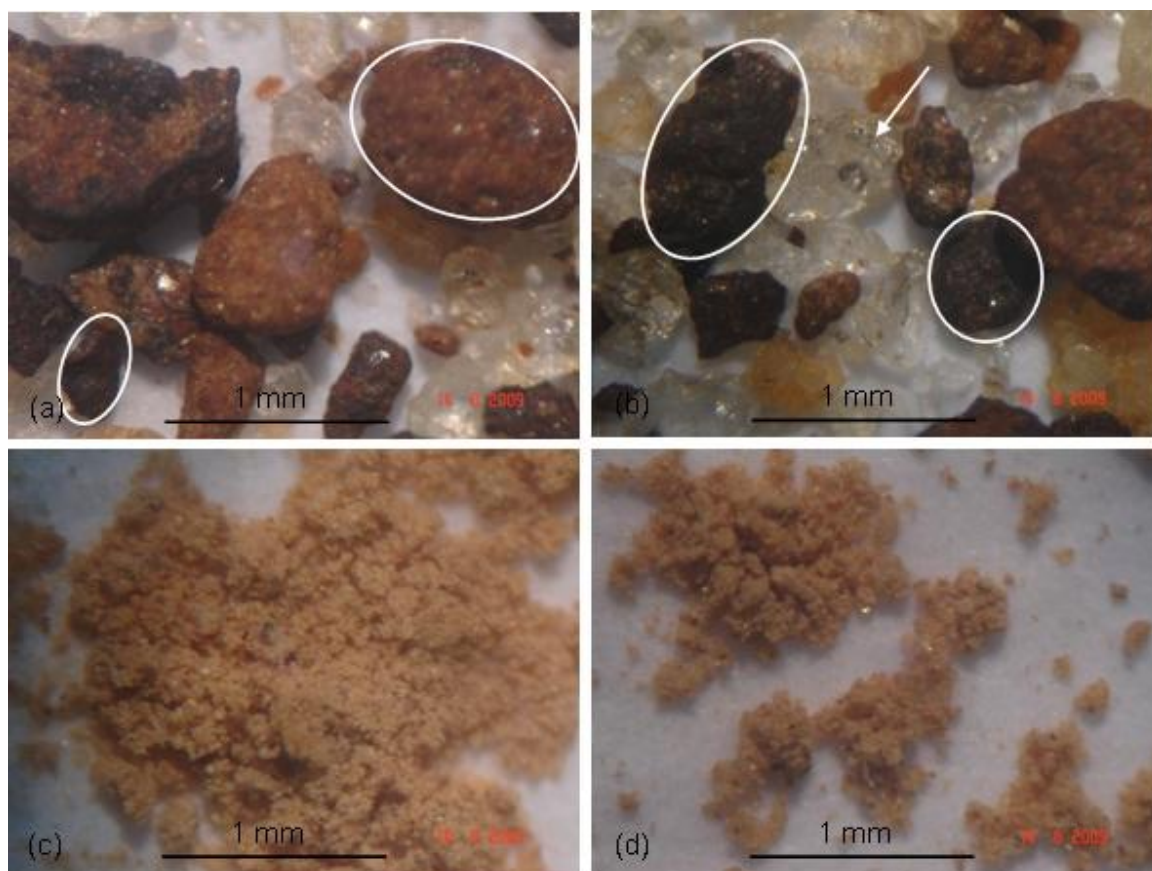


Figura 5.8. Micrografias obtidas por MO da argila fraca. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.

Microscopia eletrônica de varredura das argilas

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam micrografias obtidas por MEV das argilas forte e fraca, com análise química pontual por EDS. Observa-se que tanto a argila forte quanto a argila fraca apresentam pequenas partículas de morfologia pseudo-hexagonais associadas provavelmente a caulinita, argilomineral presente nas argilas. Pelo mapeamento com análise química pontual por EDS é possível observar, para ambas as argilas e para todos os pontos analisados, partículas constituídas principalmente por Si, Al e Fe.

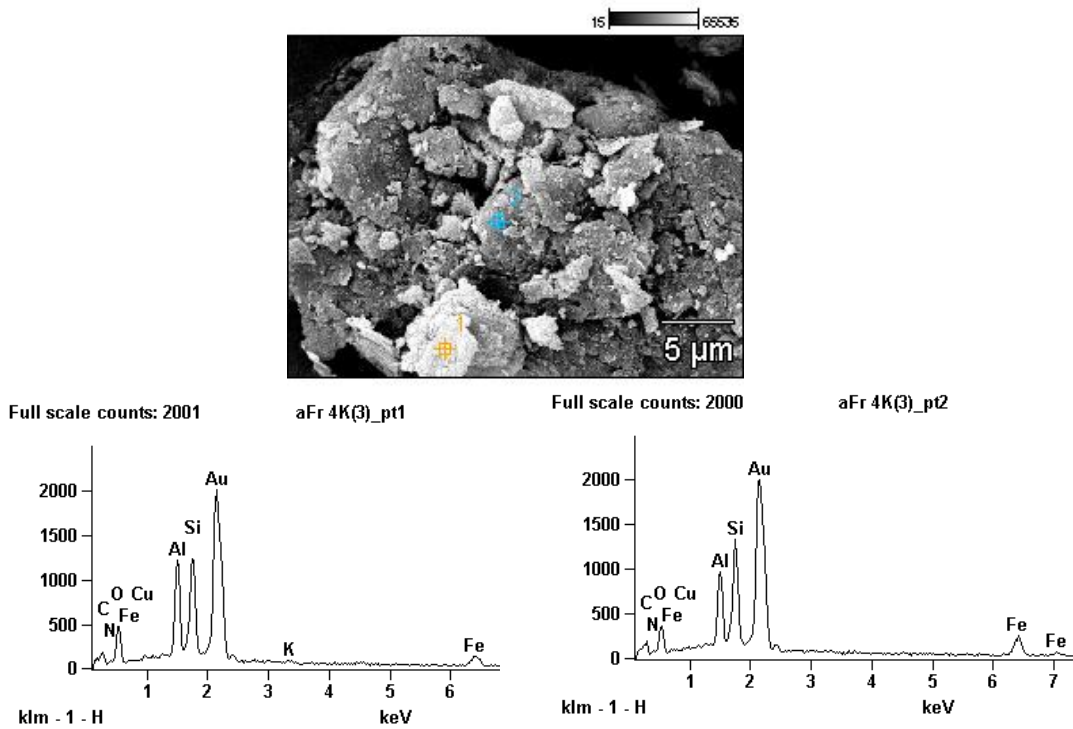


Figura 5.9. Micrografias obtidas por MEV da Argila forte, com análise química pontual por EDS.

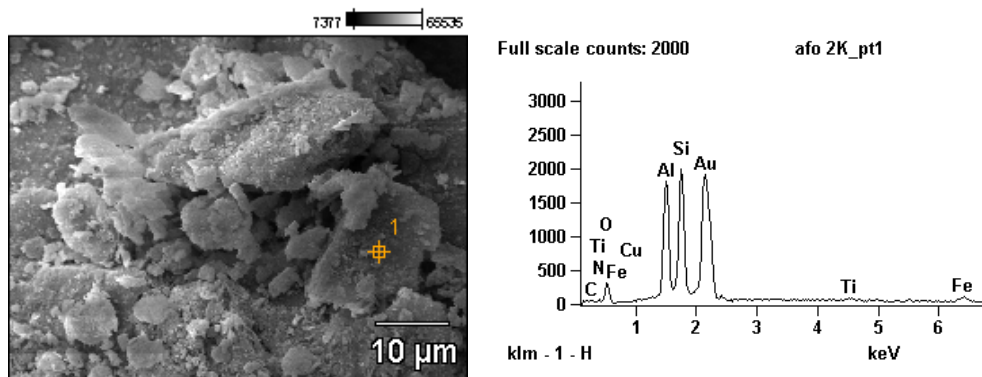


Figura 5.10. Micrografias obtidas por MEV da Argila fraca, com análise química pontual por EDS.

5.1.2. Caracterização do Argilito

5.1.2.1. Caracterização mineralógica

Difratometria de Raios-X do argilito

A Figura 5.11 apresenta os difratograma de raios-X do argilito. O argilito apresenta em sua composição mineralógica o quartzo, a caulinita, a microclina e o feldspato plagioclásio (anortita). Os picos de difração identificados como mineral micáceo podem indicar a presença da mica muscovita e também da ilita. Esta composição mineralógica é bastante similar às argilas o que possibilita sua utilização como material alternativo em massas cerâmicas.

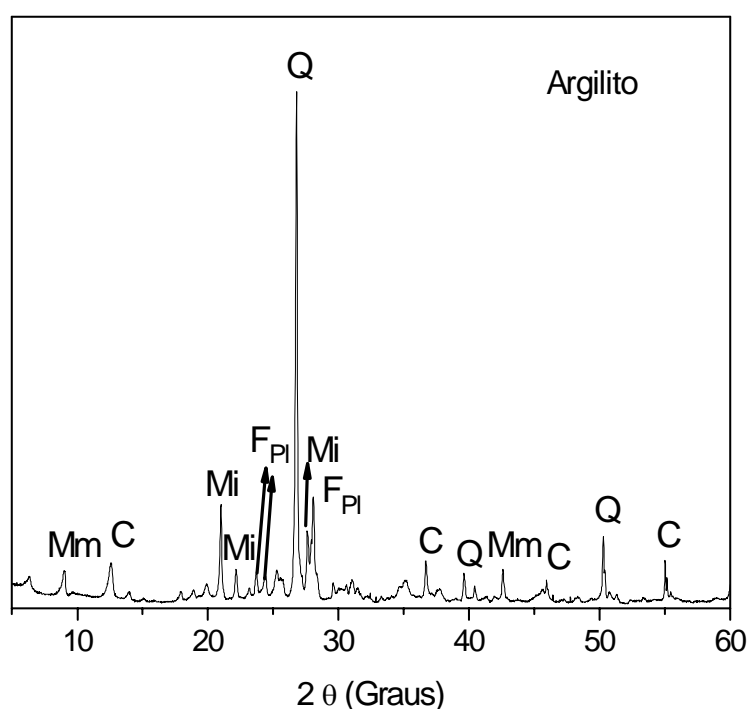


Figura 5.11. Difratograma de raios-X do Argilito. **C** = caulinita; **Q** = quartzo; **Mm** = mineral micáceo; **Mi** = microclina **F_{PI}** = feldspatos plagioclásios.

Análise termogravimétrica do argilito

As Figuras 5.12 e 5.13 mostram o comportamento térmico TG/DTG e ATD do argilito. Observa-se inicialmente uma perda de massa de 3,2% associada à eliminação de água de umidade. Por volta de 175°C ocorre uma pequena perda de massa

referente à eliminação de água adsorvida, seguida pela eliminação de água de hidróxidos que ocorre próxima à temperatura de 275°C equivalente a 0,7% no total. Na faixa de temperatura entre 425 a 625° ocorre um pico endotérmico representando uma perda de massa de 2,3% que pode ser associado à desidroxilação da caulinita e eventualmente da illita, por volta de 590°C. A 917,4°C há um pico exotérmico que está associado à decomposição da metacaulinita (VIEIRA *et al.*, 2004).

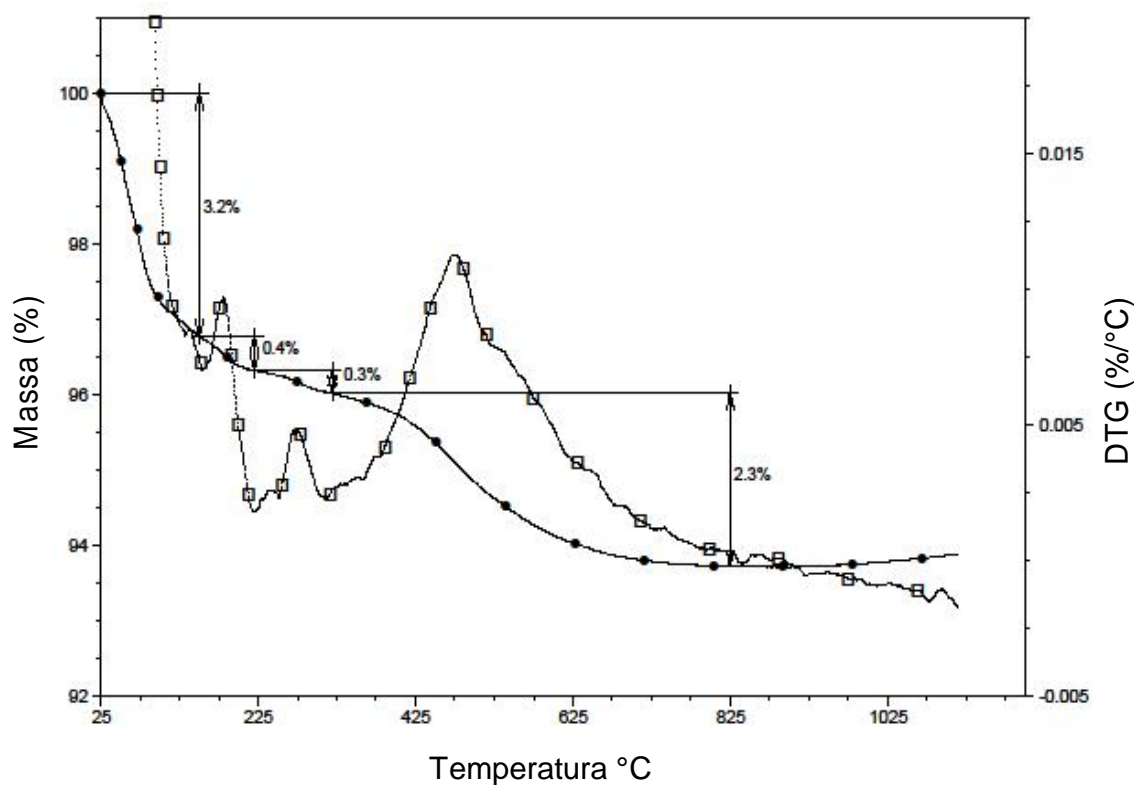


Figura 5.12. Curvas de TG/DTG do argilito.

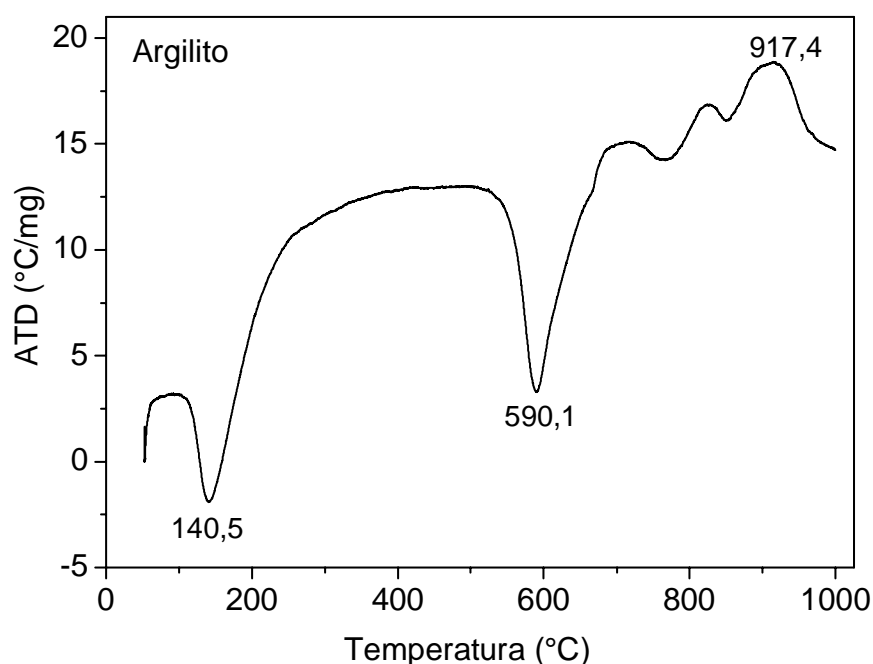


Figura 5.13. Curva de ATD do argilito.

Dilatometria do argilito

A Figura 5.14 apresenta o comportamento dilatométrico do argilito. Observa-se que ocorre uma dilatação com tendências distintas, sendo a segunda mais acentuada que a primeira. Conforme apresentado anteriormente, o argilito possui uma composição mineralógica similar à composição das argilas. Entretanto, com um maior teor de quartzo, menor teor de argilomineral e menor perda ao fogo.

No gráfico da Figura 5.14, pode-se observar duas regiões distintas de dilatação. A dilatação da região I está basicamente associada às vibrações atômicas. Já a dilatação da região II, iniciando em aproximadamente a 573°C, assim como as argilas, é atribuída à dilatação alotrópica do quartzo.

Em comparação com as curvas dilatométricas das argilas, nota-se que a dilatação associada ao quartzo é muito mais pronunciada no argilito. Na prática, isto indica que, o uso do argilito numa formulação de massa vai requerer um cuidado maior no ciclo de queima, para evitar o aparecimento de trincas.

Já a partir de 850°C o argilito apresenta uma brusca retração, associada à sinterização por formação de fase líquida. Nota-se que esta temperatura de 850°C é ligeiramente menor que a temperatura na qual as argilas apresentam uma retração

brusca devido à sinterização por formação de fase líquida. Isto ocorre devido à maior quantidade de fundentes, menor teor de alumina e maior teor de quartzo no argilito em comparação às argilas, o que favorece uma maior formação de fase líquida numa temperatura menor.

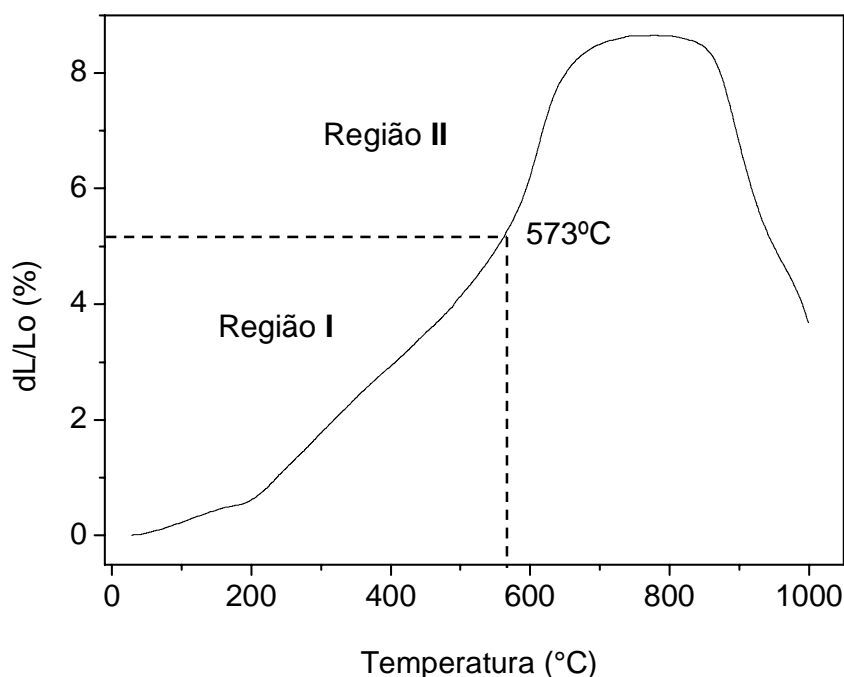


Figura 5.14. Dilatometria do argilito.

5.1.2.2. Caracterização química

Fluorescência de Raios-X do argilito

A Tabela 5.2 apresenta a composição química do argilito. Pode-se observar que o argilito apresenta em sua composição química baixos teores de alumina associados a elevados teores de sílica, comportamento similar é observado nas argilas estudadas. Do mesmo modo que as argilas o argilito apresenta teores relativamente elevados de óxido de ferro que vai contribuir, portanto, para a coloração avermelhada das cerâmicas. O argilito apresenta maiores teores de óxidos fundentes, contribuindo para a formação de fase líquida durante a queima, e menor perda ao fogo em relação às argilas. A presença de óxidos fundentes, da baixa perda ao fogo do argilito e do menor teor de alumina e maior teor de sílica são de fundamental importância para melhorar as

propriedades de queima das cerâmicas corrigindo as deficiências das argilas. Conseqüentemente esses fatores associados serão de grande importância para a produção do adoquim.

Tabela 5.2. Composição química da argilito (% em peso)

Composição	Matéria-prima
	Argilito
Fe ₂ O ₃	5,84
Al ₂ O ₃	16,34
MgO	2,29
Na ₂ O	0,82
SiO ₂	63,07
P ₂ O ₅	0,2
K ₂ O	4,02
CaO	0,48
TiO ₂	0,79
MnO	-
P.F.	5,65

5.1.2.3. Caracterização física

Distribuição de tamanho de partículas do argilito

A Figura 5.15 apresenta a distribuição de tamanho de partículas do argilito. Pode-se observar que o argilito apresenta granulometria mais grosseira em comparação às argilas, sendo seu teor de “fração argila” igual a 14,97% conferindo-o uma baixa plasticidade. O argilito apresenta granulometria mais grosseira do que ambas as argilas. Esta característica melhora o grau de empacotamento das cerâmicas, além disso, pode exercer papel importante na etapa de secagem devido à morfologia de suas partículas.

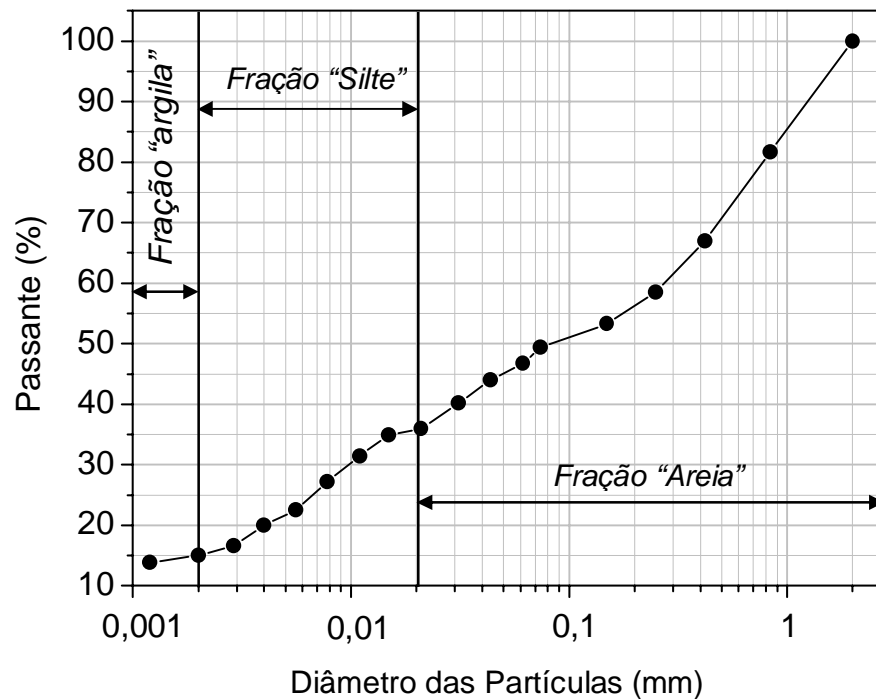


Figura 5.15. Curva de distribuição de tamanho de partículas do argilito.

5.1.2.4 - Caracterização morfológica

Microscopia ótica do argilito

A Figura 5.16 apresenta micrografias obtidas por MO do argilito. São observadas, na Figura 5.16 (a) e (b), partículas de diferentes tamanhos apresentando cor acinzentada e algumas partículas de quartzo indicadas por setas. A partícula avermelhada circulada pode ser de minerais ferrosos como a hematita ou de hidróxido de ferro. As partículas acinzentadas são possivelmente fragmentos da rocha. São observados, na Figura 5.16 (c) e (d), aglomerados de partículas finas também associadas, sobretudo, aos argilominerais presentes no argilito.

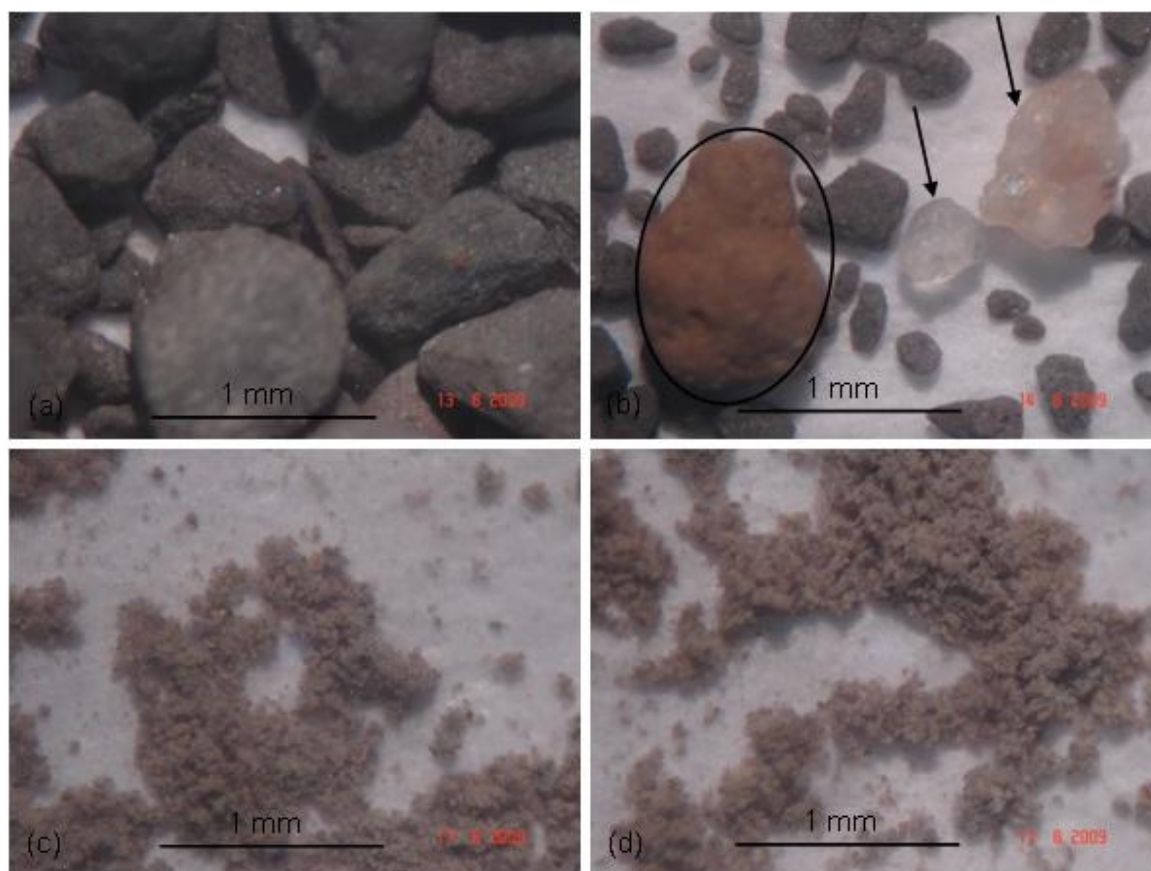


Figura 5.16. Micrografias obtidas por MO da argilito. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.

Microscopia eletrônica de varredura do argilito

A Figura 5.17 apresenta micrografias obtidas por MEV do argilito com análise química pontual por EDS. Observa-se que o argilito é constituído, sobretudo por um agregado de partículas porosas. Observa-se pelo mapeamento com análise química pontual por EDS que, tanto no ponto 1 quanto no ponto 2, esse agregado de partículas é composto principalmente por Si, Al e Mg e em menor intensidade ocorre a presença de Fe e K.

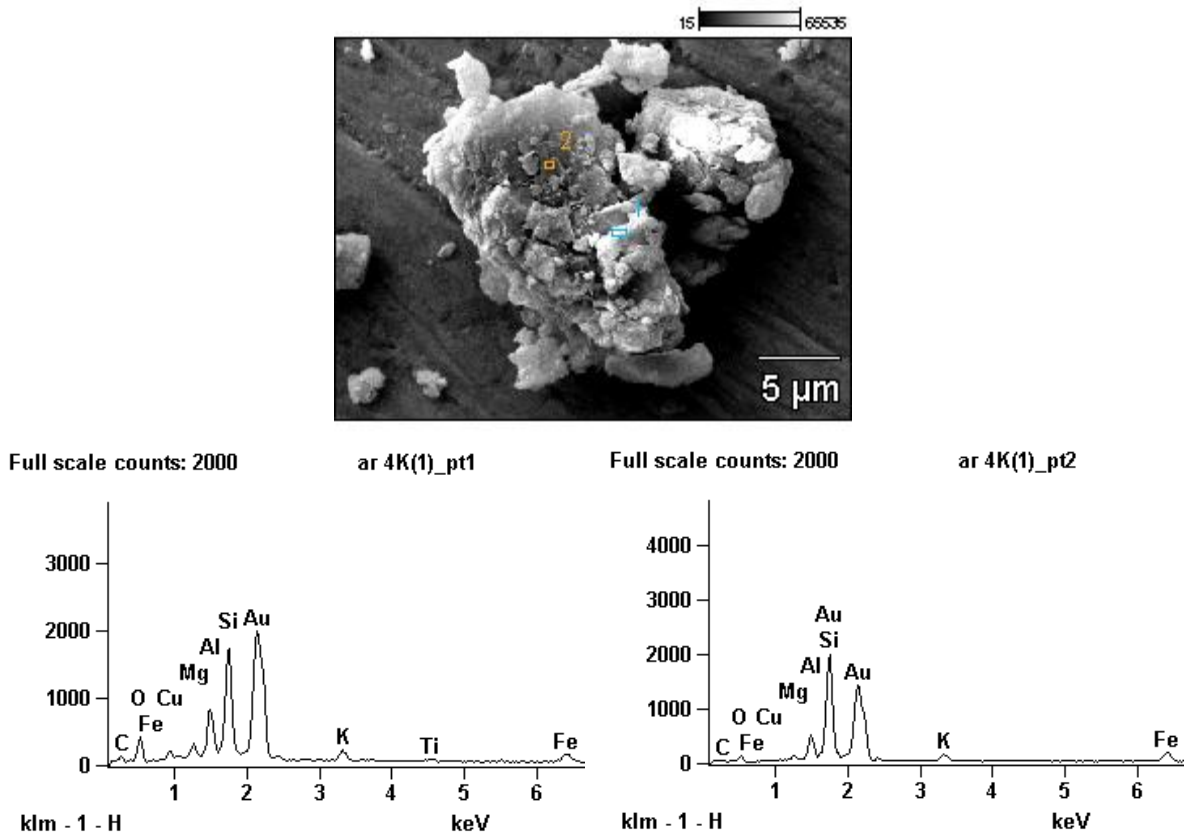


Figura 5.17. Micrografias obtidas por MEV do argilito, com análise química pontual por EDS.

5.2 . Propriedades físicas e mecânicas

5.2.1. Plasticidade

A Figura 5.18 apresenta os resultados plotados em gráfico elaborado com os limites de plasticidade de Atterberg que delimita regiões de extrusão ótima e aceitável (MARSIGLI, DONDI, 1997). O limite de plasticidade (LP) indica a quantidade mínima de água necessária para que se atinja o estado de consistência plástico. O limite de liquidez (LL) está associado à quantidade de água em que o material apresenta consistência de lama, excedendo, deste modo, a faixa de consistência plástica. Já o índice de plasticidade (IP) é a diferença entre LL e LP, indicando a faixa de consistência plástica. O limite de plasticidade é um parâmetro de grande interesse tecnológico já que apresenta a quantidade de água mínima necessária para que uma argila ou misturas de

argilas alcance a consistência necessária para sua conformação no estado plástico. Esta água adicionada à massa cerâmica atua de duas maneiras. Primeiramente, a água adicionada atua no preenchimento dos poros das partículas, sendo chamada de água intersticial. Já a segunda, localiza-se entre as partículas, facilitando a conformação das peças. Este tipo de água é denominado de água lubrificante, sendo que sua eliminação na etapa de secagem é responsável pela retração da peça.

De posse desse gráfico pode-se estudar a trabalhabilidade de extrusão das formulações. Observa-se no gráfico que a argila forte apresenta excessiva plasticidade, localizando-se acima da região aceitável. Já a fraca localiza-se dentro da faixa de extrusão aceitável. A massa argilosa ficou localizada dentro da região considerada aceitável de extrusão, mostrando que a argila fraca contribui para diminuir a plasticidade da argila forte. De acordo com este gráfico a argila forte pode ser dispensável, devido à excessiva plasticidade. O argilito situou-se abaixo da região aceitável e ótima para extrusão. Porém, devido à sua granulometria mais grosseira, este material pode auxiliar na otimização da plasticidade da massa devido à elevada plasticidade das argilas de Campos dos Goytacazes.

A massa argilosa (**M**), composta por 50% em peso de argila forte e 50% em peso de argila fraca, situou-se dentro da região considerada aceitável de extrusão, mas muito próxima da região limite. Essa localização indica que a argila fraca contribuiu para a redução da plasticidade da argila forte. Como o argilito e a argila fraca apresentam granulometria mais grosseira, a adição de ambos à argila forte contribuiu ainda mais para melhorar a trabalhabilidade desta formulação, reduzindo significativamente a plasticidade da argila forte. Neste caso, pode-se observar que a adição de 50% em peso de argilito à massa argilosa (**M50A**) permitiu que essa formulação ficasse dentro da região aceitável e bem próxima da região considerada ótima de extrusão. O mesmo acontece para a formulação com 25% em peso de argilito, adicionado à massa argilosa (**M**), que está situada na região aceitável de extrusão. Porém, como foi utilizado menor quantidade de argilito, houve uma menor redução da plasticidade.

A formulação composta por 50% em peso de argila forte e 50% em peso de argilito (**AFO50A**) ficou localizada dentro da região considerada ótima de extrusão. Este resultado indica que o argilito adicionado à argila forte contribuiu para melhorar a

trabalhabilidade dessa argila, deslocando-a de fora da região aceitável para a região ótima de extrusão.

De modo geral é observado que há uma tendência de deslocamento de fora para dentro da região aceitável e posteriormente da região aceitável para a região ótima de extrusão quando se adiciona o argilito às formulações.

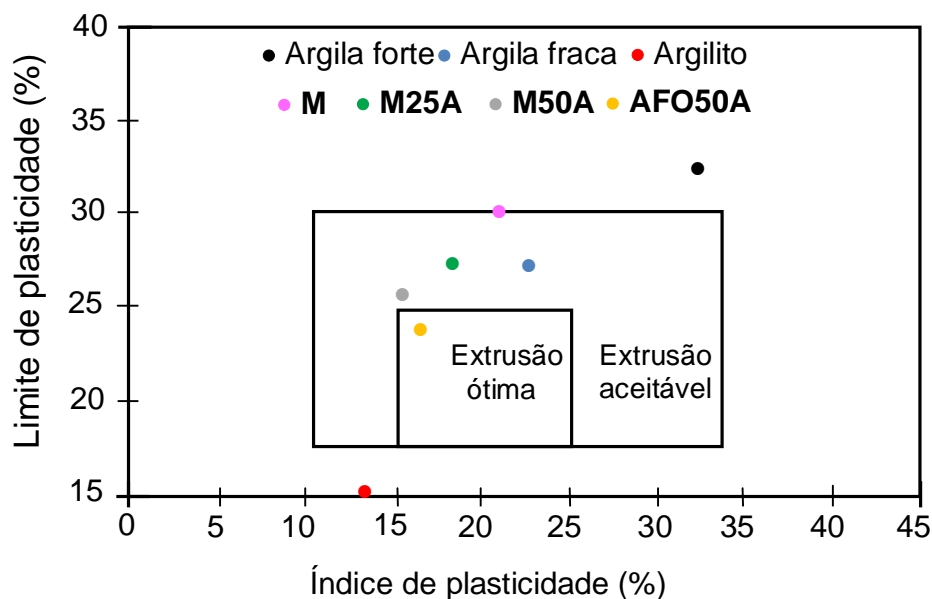


Figura 5.18. Prognóstico da extrusão por meio dos limites de Atterberg.

A Figura 5.19 apresenta a localização das matérias-primas e das formulações investigadas no diagrama de Winkler (SANTOS, 1989). Este diagrama baseia-se na granulometria das argilas para delimitar regiões apropriadas para a fabricação de determinados produtos tais como tijolo maciço, região 1, blocos vazados, região 2, telhas, região 3 e produtos com dificuldade de produção como, por exemplo, manilhas, região 4. Pode-se observar que a argila forte localizou-se na região limítrofe para a produção de telhas e manilhas devido a sua elevada plasticidade. Já a argila fraca localizou-se na região 3, apropriada para a fabricação de telhas. Já o argilito situa-se dentro da região 1, que é indicada para a produção de tijolos maciços.

Observa-se que, de modo geral, as formulações estudadas apresentaram uma distribuição bem mais homogênea dentro do diagrama, apesar das matérias-primas situarem-se em regiões bem distintas.

Observando o diagrama nota-se que a formulação **M** ficou situada na região **4**, indicada para a produção de manilhas ou produtos com dificuldade de conformação. Já as formulações **M25A**, **M50A** e **AFO50A** situaram-se dentro da região **3**, considerada apropriada para a produção de telhas. Como este diagrama é baseado na granulometria das matérias-primas, pode-se concluir que o aumento da quantidade de material com granulometria mais grosseira, como o argilito, favorece a fabricação de produtos de maior valor agregado, como, por exemplo, telhas e no caso deste estudo a produção de adoquim.

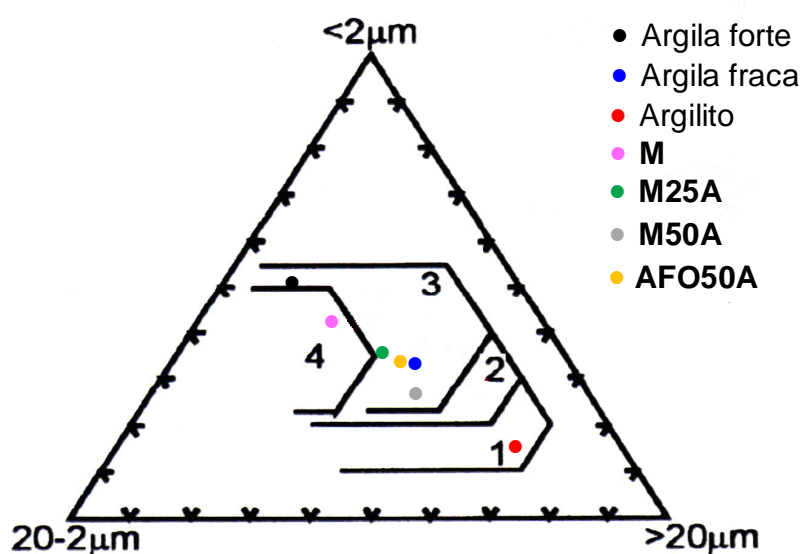


Figura 5.19. Diagrama de Winkler para as matérias-primas e para as formulações estudadas.

5.2.2. Massa específica aparente das peças secas e queimadas

A Figura 5.20 apresenta a massa específica aparente a seco dos corpos de prova. A faixa de variação **I** indica massa específica entre 1,95 a 2,09g/cm³ e a faixa de variação **II** indica massa específica entre 2,15 e 2,28g/cm³. A adição de argilito à formulação **M** não alterou significativamente a massa específica para as duas faixas de variação. Porém, é observada uma leve tendência de aumento para ambas as faixas de variação nas formulações **M25A** e **M50A** quando comparadas à formulação **M**. Esta tendência pode ser explicada pela granulometria mais grosseira do argilito que facilita o empacotamento das partículas.

Na faixa de variação I para a formulação **AFO50A** não foi observado nenhuma alteração em relação às formulações. Porém, a formulação **AFO**, em relação às formulações **M25A** e **M50A**, sofreu uma queda, mostrando o benefício da argila fraca e do argilito na elaboração das massas. O mesmo é observado na faixa de variação II, tanto para a formulação **AFO** quanto para **AFO50A**, mostrando que ambas as formulações, tanto o argilito quanto a argila fraca, foram importantes para o empacotamento das partículas.

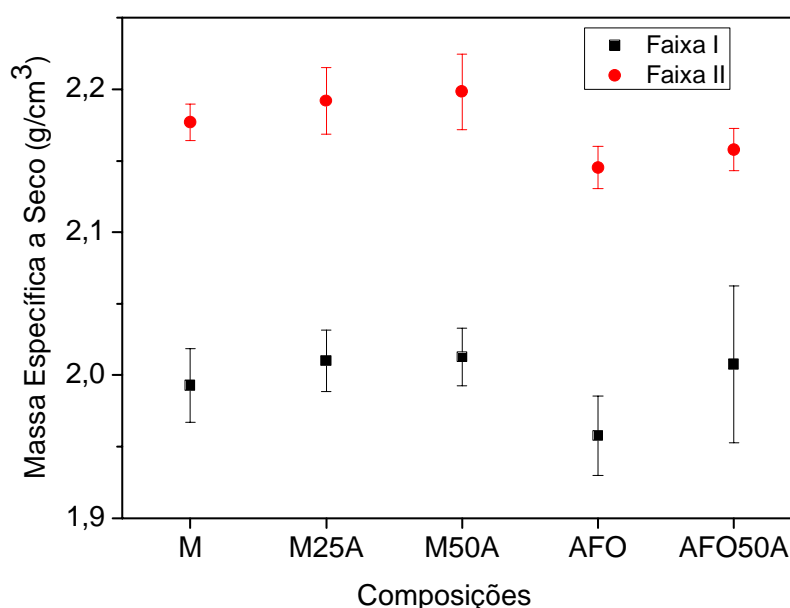


Figura 5.20. Massa específica a seco das formulações na faixa de variação I e II.

A Tabela 5.3 e as Figuras 5.21 e 5.22 apresentam os resultados de massa específica aparente dos corpos de prova queimados a 850, 950 e 1050°C. Nota-se, com o aumento da temperatura de queima de 850 para 1050°C, alterações significativas tanto na faixa de variação I quanto na faixa de variação II. Estas alterações podem ser explicadas pelos processos de sinterização que são bem mais evidentes à temperatura de 1050°C e, portanto, há uma maior formação de fase líquida diminuindo a porosidade da cerâmica (MONTEIRO e VIEIRA, 2004).

Tabela 5.3. Massa específica aparente de queima das cerâmicas

Cerâmicas	Massa específica aparente de queima (g/cm ³)					
	I			II		
	850°C	950°C	1050°C	850°C	950°C	1050°C
M	1,88±0,01	1,90±0,03	2,06±0,05	1,98±0,02	2,05±0,03	2,21±0,03
M25A	1,88±0,03	1,91±0,02	2,13±0,08	2,05±0,01	2,08±0,04	2,30±0,04
M50A	1,89±0,04	1,94±0,04	2,28±0,04	2,04±0,03	2,09±0,02	2,42±0,04
AFO	1,95±0,10	1,99±0,04	2,13±0,05	2,08±0,03	2,16±0,03	2,33±0,05
AFO50A	1,91±0,02	1,92±0,04	2,14±0,09	2,04±0,02	2,19±0,08	2,39±0,05

Observa-se também um aumento da massa específica de queima à temperatura de 1050°C, nas duas faixas de variação de massa específica, para todas as cerâmicas em comparação à massa específica a seco. Isto é atribuído aos processos de sinterização como difusão no estado sólido e formação de fase líquida, que tende a preencher os poros e assim tornar a cerâmica com massa específica superior à massa específica a seco.

Observando a Figura 5.21 verifica-se que nas temperaturas de 850 e 950°C para a faixa de variação I não ocorreram alterações significativas, pois os processos de sinterização não foram suficientes para diminuir a porosidade.

Na Figura 5.22, observa-se que à temperatura de 850°C, ocorreu um aumento na massa específica na faixa de variação II para todas as cerâmicas em comparação a cerâmica M. Este aumento pode ter ocorrido devido à presença do argilite que contribuiu para melhor acomodação das partículas.

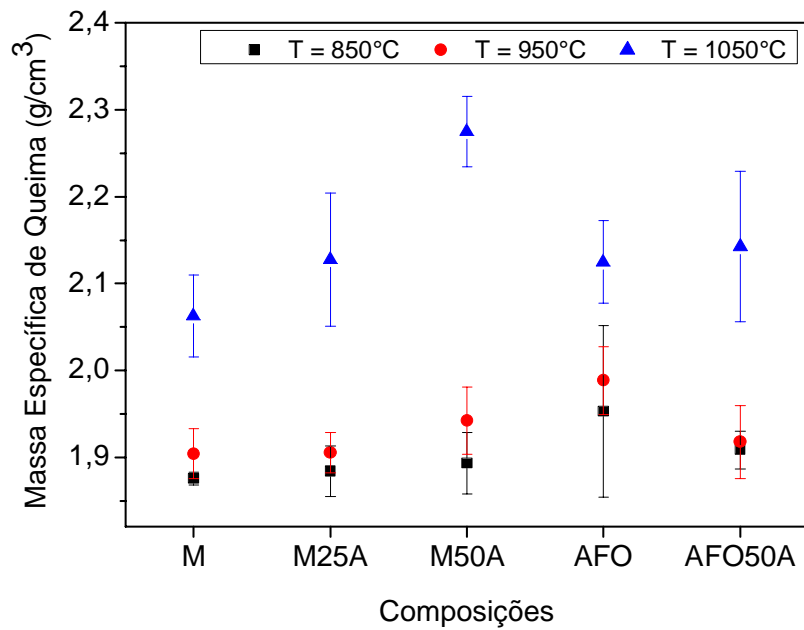


Figura 5.21. Massa específica de queima das cerâmicas nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C na faixa de variação I.

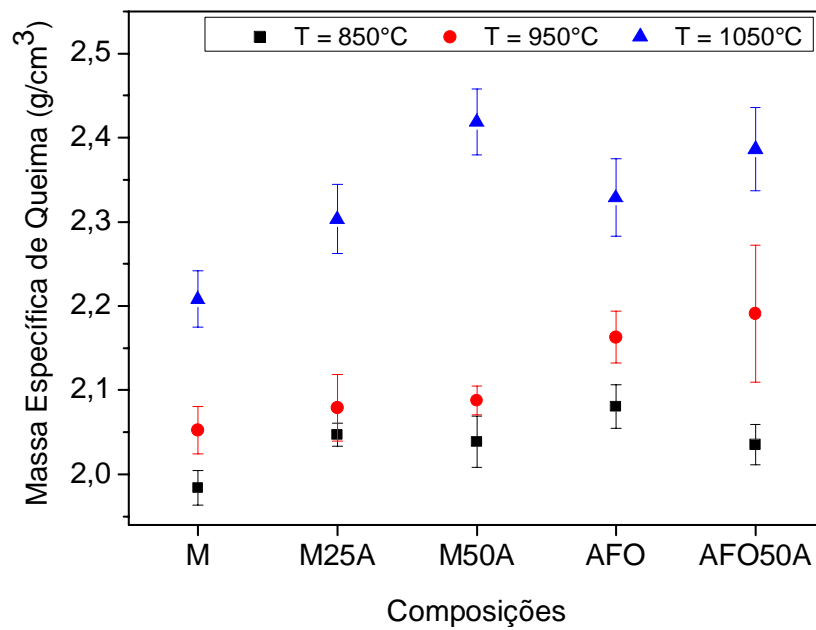


Figura 5.22. Massa específica de queima das cerâmicas nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C na faixa de variação II.

5.2.3. Absorção de água

A Figura 5.23 apresenta a absorção de água na faixa de variação **I** de massa específica das cerâmicas queimadas. Observa-se que a cerâmica **M50A** sofreu uma queda na absorção de água em relação à cerâmica **M**. Isso ocorre devido à menor perda de massa do argilito e ao maior teor de fundentes em comparação com as argilas de Campos (PINHEIRO *et al.*, 2010). O mesmo ocorre para a cerâmica **AFO50A**, o que mostra como o argilito atua melhorando esta propriedade em função dos fatores já explicados e também, por sua granulometria mais grosseira que favorece o empacotamento gerando densificação durante a queima. Ocorrendo assim, fechamento da porosidade pela aproximação das partículas em decorrência da boa molhabilidade entre fase líquida e as partículas, além da difusão de fase sólida. Para as demais formulações não ocorreram alterações significativas para a temperatura de 850°C em comparação à cerâmica **M**. Embora a cerâmica **M50A** tenha tido uma queda, de aproximadamente 18,42%, na absorção de água a 850°C, esta temperatura é muito baixa para consolidar os fenômenos de sinterização que estão iniciando a esta temperatura. Isto mostra que, mesmo em temperatura de queima mais baixa o argilito contribui significativamente para melhorar esta propriedade.

Para a temperatura de 950°C não foram observadas alterações significativas para a absorção de água. Embora as cerâmicas com argilito tenham apresentado uma leve tendência em diminuir esta propriedade em relação às demais. A similaridade nos valores de absorção a 950°C indica que nessa temperatura praticamente não ocorre variação significativa da porosidade aberta da cerâmica para as diferentes formulações.

Na temperatura de 1050°C, não foram observados alterações significativas dentro do erro estatístico da cerâmica **M25A** para a **M50A** e nem da cerâmica **M** para a **AFO**. Porém, as cerâmicas com argilito sofreram redução significativa nesta propriedade em relação às demais. Esta redução foi de 14,8% e 29,6% para a cerâmica **M25A** e **M50A**, respectivamente, em relação à cerâmica **M** e de 26,5% da cerâmica **AFO50A** em relação à cerâmica **AFO**. Esta redução pode ser explicada pelo argilito apresentar elevados teores de óxidos fundentes, que auxilia na diminuição do ponto de fusão das cerâmicas, contribuindo para formação de fase líquida e, conseqüentemente, diminui a porosidade aberta (PINHEIRO *et al.*, 2010).

De acordo com as normas americanas e colombianas, na temperatura de 1050°C somente a formulação **M** não atende aos valores de absorção de água para uso exterior, tipo **MX** e **II**. Já para uso interior, tipo **NX** e **III**, não há especificação para esta propriedade, portanto, todas as composições e em todas as temperaturas estão adequadas.

A Figura 5.24 apresenta a absorção de água na faixa de variação **II** de massa específica das cerâmicas queimadas. Observa-se que ocorreu uma melhora nos valores de absorção de água, para todas as temperaturas, em relação aos valores observados na faixa de variação **I**. Isso se deve às reações de difusão que possibilitou uma redução da porosidade (VIEIRA *et al.*, 2009).

A temperatura de 850°C, com a adição de argilito à massa cerâmica, foram observadas quedas de 19,6 e 23,8% para as cerâmicas **M25A** e **M50A**, respectivamente. Estas quedas podem ser atribuídas ao maior teor de óxidos fundentes presentes no argilito, assim, quanto maior a quantidade de argilito incorporado à massa, maiores serão os efeitos destes óxidos, para melhorar esta propriedade. Não foram observadas alterações significativas para as cerâmicas **M25A**, **M50A**, **AFO** e **AFO50A**.

Na temperatura de 950°C, assim como na de 850°C, observa-se uma queda da absorção para a cerâmica **M50A** de 25,3% em relação à cerâmica **M**. As demais cerâmicas não sofreram alterações significativas dentro do erro estatístico. Estes valores mais baixos estão associados à formação de fase líquida que diminui a porosidade da cerâmica (MONTEIRO, VIEIRA, 2004).

Para 1050°C, foram observados os menores valores de absorção de água em todas as cerâmicas. Porém as cerâmicas com argilito e com 100% argila forte, não sofreram alterações significativas entre si.

Observa-se ainda que, na temperatura de 1050°C todas as formulações, bem como a formulação **M50A** queimada à temperatura de 950°C, obtiveram valores de absorção de água dentro do que as normas americanas e colombianas estipulam para uso exterior, tipo **MX** e **II**. Para uso interior, tipo **NX** e **III** todas as formulações se mostram adequadas para uso, pois não possuem especificações.

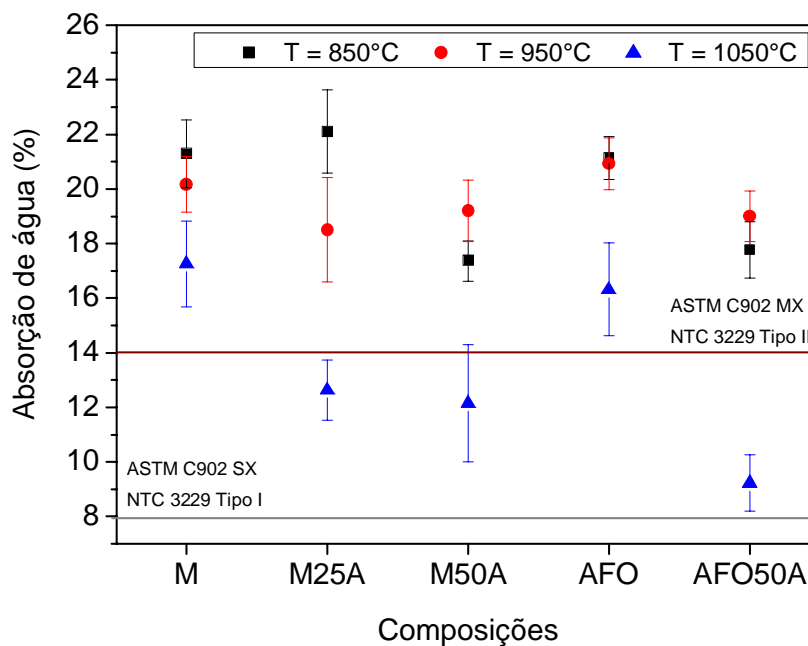


Figura 5.23. Absorção de água das cerâmicas queimadas nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C na faixa de variação I de massa específica.

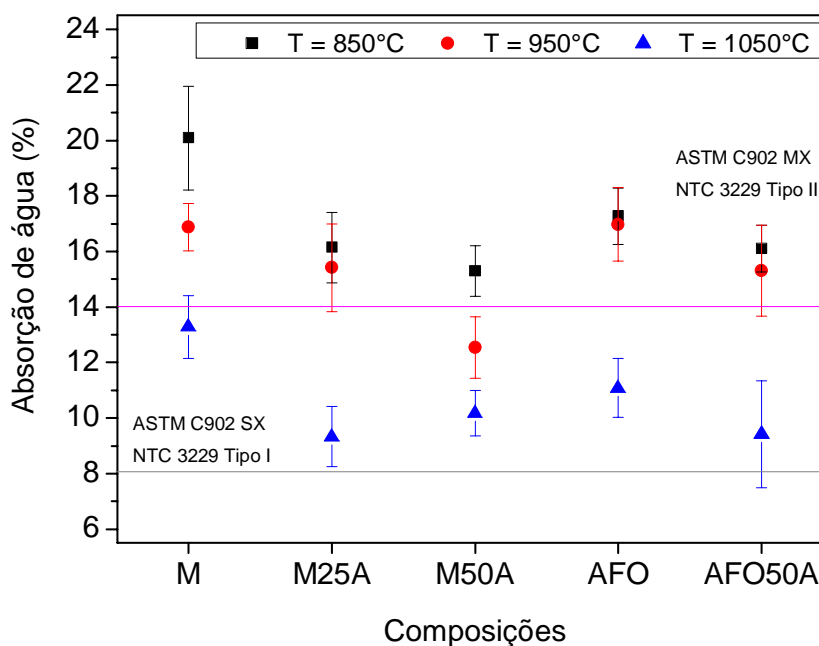


Figura 5.24. Absorção de água das cerâmicas queimadas nas temperaturas de 850, 950 e 1050°C na faixa de variação II de massa específica.

De maneira geral, tanto na faixa de variação I, como na faixa de variação II de massa específica, observa-se que os melhores resultados de absorção de água foram

para as cerâmicas obtidas na temperatura de 1050°C. Este resultado é atribuído às reações de sinterização que estão em estágio avançado nesta temperatura (Vieira *et al.*, 2009).

O Brasil não possui ainda legislação que regulamenta o parâmetro de absorção de água para adoquins, nem mesmo a norma de **PPC** possui limites para esta propriedade. Portanto, pode-se concluir que todas as formulações e temperaturas poderiam ser indicadas para produção de adoquim para pavimentação de qualquer tipo de via. De acordo com as normas internacionais, os valores de absorção de água neste estudo inviabilizariam a produção de adoquim para vias de trânsito de veículos. Podendo ser usados para trânsito de pedestres somente.

5.2.4. Retração diametral de queima

A Figura 5.25 apresenta a retração diametral das cerâmicas queimadas na faixa de variação **I** de massa específica em função das temperaturas de queima. A incorporação de argilito à massa reduziu significativamente a retração em relação à massa argilosa na temperatura de 850°C. Esta redução foi de 31,5 e 55,2% para as cerâmicas **M25A** e **M50A** respectivamente e, pode estar relacionada ao início do processo de sinterização e também à substituição de parte do material argiloso por um material com menor perda ao fogo (ACCHAR, 2006). Ao analisar o comportamento da retração para a cerâmica **AFO**, observa-se que ela apresenta uma retração muito superior à cerâmica **M**, um aumento de 2,4 vezes o valor de retração da cerâmica **M**. Este comportamento é atribuído à elevada perda ao fogo da argila forte. Portanto, ao se misturar a argila forte com a argila fraca, que possui perda ao fogo menor, obtêm-se uma retração bem reduzida. Este resultado mostra a grande importância da argila fraca para a formulação de massa. Do mesmo modo, é observada a importância do argilito quando incorporado à argila forte, que teve um valor de retração 2,6 vezes o valor da cerâmica **AFO50A**. A utilização do argilito contribuiu significativamente para reduzir esta propriedade, devido sua baixa perda ao fogo.

Comportamento semelhante foi observado nas cerâmicas queimadas a 950°C. As cerâmicas com argilito incorporado à massa, **M25A** e **M50A**, sofreram reduções de 26,4 e de 40,7 respectivamente, para esta propriedade.

À Temperatura de 1050°C, observa-se que a incorporação de argilito não provocou alterações significativas para este parâmetro em relação a todas cerâmicas com argilito quando comparadas a cerâmica **M**. Já a cerâmica **AFO** teve um valor de retração bem elevado em comparação às cerâmicas **M**, **M25A** e **M50A**. Este comportamento é explicado, novamente, pela elevada perda ao fogo da argila forte.

Observa-se ainda na Figura 5.25 que as barras de erro para as cerâmicas **M25A** e **AFO50A** estão elevadas. Isso se deve provavelmente a defeitos dimensionais nas peças e variações de temperatura no interior do forno.

A Figura 5.26 apresenta a retração diametral de queima na faixa de variação II de massa específica das cerâmicas queimadas em função das composições estudadas. A 850°C, para as cerâmicas **M**, **M25A** e **M50A**, não foram observadas alterações significativas. O maior grau de empacotamento a seco das partículas pode ter sido o responsável por essa variação pouco significativa. Em relação à cerâmica **AFO50A** quando comparada a **AFO**, observa-se uma redução de 53,4%, atribuída à ação benéfica do argilito. Porém, a cerâmica **AFO50A** quando comparada à cerâmica **M50A**, observa-se um aumento de 51,1%. Este aumento pode ser explicado pela elevada perda ao fogo da argila forte e mostra a importância da argila fraca usada na massa para melhorar esta propriedade.

De modo geral, foi observado comportamento de retração semelhante ao da faixa de variação I, para a temperatura de 950°C. Porém, com reduções de 33,5 e 46,5% para as cerâmicas **M25A** e **M50A** em comparação a cerâmica **M**. Comparando as cerâmicas **AFO** e **AFO50A** observa-se a 950°C o mesmo comportamento descrito para 850°C.

A 1050°C não foi observada variações significativas, dentro do erro estatístico na retração diametral, quando se adicionou argilito à massa. Já as cerâmicas **AFO** e **AFO50A** tiveram valores superiores às demais.

De modo geral, observou-se, para todas as temperaturas de queima, para ambas as faixas de variação de massa específica, que o argilito contribuiu para melhorar a retração diametral de queima das cerâmicas. A sua granulometria mais grosseira que das argilas possibilitou um melhor empacotamento das partículas ajudando a reduzir a retração, assim como, sua baixa perda ao fogo que foi um fator fundamental para melhorar o desempenho desta propriedade.

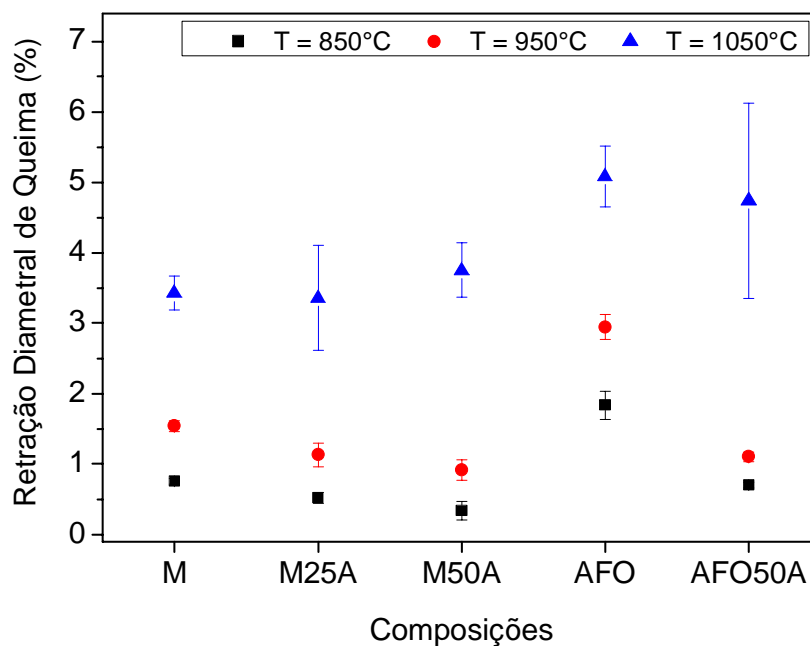


Figura 5.25. Retração linear das cerâmicas em função da temperatura de queima na faixa de variação I.

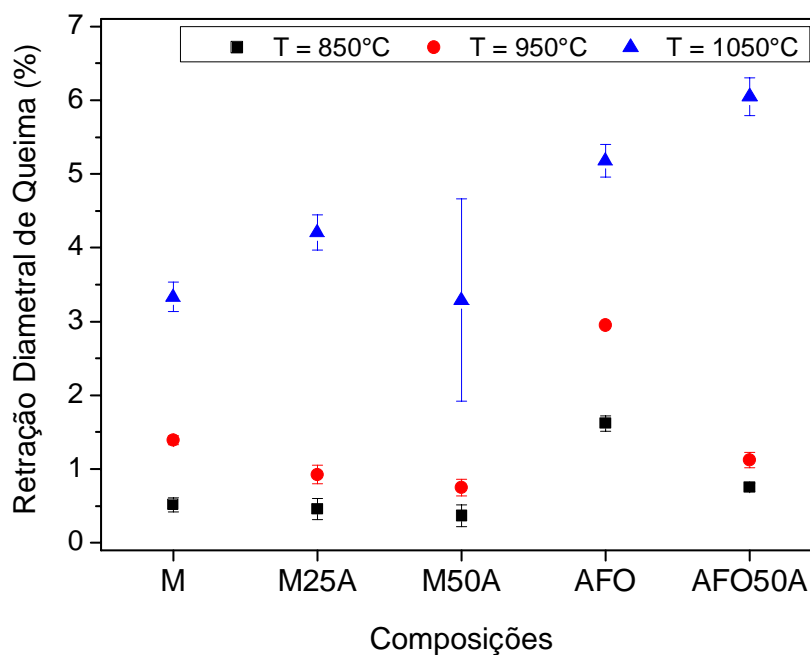


Figura 5.26. Retração linear das cerâmicas em função da temperatura de queima na faixa de variação II.

5.2.5. Resistência à compressão uniaxial

As Figuras 5.27 e 5.28 apresentam a resistência mecânica para ambas as faixas de variações de massa específica. Observa-se, de modo geral, que as barras de erro estão relativamente elevadas. Isto pode ser devido a variações de temperatura dentro do forno que podem ter contribuído para a elevada dispersão nos dados obtidos.

A Figura 5.27 apresenta a resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima na faixa de variação I de massa específica.

A 850°C observa-se que o argilito, dentro do erro estatístico, não alterou a resistência mecânica das peças em relação à massa argilosa. Porém é observado nas três temperaturas investigadas, que a adição do argilito promoveu um aumento na resistência à compressão uniaxial em relação à massa argilosa. Esse aumento se deve provavelmente a maior quantidade de fundentes presentes no argilito que possibilita a formação de fase líquida diminuindo a porosidade do material (PINHEIRO *et al.*, 2010).

A 1050°C nota-se que a adição de argilito, nas duas porcentagens, contribuiu para aumentar a resistência mecânica das peças em relação à massa argilosa. Esse incremento da resistência está associado, sobretudo, à formação de fase líquida (Vieira *et al.*, 2009). Em temperaturas mais elevadas, como a de 1050°C, as reações de sinterização estão em estágio avançado, o que causa maior densificação e coesão das partículas promovendo uma melhora significativa na resistência mecânica (GOUVEIA, 2008). Outro fator que deve ser levado em consideração é o tempo do ciclo de queima que, quanto mais lento for o ciclo associado a uma temperatura mais elevada, formará maior quantidade de fase líquida, resultando em um melhor produto acabado (GOUVEIA, 2008). Porém, vale ressaltar que tais medidas tornam a produção mais lenta e onerosa o que acaba sendo, muitas vezes, não adotadas.

Para a cerâmica **AFO**, em todas as temperaturas de queima, observa-se resistências elevadas, acima de 50MPa. Isto pode ter acontecido devido à menor quantidade de quartzo e pela maior quantidade de argilomineral presente na argila forte. O quartzo tem ação de concentrador de tensões diminuindo a resistência mecânica. A maior quantidade de argilomineral, partículas muito finas, proporciona maior difusão no estado sólido e, juntamente com a formação de fase líquida, tendem a aumentar a resistência mecânica das peças. Porém, a adição de 50% de argilito à

argila forte não possibilitou melhora desta propriedade. Neste caso, as características da argila forte, menor quantidade de quartzo e maior quantidade de argilomineral, superaram a ação benéfica dos fundentes presentes no argilito.

A Figura 5.28 apresenta a resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima na faixa de variação II de massa específica.

Os valores de resistência apresentados foram superiores a 50MPa, menos para a cerâmica **AFO50A** nas temperaturas de 850 e 950°C, esse mesmo padrão não foi observado na faixa de variação I de massa específica, uma vez que os valores máximos de resistência não ultrapassaram 55MPa, com exceção à cerâmica **AFO**. Esse resultado indica que o maior empacotamento das partículas a seco contribuiu para melhorar os processos de sinterização facilitando a formação de fase líquida favorecendo uma diminuição da porosidade das cerâmicas.

Na temperatura de 850°C, a adição de argilito provocou um discreto aumento da resistência em relação à massa argilosa.

A 950°C a adição de argilito, nas duas proporções, não alterou significativamente a resistência à compressão uniaxial. Na temperatura de 1050°C a adição de argilito provocou um aumento na resistência quando comparado à massa argilosa. O valor desse parâmetro, para essa composição, foi igual a 70MPa indicando que o argilito, por apresentar maior quantidade de óxidos fundentes ajuda na formação de fase líquida (VIEIRA, EMILIANO, 2005), contribuindo para o aumento da resistência. Esse comportamento pode estar associado ao processo de vitrificação que contribui para diminuir a porosidade do material e aumentar a resistência mecânica (VICENZI, BERGMANN, 1999).

Para a cerâmica **AFO** a resistência mecânica ficou acima de 75MPa para todas as temperaturas de queima. Este resultado está associado às características da argila forte, já citado anteriormente, bem como, ao maior empacotamento das partículas, contribuindo assim, para melhorar o desempenho deste parâmetro. Porém, ao adicionar 50% em peso de argilito à argila forte, ocorreu uma queda significativa da resistência para ambas as temperaturas em comparação a cerâmica **AFO**, devida a presença de quartzo.

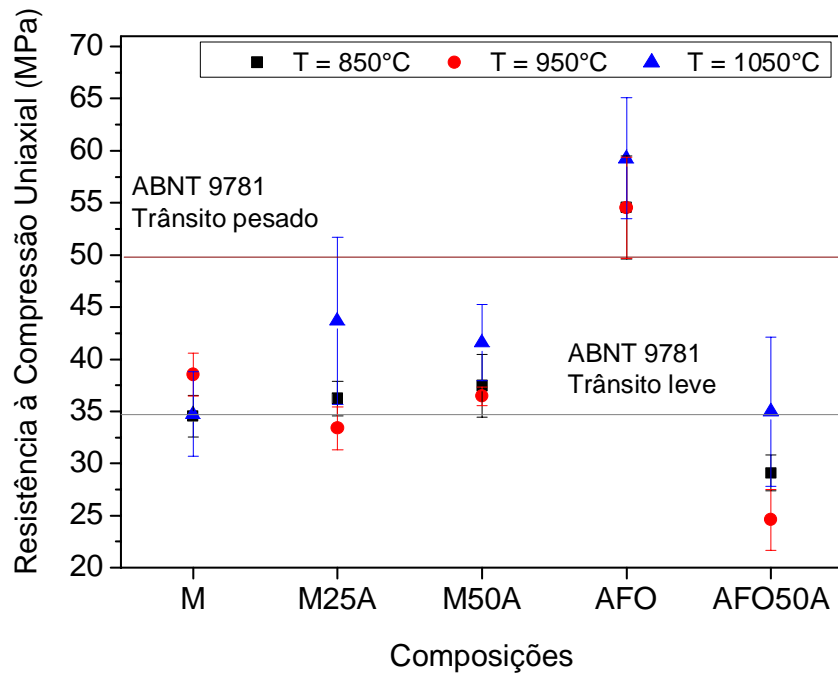


Figura 5.27. Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas queimadas a 850, 950 e 1050°C, na faixa de variação I de massa específica.

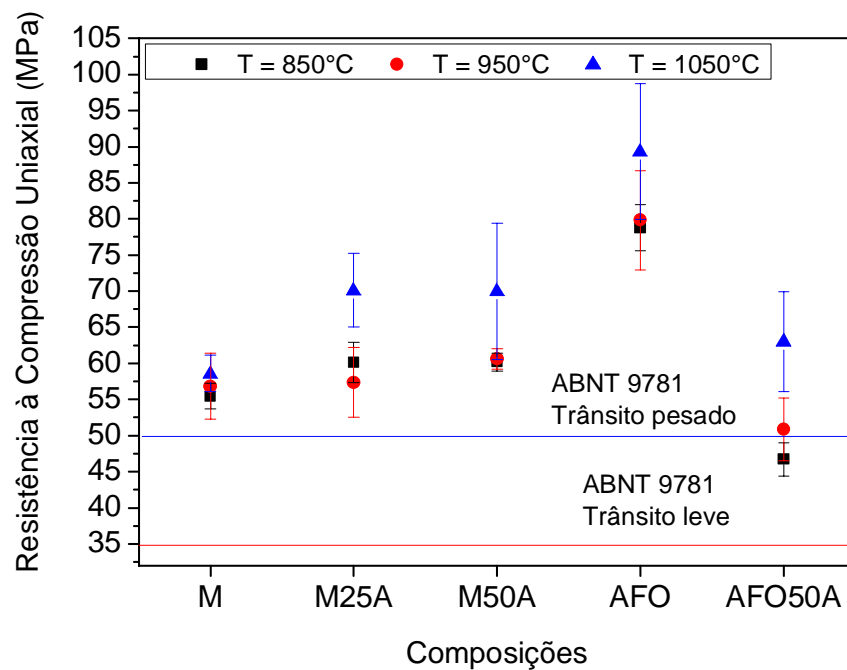


Figura 5.28. Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas queimadas a 850, 950 e 1050°C, na faixa de variação II de massa específica.

Os valores obtidos de resistência à compressão na faixa de variação **I** de massa específica indicam que a formulação **M** queimada a 850°C, **M25A** queimada 950°C e **AFO50A** queimadas a 850 e 950°C não são indicadas para produção do adoquim para pavimentação de nenhum tipo de via. Os valores alcançados por essas composições não atingiram o mínimo de 35MPa de acordo com norma de **PPC** (ABNT 9781, 1987). A formulação **M** queimada a 1050°C apresentou valor próximo a 35MPa. Já a formulação **M** queimada a 950°C, **M50A** queimada nas três temperaturas, e a formulação **AF50A** queimada a 1050°C, seriam indicadas para a produção de adoquim para pavimentação de vias com tráfego de veículos leves, uma vez que os valores de resistência apresentados foram iguais ou superiores a 35MPa. Já a cerâmica **AFO** queimada na três temperaturas, por ter apresentado valores de resistência superiores a 50MPa seria indicada para a produção de adoquim para pavimentação de vias com tráfego pesado. Estes valores estão indicados nas Figuras 5.27 e 5.28, por meio de uma linha limitando os valores de norma para **PPC**.

Ainda segundo a norma da ABNT valores de resistência iguais ou superiores a 50MPa para **PPC** indicam que esse piso pode ser usado para pavimentação de vias de tráfego pesado que produzem acentuados efeitos de abrasão. Assim todas as composições, da faixa de variação **II** de massa específica, queimadas nas três temperaturas avaliadas, poderiam ser utilizadas para a fabricação do adoquim com a finalidade de pavimentação desses tipos de vias. Assim como, a cerâmica **AFO** queimada nas três temperaturas na faixa de variação **I** de massa específica.

De acordo com a ASTM C902/2006 e a NTC 3828/2002, a utilização em ambientes exteriores não submetidos a temperaturas frias, ambientes interiores e vias de tráfego de pedestres, respectivamente, é de no mínimo 20,7MPa. Entretanto, deve-se considerar que essas normas estabelecem condições climáticas não aplicadas ao clima brasileiro como, por exemplo, ambientes submetidos a temperaturas frias.

Assim, os valores obtidos de resistência mecânica para todas as formulações estudadas, queimadas em todas as temperaturas e nas duas faixas de variação de massa específica, indicam que essas cerâmicas, podem ser utilizadas para a produção de adoquim para a pavimentação de vias de tráfego de pedestres.

Avaliando este contexto, deve-se levar em consideração que as melhores propriedades se devem a queima em temperaturas mais elevadas. Portanto, a

produção de adoquim para pavimentação de vias para tráfego de pedestres, pode ser obtida utilizando uma temperatura de queima inferior, e com isso, economizando energia durante a etapa de queima.

Vale ressaltar que as condições de produção, principalmente conformação e ciclo de queima, em um forno industrial são bem diferentes do que as condições em um laboratório. Portanto, os resultados podem sofrer variações bem diferentes das condições laboratoriais para as industriais.

5.3. Microestrutura das cerâmicas queimadas

5.3.1. Microscopia ótica

As Figuras 5.29 e 5.30 mostram micrografias, obtidas por MO, das cerâmicas queimadas a 850 e 1050°C na faixa de variação I de massa específica. Já as Figuras 5.31 e 5.32 apresentam micrografias das cerâmicas queimadas a 850 e 1050°C na faixa de variação II de massa específica.

De um modo geral são observadas algumas características para ambas as cerâmicas. A cor avermelhada predominante das cerâmicas é devido à presença de compostos de ferro na argila e no argilito ao redor de 10% e 5,8%, respectivamente, conforme indicado na composição química das matérias-primas. Observa-se também, a presença de quartzo (setas em preto), algumas partículas pretas associadas a compostos de ferro (setas brancas), partículas avermelhadas, provavelmente hematita (circuladas em preto) proveniente da desidratação do hidróxido de ferro comumente presente nas argilas de Campos (VIEIRA, MONTEIRO, 2002).

Nas cerâmicas incorporadas com argilito aparecem partículas de cor acinzentadas (circuladas em branco). São observados ainda, para a temperatura de 1050°C, alguns poros isolados, (circulados em vermelho), de formato esférico a arredondados, típicos do estágio final do fenômeno de sinterização (VIEIRA *et al.*, 2007).

Partículas inertes como o quartzo e a hematita, podem atuar como pontos de concentração de tensão ocasionando o aparecimento de trincas que podem comprometer a resistência mecânica do material (VIEIRA, MONTEIRO, 2004).

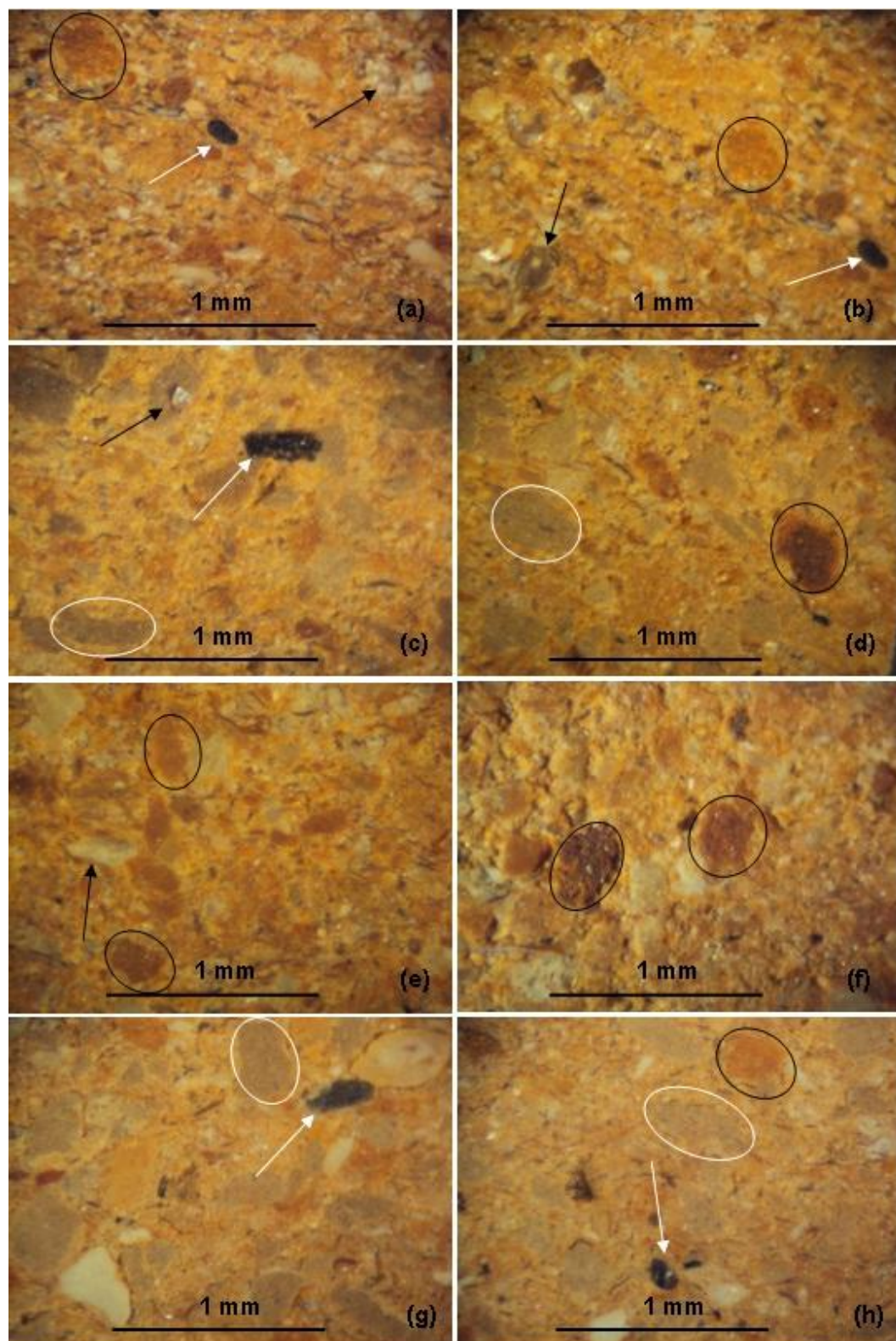


Figura 5.29. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 850°C na faixa de variação I de massa específica. (a) e (b) **M**; (c) e (d) **M50A**; (e) e (f) **AFO**; (g) e (h) **AFO50A**.

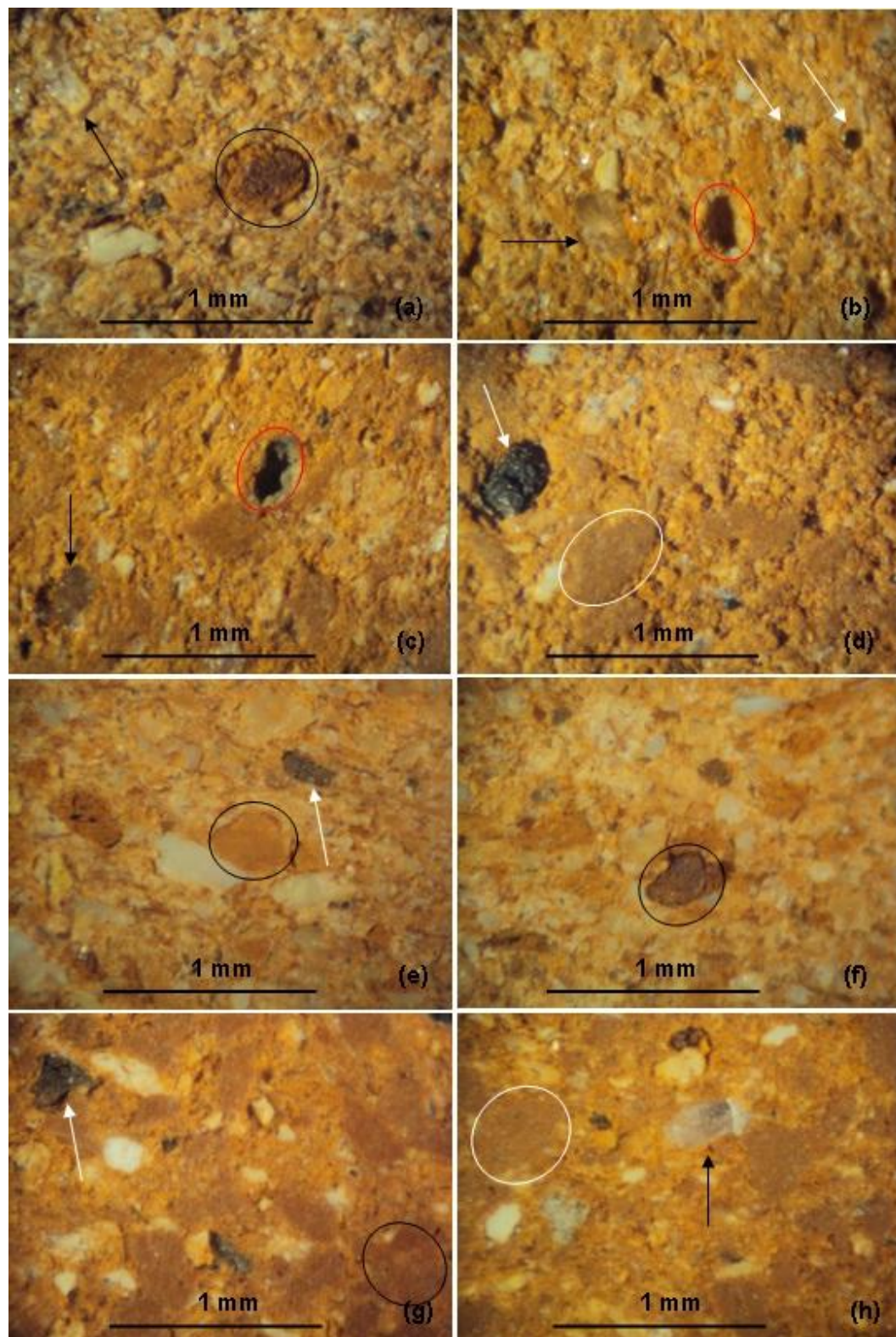


Figura 5.30. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 1050°C na faixa de variação I de massa específica. (a) e (b) **M**; (c) e (d) **M50A**; (e) e (f) **AFO**; (g) e (h) **AFO50A**.

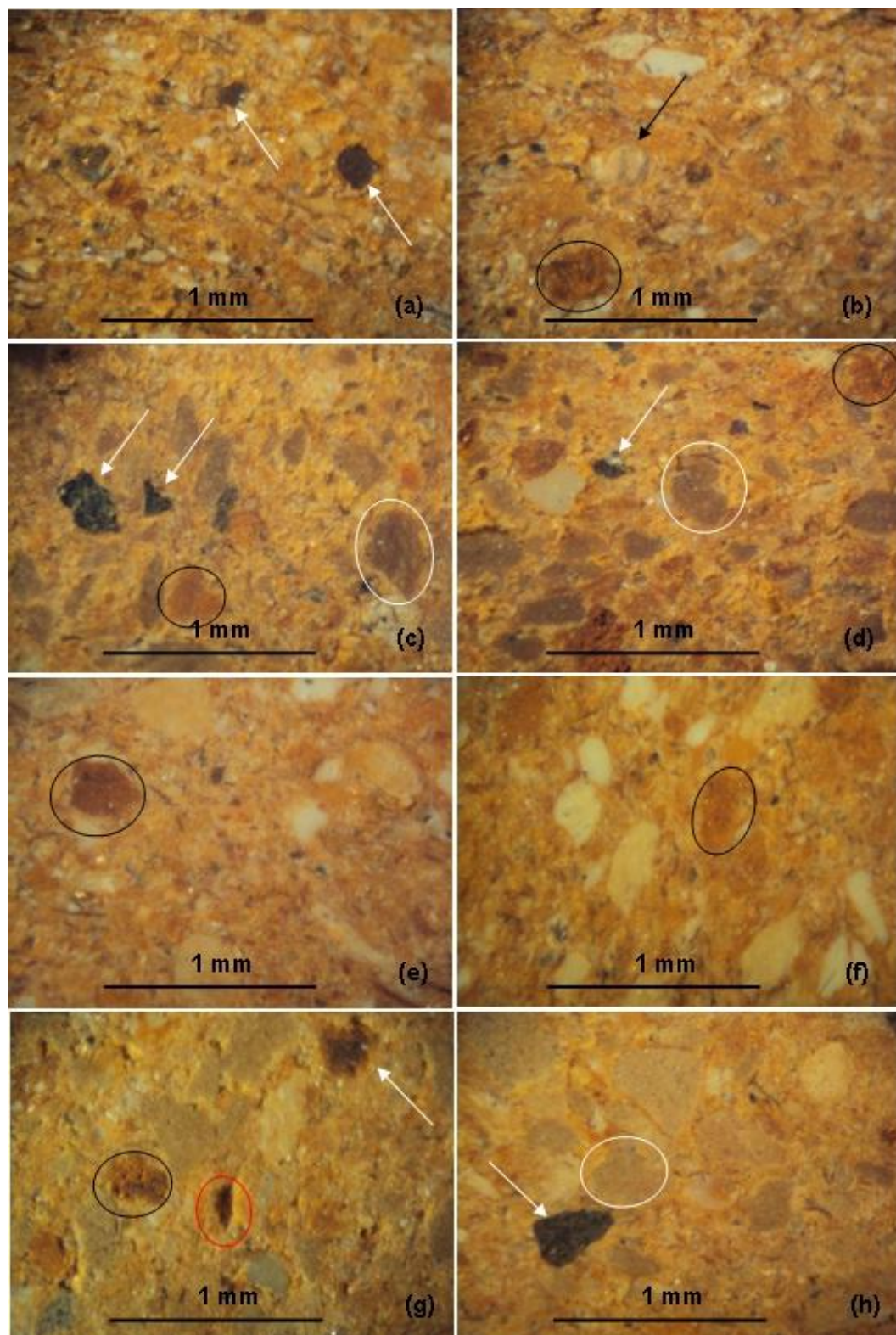


Figura 5.31. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 850°C na faixa de variação II de massa específica. (a) e (b) **M**; (c) e (d) **M50A**; (e) e (f) **AFO**; (g) e (h) **AFO50A**.

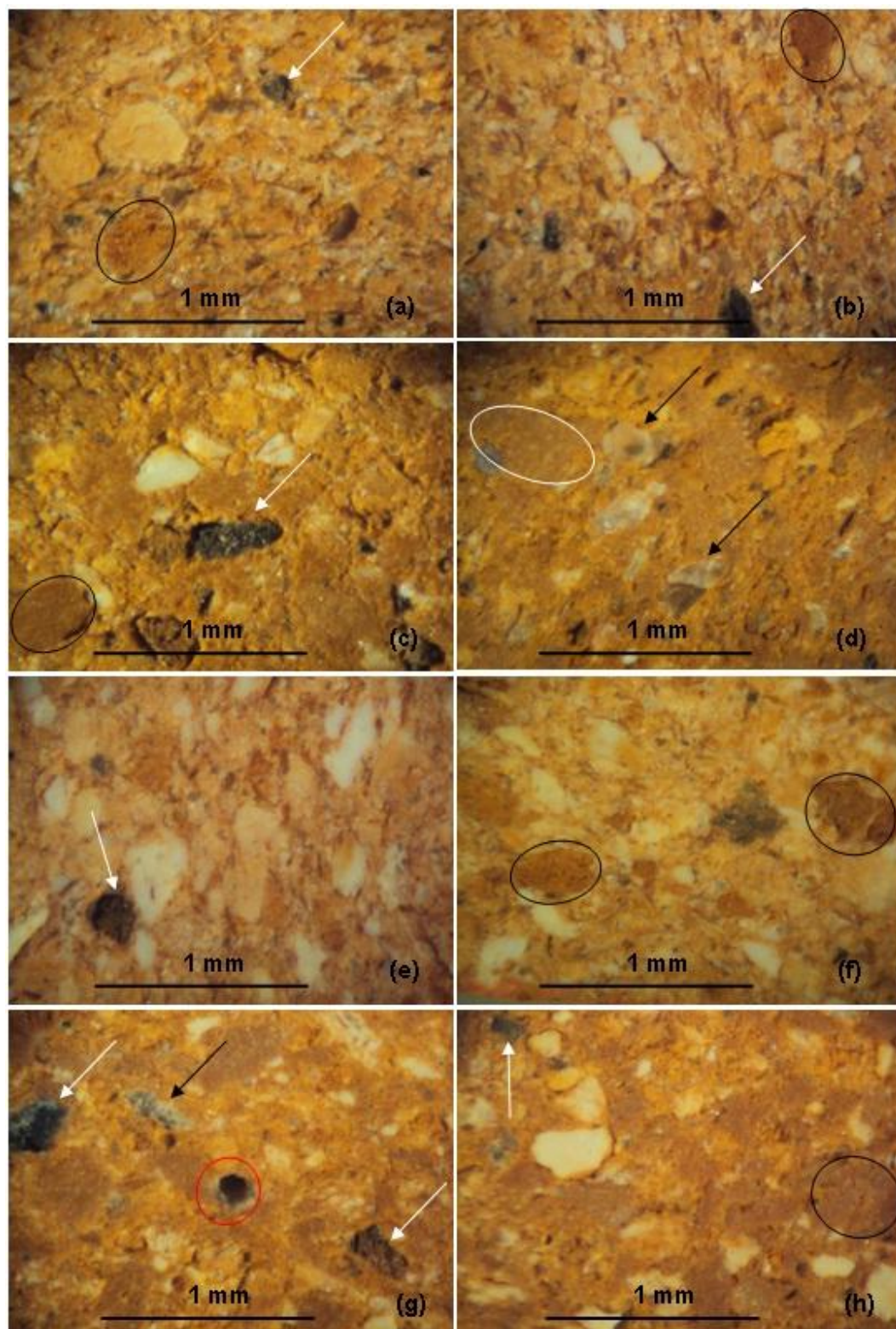


Figura 5.32. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 1050°C na faixa de variação II de massa específica. (a) e (b) **M**; (c) e (d) **M50A**; (e) e (f) **AFO**; (g) e (h) **AFO50A**.

5.3.2. Microscopia eletrônica de varredura

As Figuras de 5.33 a 5.36 apresentam micrografias obtidas por MEV das cerâmicas **M**, **M50A**, **AFO** e **AFO50A** queimadas a 850°C na faixa de variação **I** de massa específica, bem como mapeamento por EDS das regiões selecionadas. São observados, de maneira geral, que todas as cerâmicas apresentam microestrutura semelhante com regiões morfológica grosseira associadas a partículas rugosas e poucas áreas lisas. Verifica-se também, que todas as cerâmicas apresentam falhas inerentes à compactação durante o processamento e que ainda estão presentes devido à sinterização ineficiente nesta temperatura. Segundo Vieira e Monteiro (2007), cerâmicas vermelhas queimadas em temperaturas inferiores a 970°C não apresentam uma consolidação estrutural eficiente e, portanto, apresentando regiões de porosidade e rugosidade acentuadas.

A análise por EDS do ponto 1 da Figura 5.33 apresenta uma matriz constituída, principalmente, por uma fase amorfa de aluminossilicato com quartzo, hematita e mica muscovita, como será mostrado no item 6.3.3 no difratograma de raios-X das cerâmicas queimadas. Já o ponto 2 é constituído de Si e O, os quais estão associados a uma partícula de quartzo dispersa numa matriz amorfa de aluminossilicato. Pode-se observar ainda, falhas ao redor da partícula. Durante a queima o quartzo sofre transformação alotrópica da fase α para a fase β e se expande volumetricamente, promovendo com isso a formação destas falhas ao seu redor. Essas falhas podem contribuir para diminuir a resistência mecânica das cerâmicas.

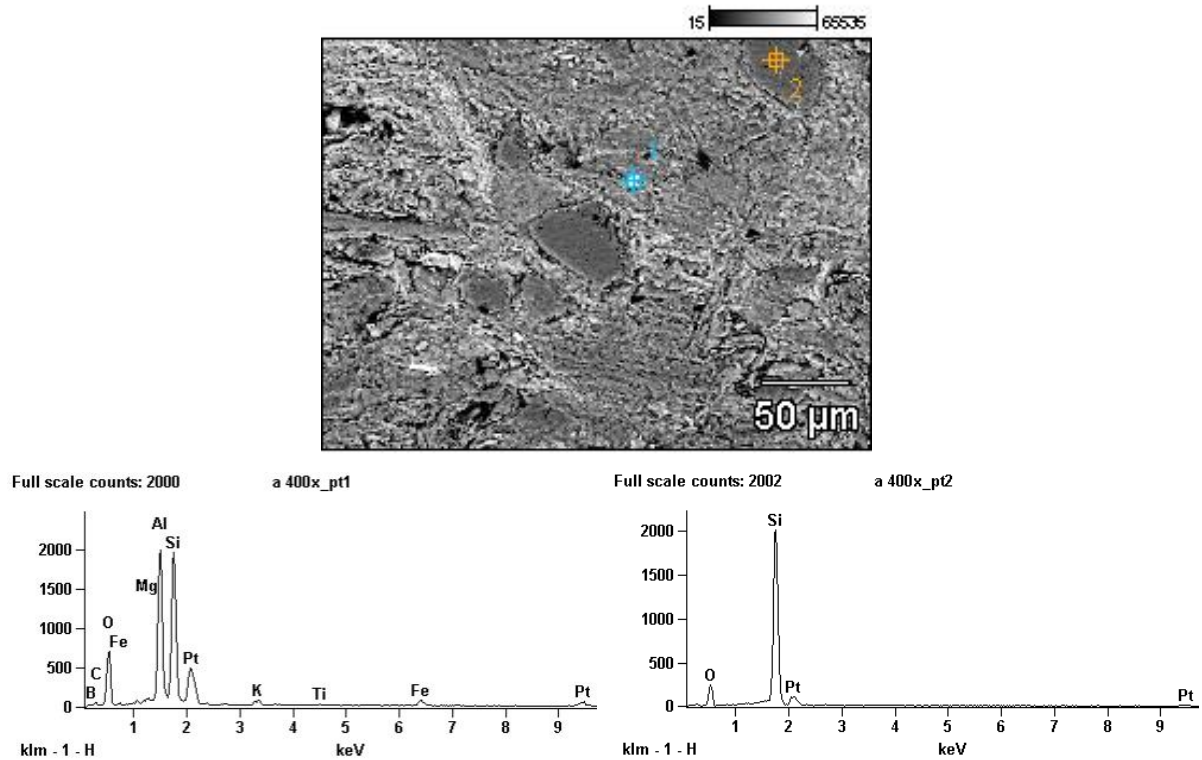


Figura 5.33. Micrografias de MEV da cerâmica **M** queimada a 850°C, na faixa de variação **I** de massa específica com mapeamento por EDS.

O mapeamento por EDS da cerâmica **M50A** é apresentado na Figura 5.34. Verifica-se, da mesma forma que foi observado na Figura 6.23, a presença de Si, Al e Fe, ponto 1. Possivelmente trata-se de uma matriz amorfa de aluminossilicato e compostos de ferro, provavelmente hematita. São observadas, ponto 2, partículas de quartzo dispersas na matriz aluminossilicato, bem como falhas e trincas ao seu redor. A presença dessas regiões com falhas e trincas não afetou a resistência mecânica, pois a cerâmica **M50A** apresentou valores de resistência mecânica superiores à cerâmica **M**.

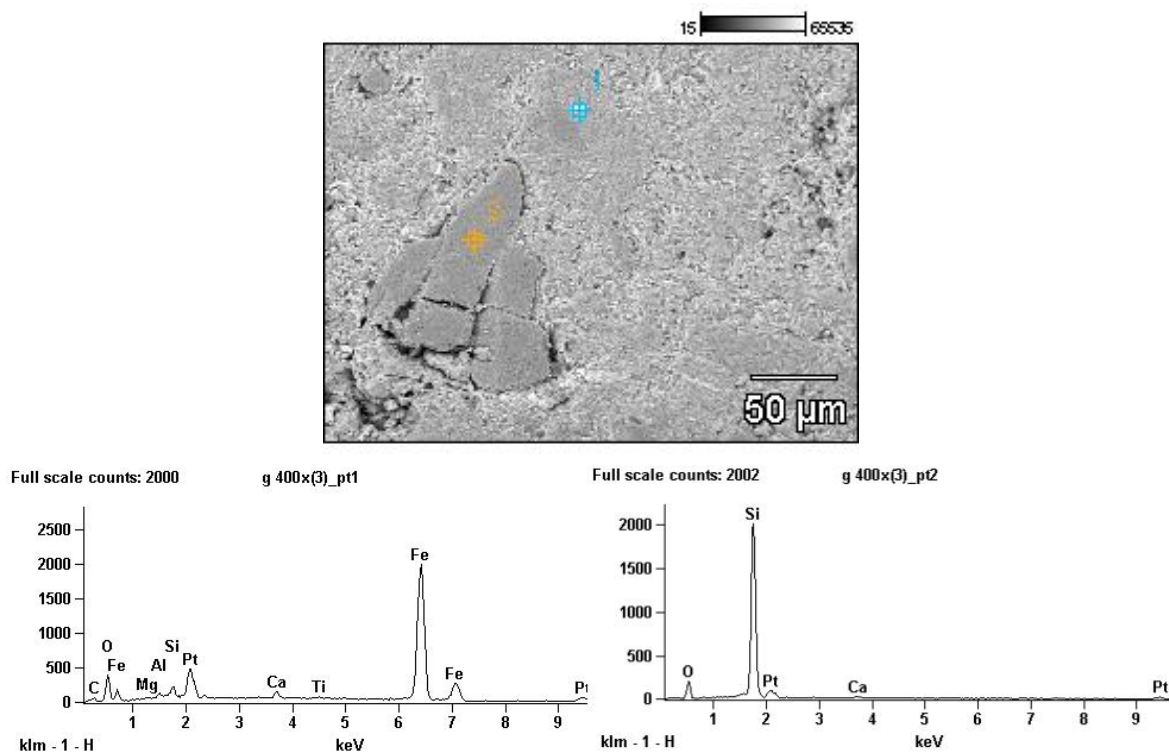


Figura 5.34. Micrografias de MEV da cerâmica **M50A** queimada a 850°C, na faixa de variação **I** de massa específica com mapeamento por EDS.

A Figura 5.35 apresenta micrografia obtida por MEV com mapeamento pontual por EDS da cerâmica **AFO**. Observa-se superfície com aspecto bem rugoso com presença de falhas e trincas ao redor do ponto 1, que é atribuído a uma partícula de quartzo devido à composição revelada pelo EDS, que é composto basicamente por Si. Já no ponto 2 é evidenciado uma matriz amorfa de aluminossilicato com aspecto nitidamente rugoso e praticamente sem regiões lisas. É observada também a presença de porosidade na superfície desta cerâmica.

Embora tenham aparecido trincas, falhas e porosidade a resistência mecânica não foi comprometida para esta cerâmica, sendo, entretanto, a cerâmica que obteve o melhor desempenho de resistência.

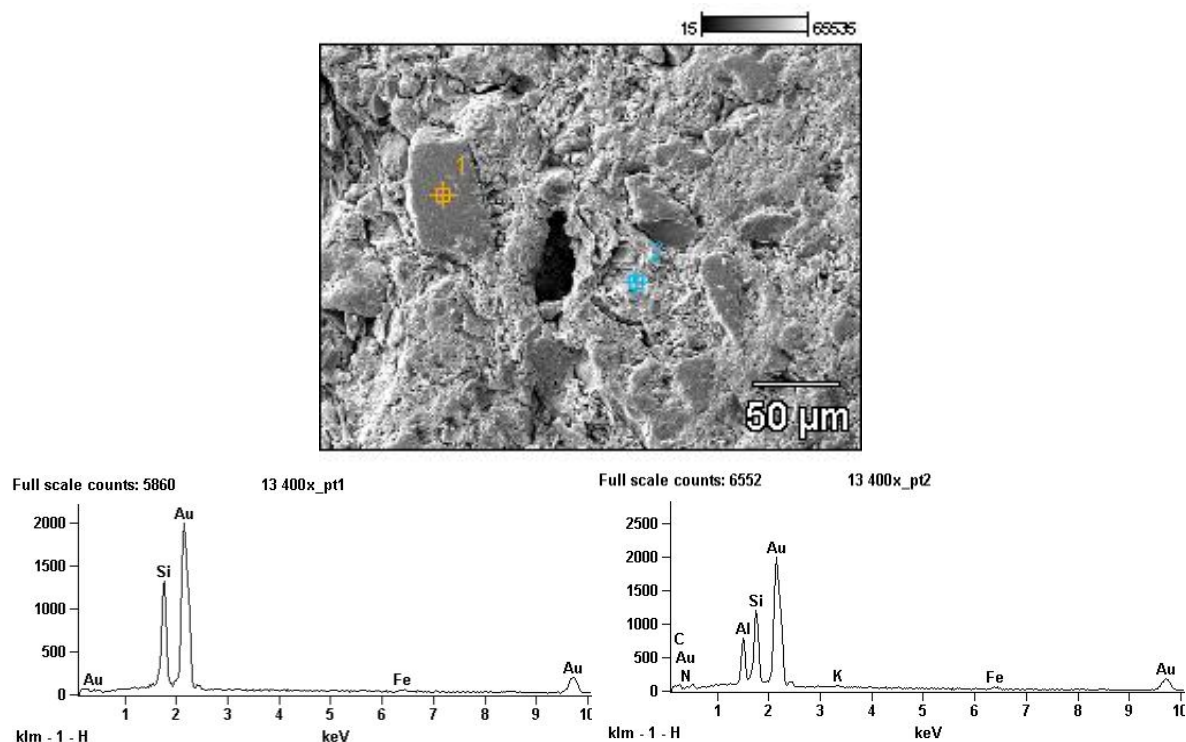


Figura 5.35. Micrografias de MEV da cerâmica **AFO** queimada a 850°C na faixa de variação **I** de massa específica com mapeamento por EDS.

A Figura 5.36 apresenta micrografia obtida por MEV com mapeamento pontual por EDS da cerâmica **AFO50A**, queimada a 850°C na faixa de variação **I** de massa específica. Observa-se no ponto 1 que os principais elementos são Si e O, provavelmente uma partícula de quartzo. Já no ponto 2 é evidenciado uma matriz amorfa de aluminossilicato devido à presença de Si e Al. Porém, o mapeamento pontual por EDS mostra a presença de Fe que é atribuído à presença de hematita. Ambas as regiões apresentam aspecto nitidamente rugoso e praticamente sem regiões lisas. Ao redor da partícula de quartzo ocorrem falhas e trincas indicando que a esta temperatura os fenômenos de sinterização ainda não foram eficientes para eliminar estes defeitos. Embora tenham aparecido trincas e falhas, a resistência mecânica não foi comprometida para esta cerâmica.

Tais resultados evidenciam que, apesar das cerâmicas terem composições diferentes, a semelhança entre as matérias-primas, pode então, minimizar o aparecimento de eventuais defeitos devido a diferença de coeficiente de dilatação térmica das fases.

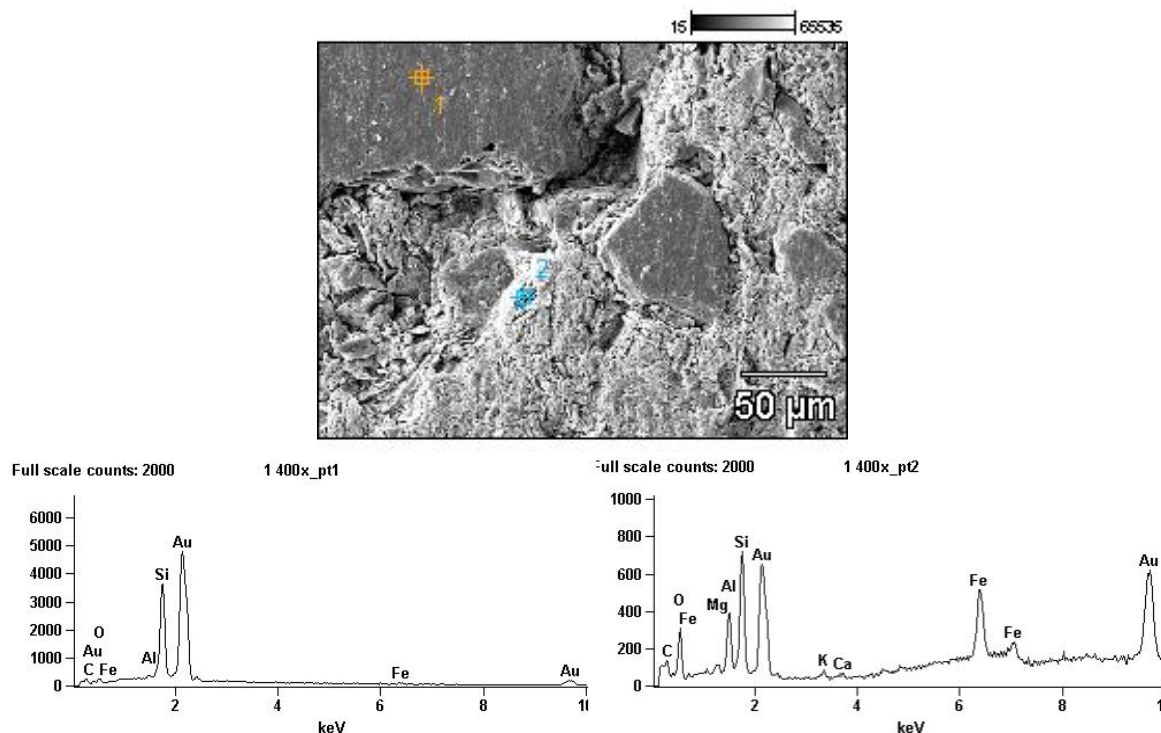


Figura 5.36. Micrografias de MEV da cerâmica **AFO50A** queimada a 850°C na faixa de variação **I** de massa específica com mapeamento por EDS.

As Figuras de 5.37 a 5.40 apresentam micrografias obtidas por MEV das cerâmicas **M**, **M50A**, **AFO** e **AFO50A** queimadas a 1050°C na faixa de variação **I** de massa específica, bem como mapeamento pontual por EDS de regiões selecionadas. De modo geral, observa-se que as micrografias apresentam morfologia semelhante e que apesar de serem observadas regiões com falhas e porosidade, ocorre a predominância de regiões com áreas lisas. Este predomínio de áreas lisas se deve aos fenômenos de sinterização que são evidenciados à temperatura de 1050°C. Durante a formação de fase líquida ocorre o preenchimento dos poros diminuindo as regiões de falhas e com grande rugosidade (VIEIRA *et al.*, 2009).

Segundo Boschi (1980), a fase líquida funciona como um tipo de “cola” que aproxima as partículas e confere à cerâmica maior resistência mecânica ao material uma vez que essa fase penetra entre as partículas e promove uma alta aderência dessas partículas ao material.

O mapeamento pontual por EDS da cerâmica **M**, Figura 5.37, mostrada nos pontos 1 e 2 são constituídos por Si e Al formando uma matriz amorfa de aluminossilicato proveniente da caulinita, argilomineral presente nas argilas. São

observados, ainda, nos pontos 1 e 2 a presença de Fe que é associado à hematita. Verifica-se nesta Figura 5.37, regiões de falhas, entretanto, ocorre o predomínio de áreas lisas que são típicas de vitrificação (VIEIRA *et al.*, 2009).

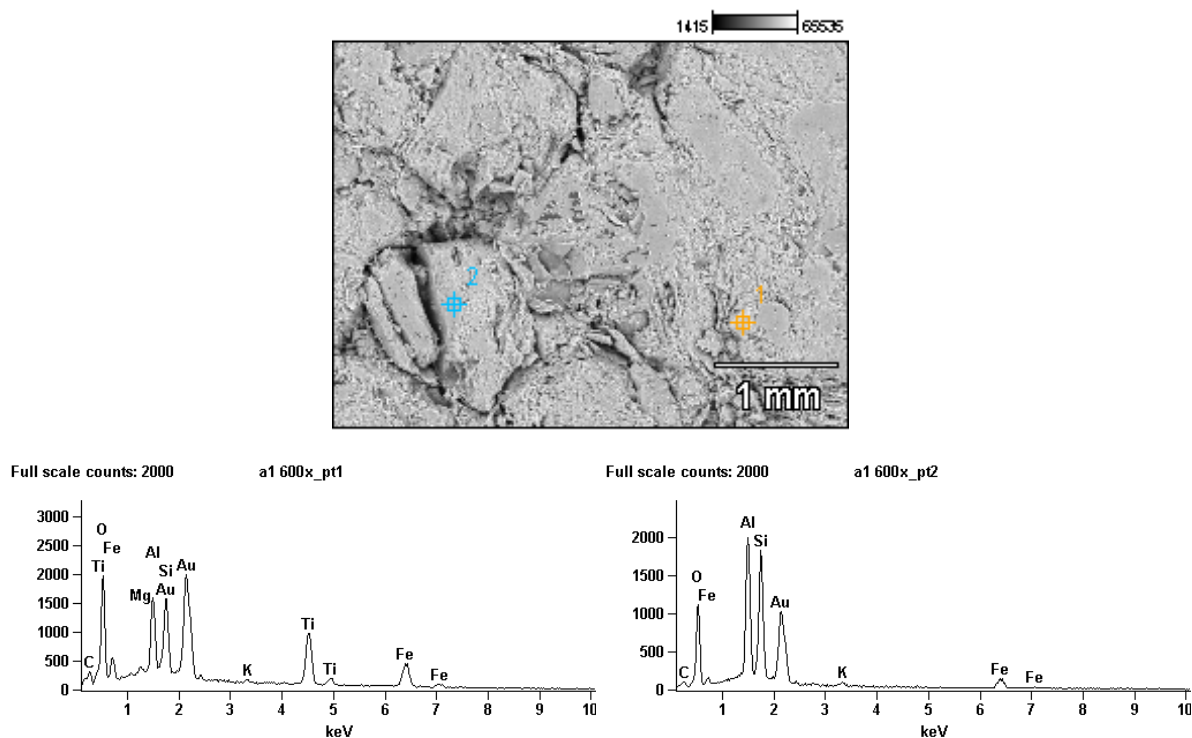


Figura 5.37. Micrografias de MEV da cerâmica **M** queimada a 1050°C na faixa de variação **I** de massa específica com mapeamento por EDS.

A Figura 5.38 apresenta o mapeamento pontual por EDS da cerâmica **M50A** queimada a 1050°C na faixa de variação **I** de massa específica. Observa-se no ponto 1 a presença de Si e O, os quais estão associados a uma partícula de quartzo dispersa numa matriz amorfa de aluminosilicado como indica o ponto 2, pela presença de Si e Al. Também foi identificado no ponto 2 o Fe, indicando a presença de hematita.

Na Figura 5.39, observa-se em ambos os pontos a presença de Si e Al constituindo a matriz amorfa de aluminosilicado. Já a Figura 5.40, mostra que a cerâmica **AFO50A**, apresenta o mesmo padrão da cerâmica **M50A**, queimada a 1050°C, discutida anteriormente.

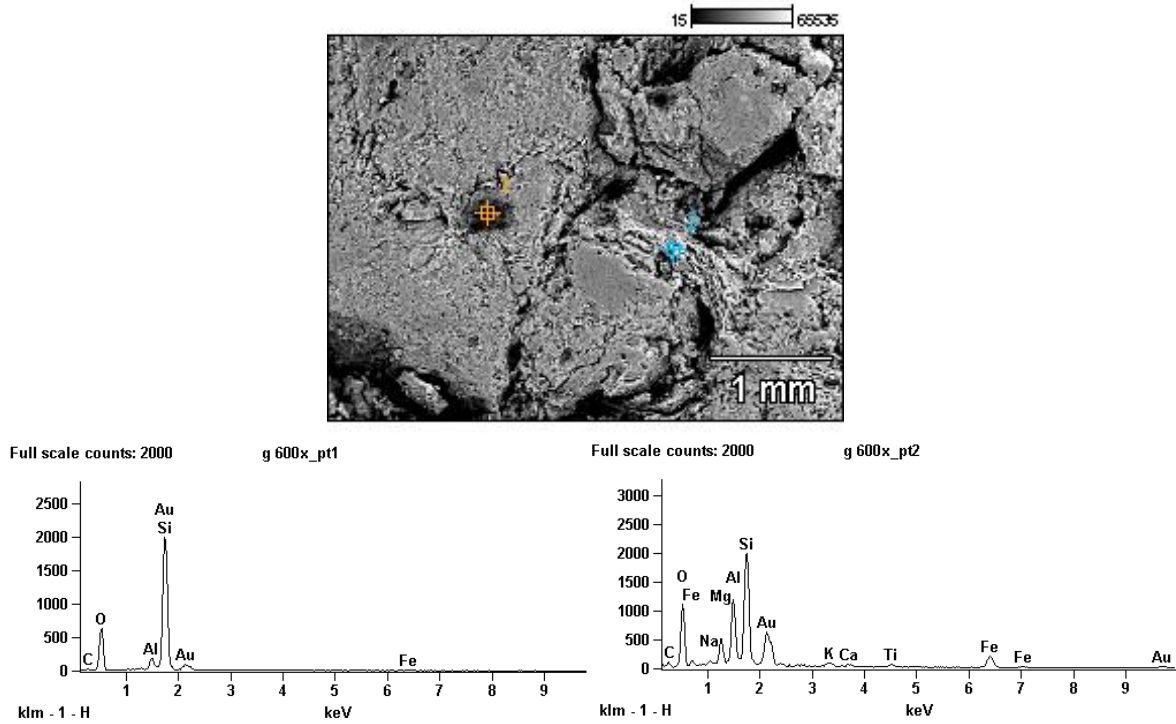


Figura 5.38. Micrografias de MEV da cerâmica **M50A** queimada a 1050°C na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.

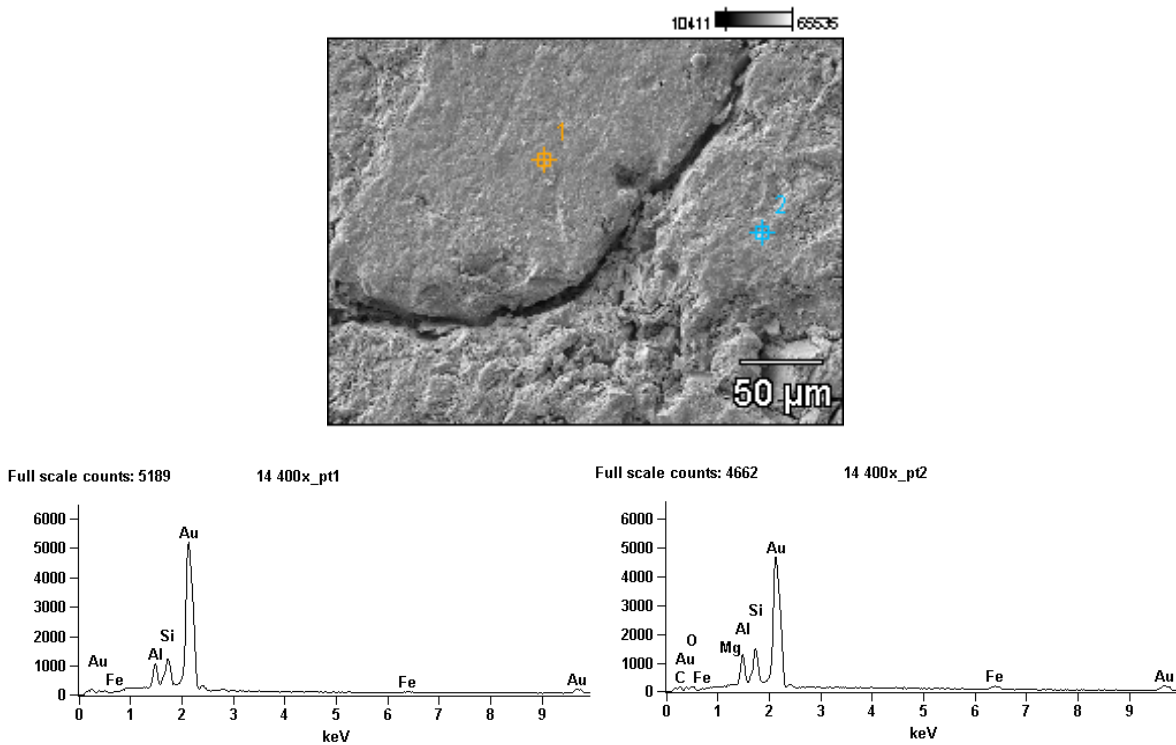


Figura 5.39. Micrografias de MEV da cerâmica **AFO** queimada a 1050°C na faixa de variação I de massa específica com mapeamento por EDS.

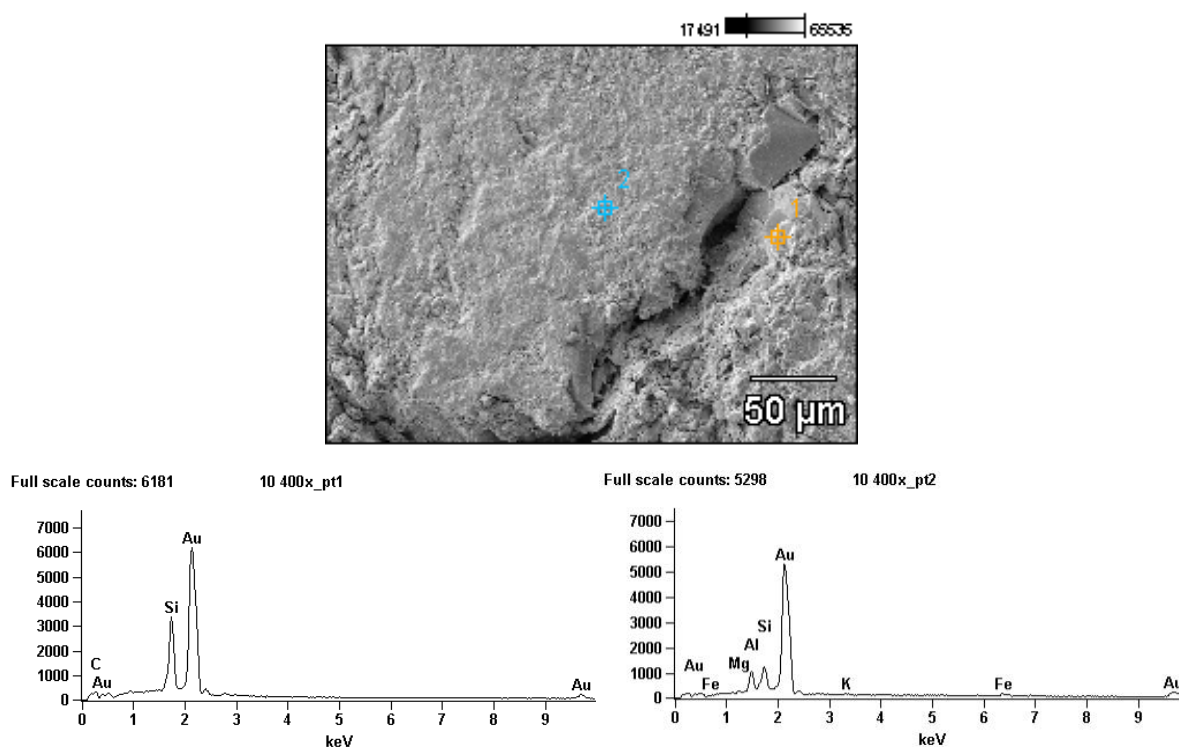


Figura 5.40. Micrografias de MEV da cerâmica **AFO50A** queimada a 1050°C na faixa de variação **I** de massa específica com mapeamento por EDS.

As micrografias obtidas por MEV com mapeamento pontual por EDS, das cerâmicas **M**, **M50A**, **AFO** e **AFO50A**, queimadas à temperatura de 850°C, na faixa de variação **II** de massa específica, estão apresentadas nas Figuras de 5.41 a 5.44. Verifica-se que, de maneira geral, apesar do maior grau de empacotamento das partículas a seco, ainda são observadas muitas regiões com áreas rugosas, trincas e poucas regiões de áreas lisas. Isto decorre da baixa temperatura de queima onde os fenômenos de sinterização são ineficientes, mesmo com o maior grau de empacotamento. Este mesmo padrão foi observado nas cerâmicas queimadas a 850°C, na faixa de variação **I** de massa específica. Segundo Freitas (2009), nesta temperatura não há formação de fase líquida suficiente para promover a molhabilidade e aproximação das partículas propiciando uma sinterização eficiente com alisamento da superfície e, portanto, apresentando poucos defeitos nas cerâmicas.

O mapeamento por EDS, Figura 5.41, da amostra **M**, assim como foi observado nas outras amostras, revelou, no ponto 1, a presença de partículas de quartzo com muitas trincas e rugosidade ao seu redor, devido à sua transformação alotrópica, por

volta de 570°C, expandindo volumetricamente e provocando o aparecimento destas trincas.

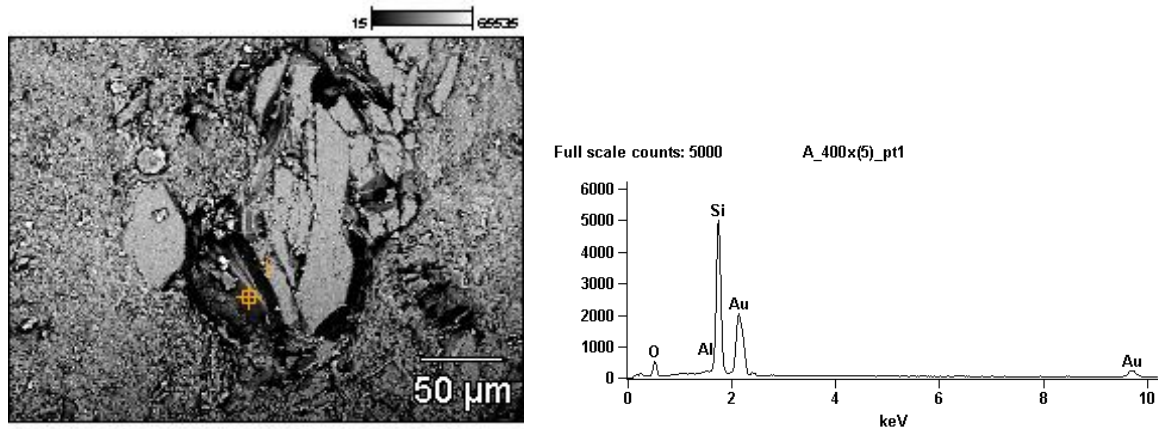


Figura 5.41. Micrografias de MEV da cerâmica **M** queimada a 850°C na faixa de variação **II** de massa específica com mapeamento por EDS.

A Figura 5.42 mostra a cerâmica **M50A** com mapeamento pontual por EDS em 3 pontos. Os pontos 1 e 2 revelaram a presença de partículas de quartzo dispersas na matriz aluminossilicato, indicada no ponto 3, semelhante a todas as cerâmicas analisadas. Assim como a presença de trincas ao redor das partículas de quartzo.

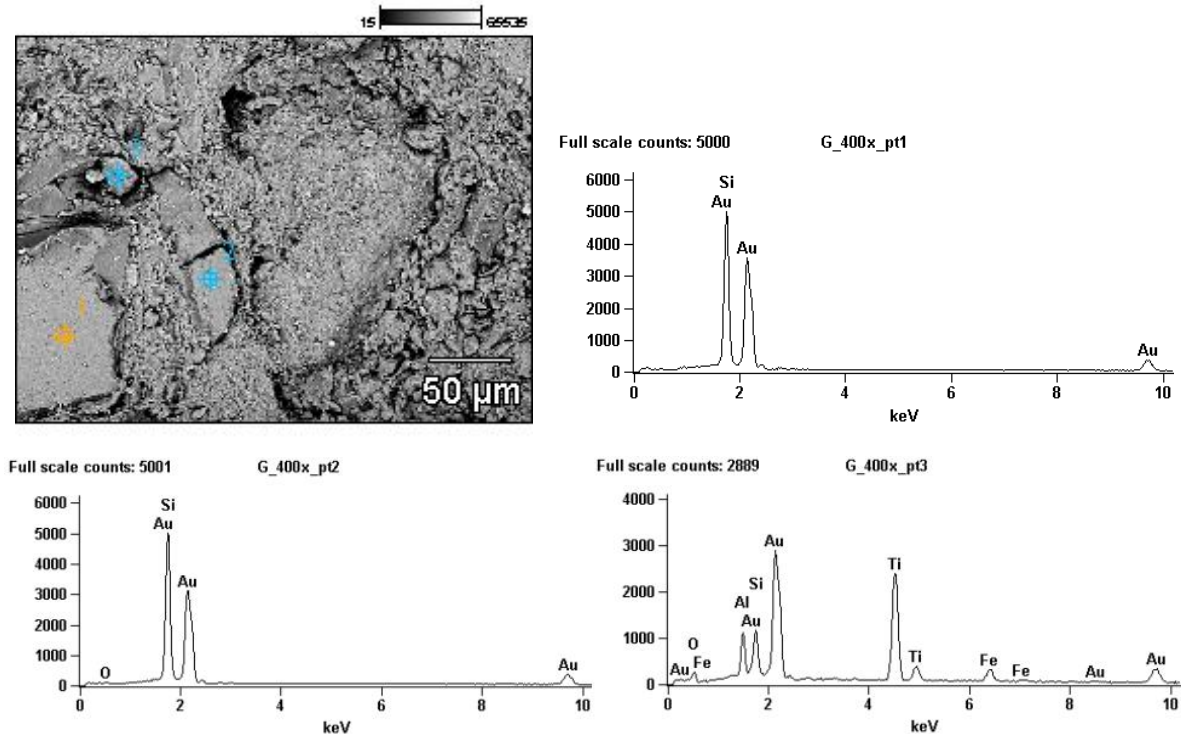


Figura 5.42. Micrografias de MEV da cerâmica **M50A** queimada a 850°C na faixa de variação **II** de massa específica com mapeamento por EDS.

As Figuras 5.43 e 5.44 apresentam as micrografias com mapeamento pontual por EDS, das cerâmicas **AFO** e **AFO50A**, respectivamente. Os pontos 1 e 3 da Figura 5.43 e os pontos 1 e 2 da Figura 5.44 mostram a matriz amorfa de aluminossilicato. Já o ponto 2 da Figura 5.43 mostra uma partícula de quartzo envolvida na matriz. A cerâmica **AFO** apresenta uma superfície com bem mais rugosidade e trincas do que a cerâmica **AFO50A** mostrando que a temperatura de 850°C consolidou melhor a cerâmica com argilito em sua composição.

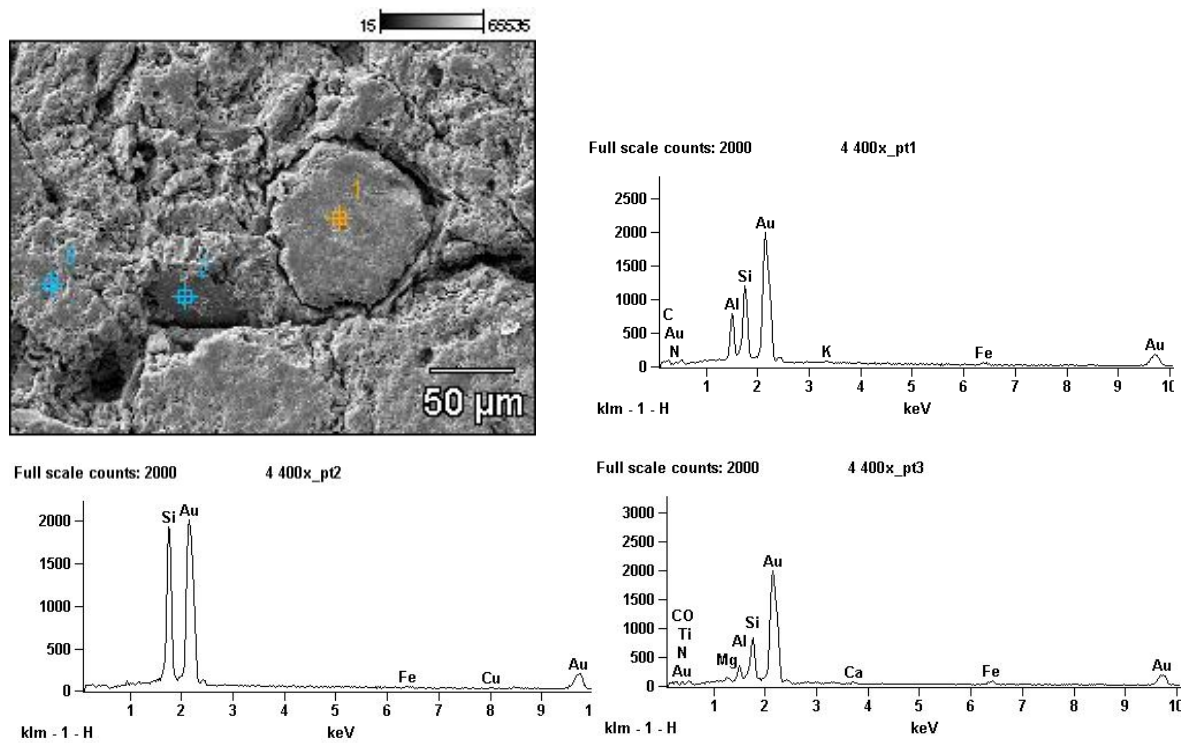


Figura 5.43. Micrografias de MEV da cerâmica **AFO** queimada a 850°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.

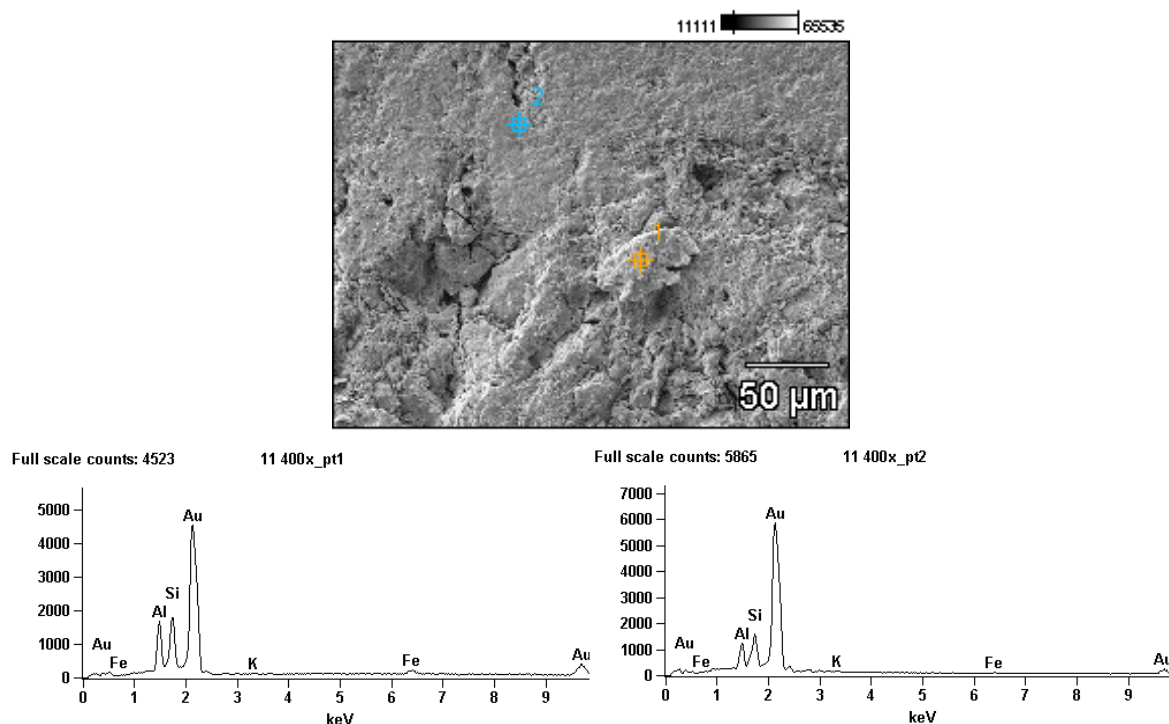


Figura 5.44. Micrografias de MEV da cerâmica **AFO50A** queimada a 850°C na faixa de variação **II** de massa específica com mapeamento por EDS.

As Figuras 5.45 a 5.48 apresentam micrografias obtidas por MEV das cerâmicas **M**, **M50A**, **AFO** e **AFO50A** queimadas a 1050°C na faixa de variação **II** de massa específica, bem como mapeamento pontual por EDS das regiões selecionadas. Observa-se, de modo geral, que a esta temperatura os fenômenos de sinterização, já em estágio avançado, provocaram um alisamento da superfície destas cerâmicas, restando pouca rugosidade.

O mapeamento por EDS da cerâmica **M**, Figura 5.45, assim como observado em todas as cerâmicas, apresentou partículas de quartzo, ponto 1, envolvida por uma matriz amorfa de aluminossilicato, ponto 2. Segundo Vieira, Soares e Monteiro (2008), as partículas de quartzo apresentam comportamento inerte podendo ser observadas em temperatura de 1050°C, onde as reações de sinterização estão em estágio avançado.

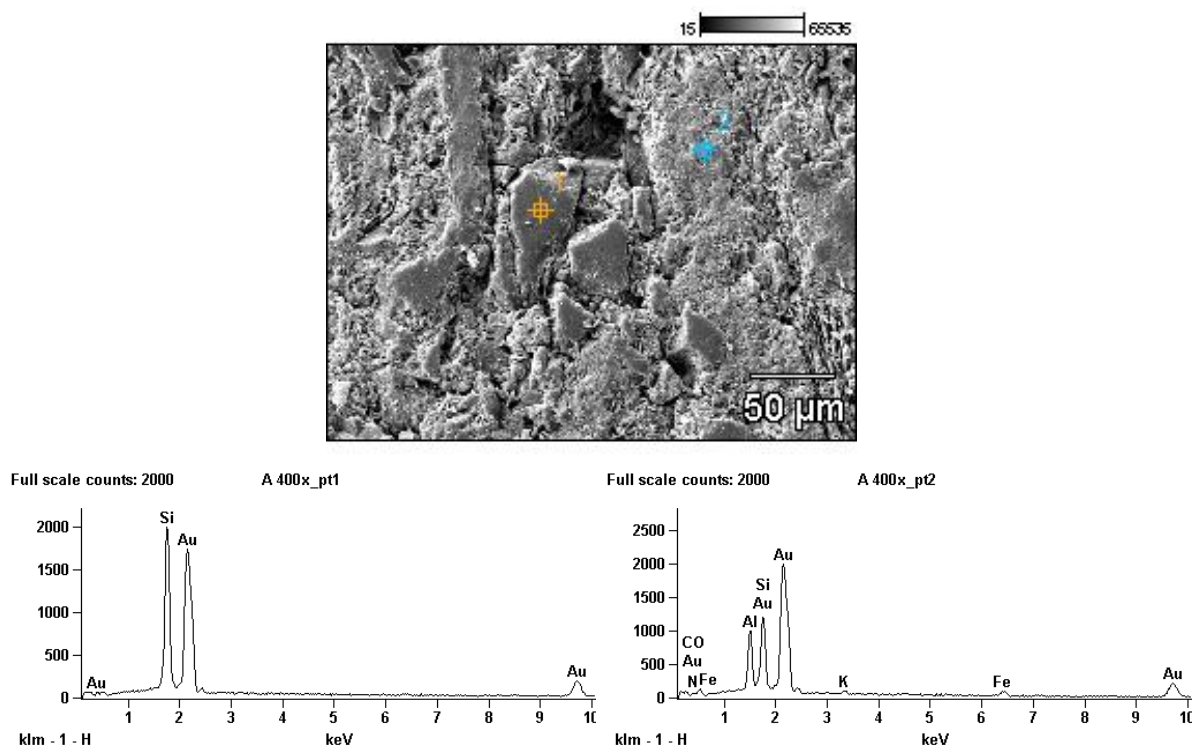


Figura 5.45. Micrografias de MEV da cerâmica **M** queimada a 1050°C na faixa de variação **II** de massa específica com mapeamento por EDS.

Para a cerâmica **M50A**, o mapeamento pontual por EDS, Figura 5.46, apresenta, no ponto 1, uma partícula provavelmente de quartzo, envolvida na matriz aluminossilicato, bem como, uma grande falha em sua volta. Deve-se ressaltar que, embora, tenha ocorrido o aparecimento desta falha, possivelmente associada ao caráter inerte do quartzo, a mesma não trouxe prejuízo para a resistência mecânica, como foi mostrado anteriormente. Já o ponto 2 apresenta a matriz amorfa de aluminossilicato com aspecto mais fino e liso.

Já a Figura 5.47 mostra o mapeamento por EDS da cerâmica **AFO** revelando, tanto no ponto 1 quanto no ponto 2, uma matriz amorfa de aluminossilicato com presença de Fe associado à hematita. Apresenta ainda um pouco de rugosidade, mas em menor quantidade quando comparado à temperatura de 850°C.

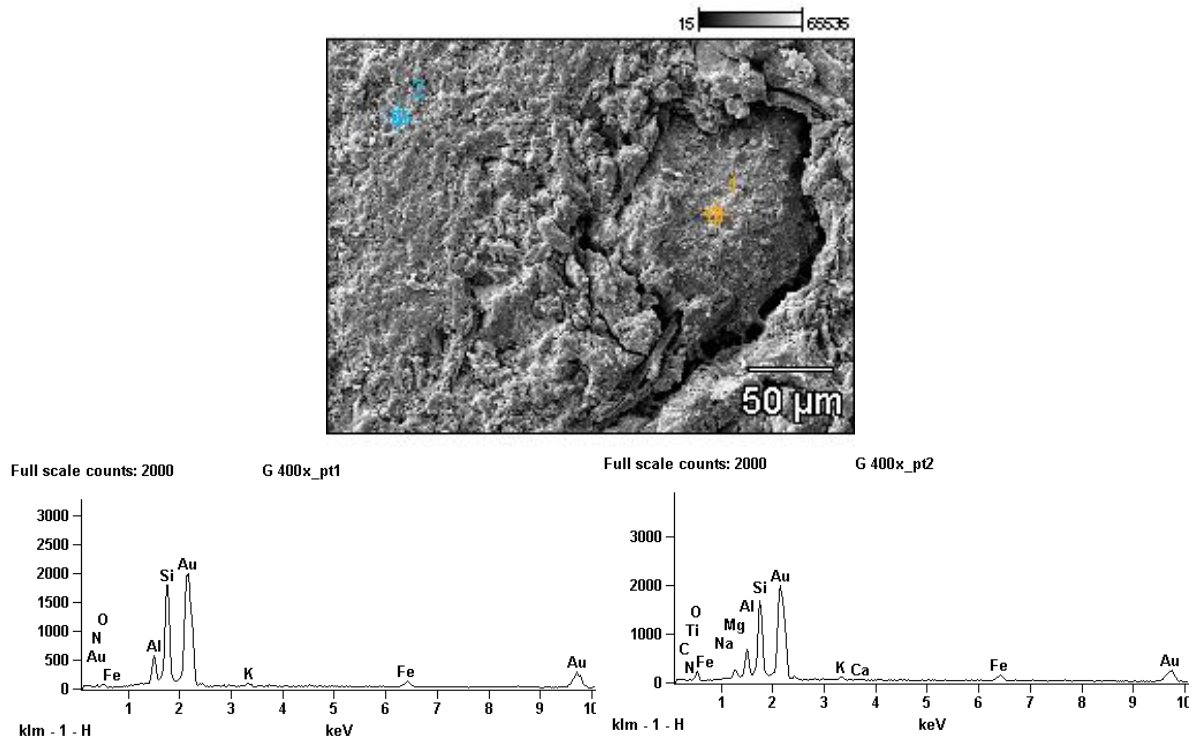


Figura 5.46. Micrografias de MEV da cerâmica **M50A** queimada a 1050°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.

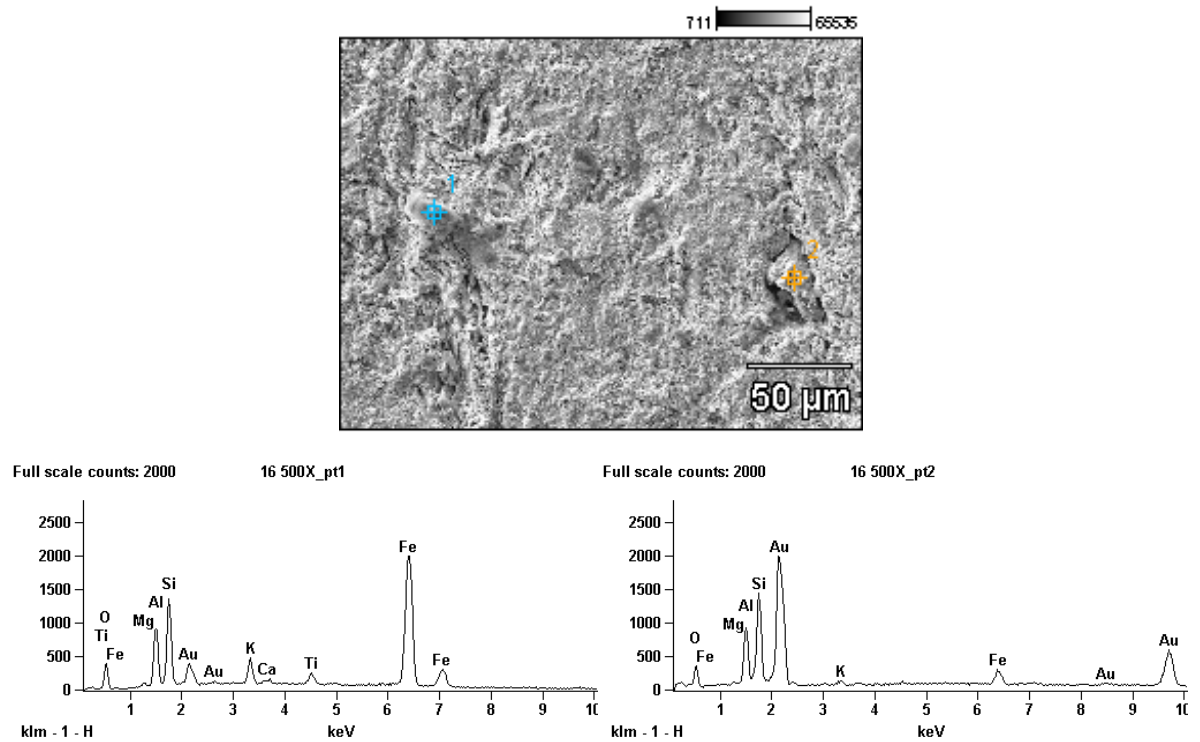


Figura 5.47. Micrografias de MEV da cerâmica **AFO** queimada a 1050°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.

Para a cerâmica **AFO50A**, observa-se uma superfície bem mais lisa em comparação à cerâmica **AFO** queimada a 1050°C, Figura 5.48. Este alisamento é mais evidente devido à presença de argilito na composição desta cerâmica, que atuou de forma a melhorar as características da mesma. Nota-se novamente uma partícula de quartzo, ponto 2, envolvida na matriz amorfa de aluminossilicato, ponto 1.

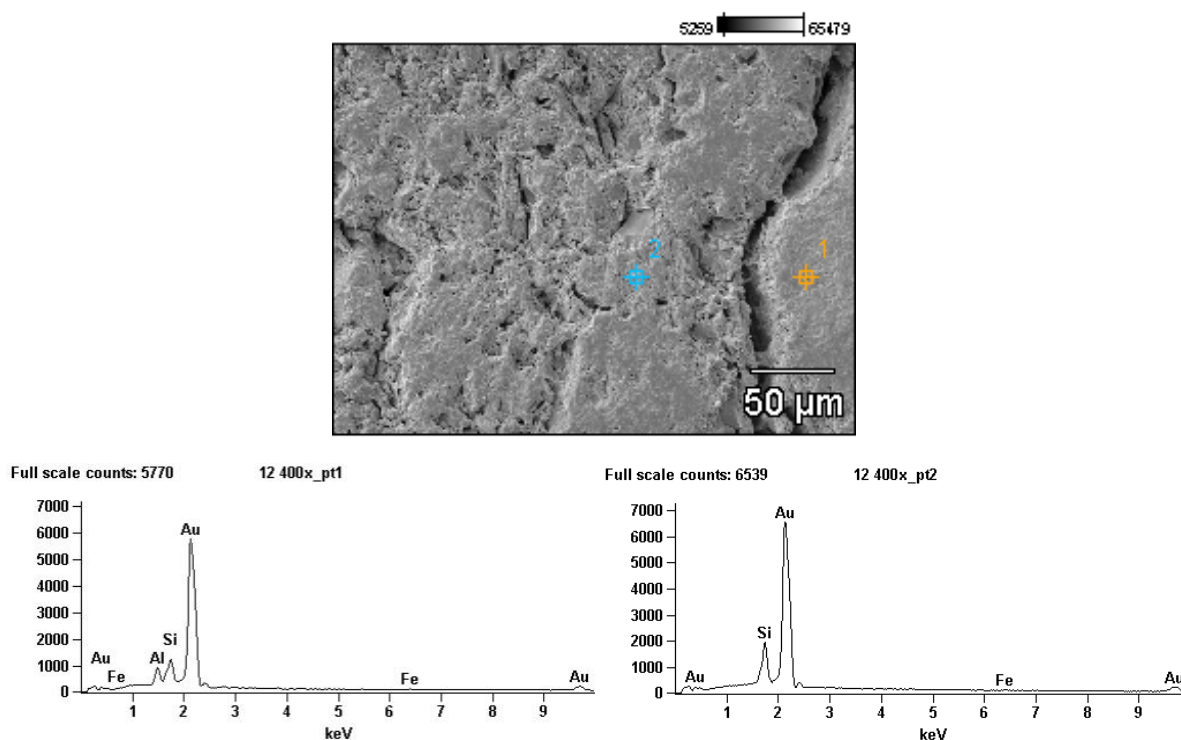


Figura 5.48. Micrografias de MEV da cerâmica **AFO50A** queimada a 1050°C na faixa de variação II de massa específica com mapeamento por EDS.

Devido à semelhança das matérias-primas, pode-se afirmar que, de forma geral, a microestrutura das cerâmicas revelou composições parecidas, se modificando apenas em função da temperatura de queima. O quartzo presente em praticamente todas as cerâmicas, bem como compostos de ferro que foram observados em algumas micrografias, podem atuar como concentradores de tensão contribuindo para reduzir a resistência mecânica das cerâmicas. Segundo Ribeiro (2010), a presença desses elementos indica que eles apresentam caráter inerte e que atuam também como material de preenchimento na matriz cerâmica.

5.3.4. Difração de raios-X

As Figuras 5.49 e 5.50 apresentam os difratogramas de raios-X da cerâmica **M** queimada a 850 e 1050°C respectivamente. São observadas como fases predominantes, na Figura 5.49, o quartzo, a mica e a hematita. A mica e o quartzo são fases ditas residuais, ou seja, provenientes da matéria-prima no seu estado natural. Já a hematita é proveniente da desidratação de hidróxidos de ferro, eventualmente presentes nas argilas de Campos dos Goytacazes (MONTEIRO, VIEIRA, 2002). A 850°C não ocorre alterações de fases cristalinas de queima, exceto para a caulinita que ao perder sua água de constituição se transforma em metacaulinita, uma fase amorfa. Já a temperatura de 1050°C, além das fases observadas a 850°C, verifica-se a presença da mulita. A mulita é uma fase cristalina proveniente da decomposição da metacaulinita.

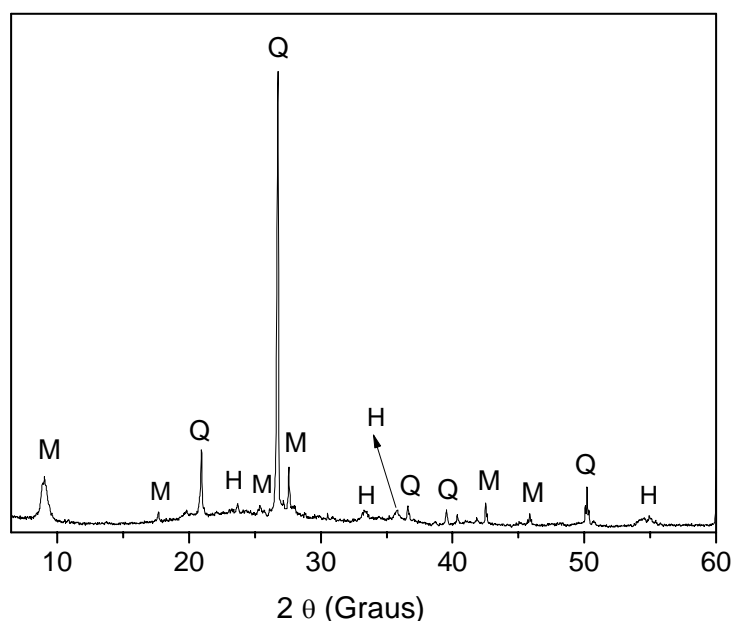


Figura 5.49. Difratograma de raios-X da cerâmica **M** queimada a 850°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo.

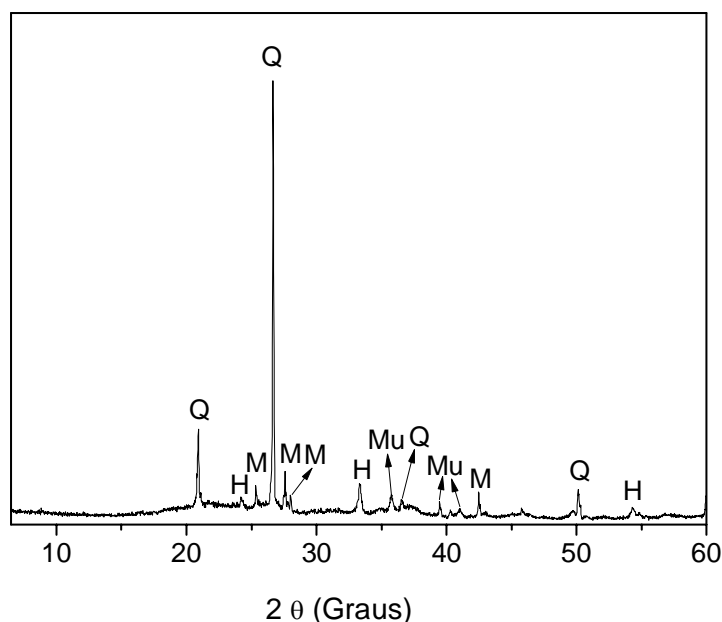


Figura 5.50. Difratograma de raios-X da cerâmica **M** queimada a 1050°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Mu** = mulita; **Q** = quartzo.

As Figuras 5.51 e 5.52 apresentam os difratogramas de raios-X da cerâmica **M50A** queimada a 850 e 1050°C, respectivamente. São observadas como fases cristalinas para esta cerâmica queimada a 850°C o quartzo, a mica, a hematita, feldspatos plagioclásios e potássicos. A presença de feldspatos plagioclásios e potássicos está associada ao argilito adicionado à massa argilosa.

Para a temperatura de 1050°C é observado, assim como na cerâmica **M** queimada na mesma temperatura, a presença de mulita, além das fases já citadas. Como já mencionado anteriormente, as matérias-primas são similares e, portanto, as fases cristalinas encontradas serão semelhantes para todas as cerâmicas avaliadas.

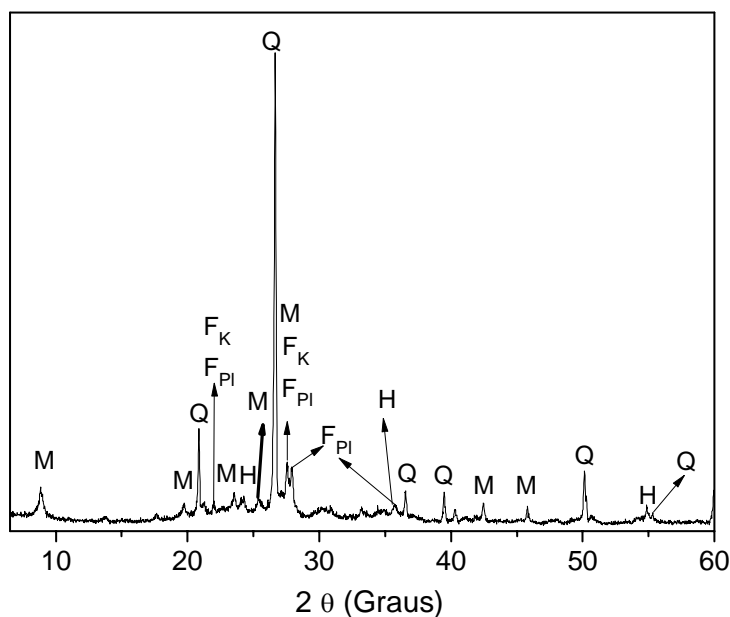


Figura 5.51. Difratoograma de raios-X da cerâmica **M50A** queimada a 850°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo; **F_{PI}** = feldspatos plagioclásios; **F_K** = feldspatos potássicos.

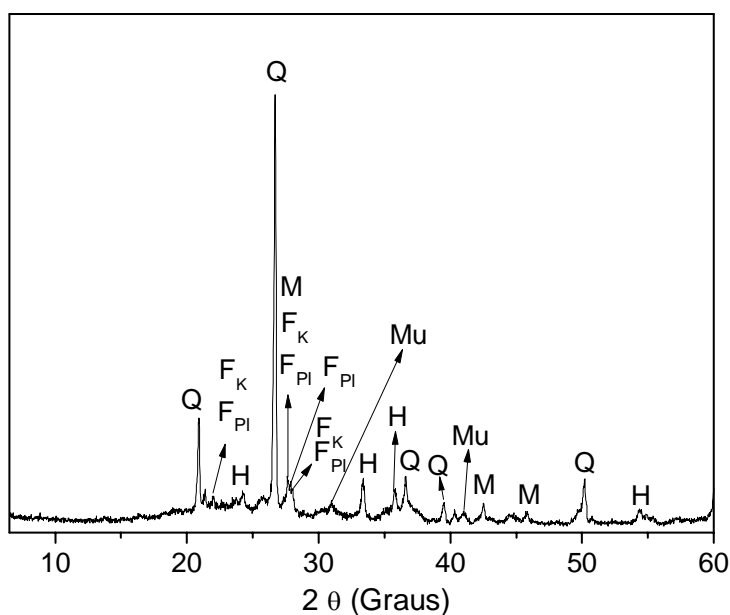


Figura 5.52. Difratoograma de raios-X da cerâmica **M50A** queimada a 1050°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Mu** = mulita; **Q** = quartzo; **F_{PI}** = feldspatos plagioclásios; **F_K** = feldspatos potássicos.

As Figuras 5.53 e 5.54 apresentam os difratogramas de raios-X da cerâmica **AFO** queimada a 850 e 1050°C respectivamente. Para essa cerâmica queimada em ambas as temperaturas já citadas, ocorrem as mesmas fases cristalinas observadas na

cerâmica **M** sendo elas: o quartzo, a mica e a hematita para a temperatura de 850°C e para 1050°C, além dessas fases citadas, aparece a mulita, pois a cerâmica **M** é composta pela mistura de duas argilas, **FO** e **FR**, ambas com características mineralogias similares.

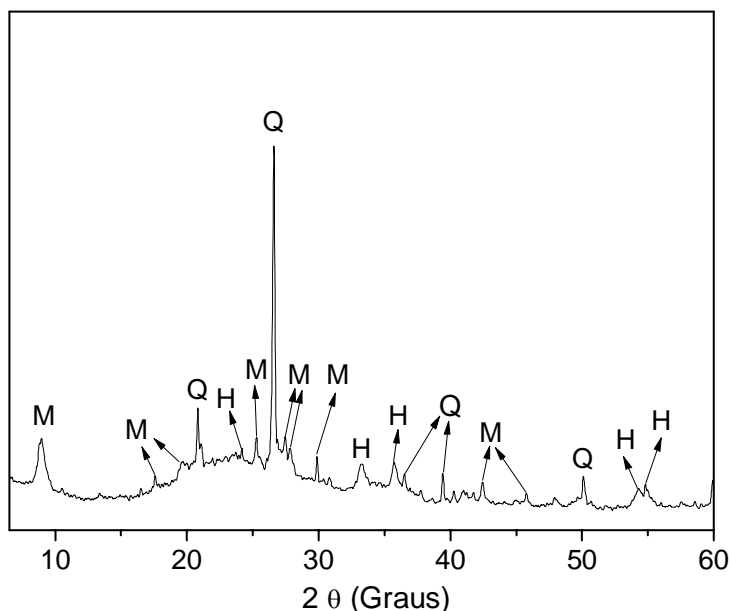


Figura 5.53. Difratograma de raios-X da cerâmica **AFO** queimada a 850°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo.

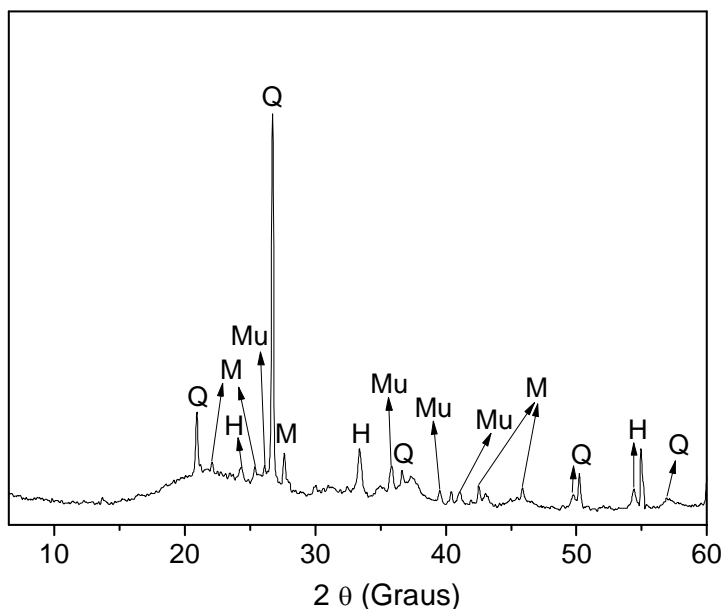


Figura 5.54. Difratograma de raios-X da cerâmica **AFO** queimada a 1050°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Mu** = mulita; **Q** = quartzo.

As Figuras 5.55 e 5.56 apresentam os difratogramas de raios-X da cerâmica **AFO50A** queimada a 850 e 1050°C, respectivamente. As fases cristalinas identificadas nesta cerâmica são as mesmas encontradas na cerâmica **M50A** sendo elas: o quartzo, a mica, a hematita, feldspatos plagioclásios e potássicos para a temperatura de 850°C e para 1050°C, além dessas fases citadas, aparece a mulita.

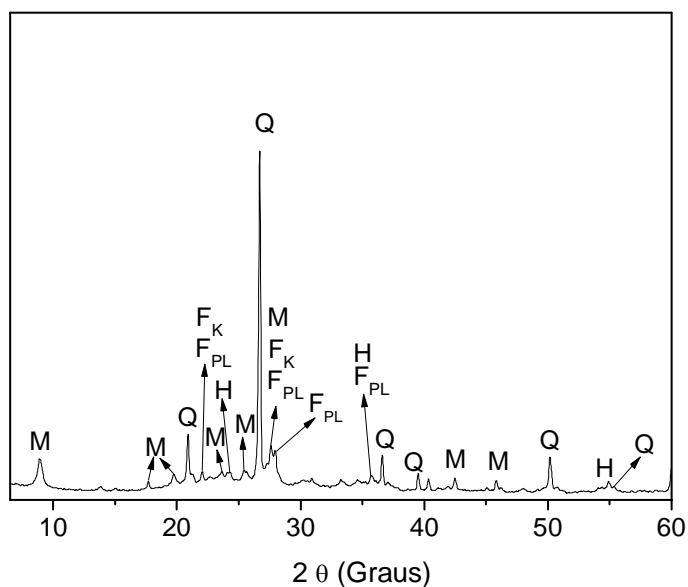


Figura 5.55. Difratograma de raios-X da cerâmica **AFO50A** queimada a 850°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo; **F_{PI}** = feldspatos plagioclásios; **F_K** = feldspatos potássicos.

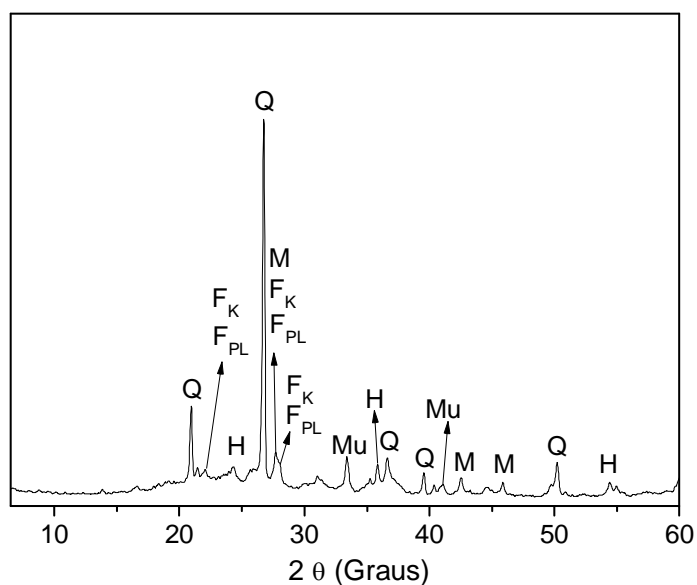


Figura 5.56. Difratograma de raios-X da cerâmica **AFO50A** queimada a 1050°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Mu** = mulita; **Q** = quartzo; **F_{PI}** = feldspatos plagioclásios; **F_K** = feldspatos potássicos.

II. Teste Industrial

5.4. Aspectos gerais

Foram produzidos adoquins pelo processo de extrusão no formato de espinha de peixe e com temperatura de queima de 950°C, com dimensões em média de 21,5cm de comprimento, 11cm de largura e 5cm de altura. Para fins comparativos foi usada uma amostra de **PPC** com características semelhantes, sendo suas medidas em média de 22cm de comprimento, 11cm de largura e 6cm de espessura. A Figura 5.57 mostra o **PPC** utilizado para comparação durante este estudo. Segundo Cruz (2003) os **PPCs** são produzidos em 4 alturas diferentes 4, 6, 8 ou 10cm. Segundo a norma o piso de 4cm, com resistência 25MPa, para áreas de circulação de pedestres, o piso de 6cm, com resistência 35MPa, para áreas de circulação de veículos leves e pisos de 8 e 10cm, com resistência acima de 50MPa, para áreas de circulação de veículos pesados.



Figura 5.57. PPC para fins comparativos.

5.4.1. Aspectos visuais e de processamento

A Figura 5.58 mostra os adoquins após as etapas de secagem e queima. A análise visual mostrou que o processo de produção foi bem realizado e não apresentou problemas aparentes nas peças.

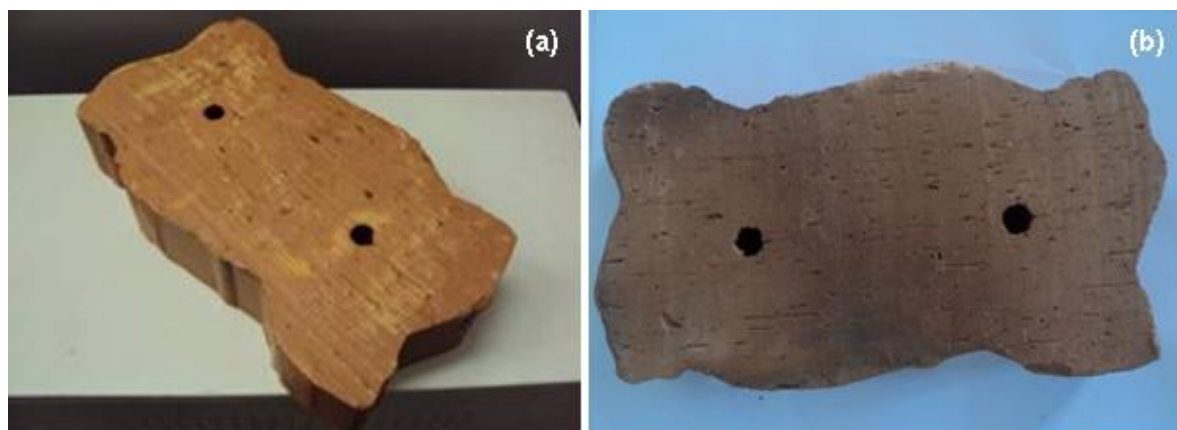


Figura 5.58. Adoquins produzidos, após secagem (a); após queima (b).

5.4.2. Propriedades físicas e mecânicas

A Tabela 5.4 apresenta as propriedades físicas e mecânicas dos três tipos de adoquins produzidos e do **PPC**. Foram utilizadas 7 peças para cada ensaio realizado. Nota-se que as três formulações utilizadas para a produção de adoquim alcançaram o valor mínimo de resistência à compressão para utilização em vias com tráfego de pedestres, de acordo com as normas internacionais, que exige um valor mínimo de 20,7MPa. Por outro lado, a utilização do adoquim para tráfego leve exige uma resistência à compressão superior a 38MPa e um valor de absorção de água inferior à 14% (ASTM C902, 2006; NTC 3829, 2002) e acima de 35MPa segundo a norma brasileira para **PPC** (ABNT 9781, 1987).

É possível observar que com relação ao parâmetro absorção de água, apenas a formulação **AFO50A**, atende a exigência da norma. A formulação **AFO** ficou muito próxima de atingir este requisito. Uma mudança na etapa de conformação, como o aumento do grau de empacotamento das partículas por meio da redução da água de plasticidade, pode resolver este problema. Já a formulação **M** ficou bem acima do que a norma permite para trânsito leve, porém, para áreas internas e de circulação de pedestres poderá ser usado. Estes resultados se devem à temperatura que não foi apropriada para formar fase líquida em abundância.

Embora o **PPC** tenha tido um resultado de absorção de água bem inferior aos adoquins, ele obteve um valor de resistência médio inferior ao exigido pela norma

brasileira para veículos de trânsito leve que é de 35MPa. Este valor, abaixo da norma, pode ser devido a um erro do equipamento e/ou do operador.

Ao comparar os valores de resistência mecânica dos adoquins com o **PPC**, observa-se que os adoquins apresentaram percentuais de resistências de 28,61, 15,07 e 21,16% inferiores ao **PPC**, para as formulações **M**, **AFO** e **AFO50A**, respectivamente. Estes valores inferiores ao **PPC**, para esta propriedade, podem ser explicados pela diferença de espessura e pelas características das matérias-primas usadas para o desenvolvimento dos adoquins. Os adoquins ficaram em média com 5cm de espessura e o **PPC** avaliado possuía 6cm. O quartzo pode ter sido o principal vilão em relação a esta propriedade, devido à sua ação de concentrador de tensões, provocando assim queda na resistência mecânica.

Observou-se que o argilito não possibilitou um incremento da resistência mecânica das peças, em relação ao adoquim **AFO**. Isto pode ter acontecido devido à menor quantidade de quartzo e pela maior quantidade de argilomineral presente na argila forte. O quartzo tem ação de concentrador de tensões diminuindo a resistência mecânica. A maior quantidade de argilomineral, partículas muito finas, proporciona maior difusão no estado sólido e, juntamente com a formação de fase líquida tendem a aumentar a resistência mecânica das peças. Esta mesma tendência foi observada para o teste laboratorial discutido anteriormente.

Avaliando o adoquim **M** e o **AFO50A**, pode-se observar que o segundo obteve maior resistência mecânica em relação ao primeiro. Embora ambos tenham a mesma quantidade de argila forte e tanto a argila fraca quanto o argilito possuem, em sua composição, maiores quantidades de quartzo. O melhor resultado, para o adoquim **AFO50A**, pode ser explicado pela maior quantidade de fundentes presentes no argilito que auxiliam na consolidação das partículas aumentando a resistência.

Entretanto, a resistência à compressão apresenta-se abaixo do valor mínimo para veículos comerciais de linha. Uma maior resistência pode ser obtida com o aumento do grau de empacotamento da cerâmica durante a etapa de conformação, basicamente por meio da redução da água de plasticidade, bem como por meio do aumento da espessura da peça cerâmica.

Porém, segundo as normas internacionais pisos para pavimentação de áreas internas não possuem limite de absorção de água e necessitam ter resistência

mecânica superior a 20,7MPa. Assim, avaliando os resultados obtidos, pode-se afirmar que todos os adoquins produzidos atendem a norma e podem ser produzidos e comercializados.

Tabela 5.4. Propriedades físicas e mecânicas

Propriedades	Massas			
	M	AFO	AFO50A	PPC
Massa específica a seco (g/cm ³)	1,80 ± 0,02	1,70 ± 0,03	1,88 ± 0,06	-
Retração linear (%)	2,68 ± 0,60	3,78 ± 0,22	2,45 ± 0,53	-
Absorção de água (%)	17,61 ± 0,36	14,84 ± 0,30	13,90 ± 0,43	7,88 ± 0,27
Resistência à compressão (MPa)	23,78 ± 0,95	28,29 ± 0,58	26,24 ± 0,67	33,31 ± 3,11

Algumas medidas para melhorar as propriedades dos adoquins podem ser adotadas tais como: redução de água de plasticidade, melhorando o empacotamento das partículas, aumento da espessura das peças e ainda um aumento da temperatura de queima. Essas medidas associadas podem contribuir significativamente para melhorar a qualidade do produto que chegará ao mercado com excelentes características técnicas.

Por fim, vale ressaltar que, os adoquins produzidos alcançaram resistência superior, quando comparado ao **PPC** de 4cm, que tem resistência de 25MPa como indicado pelo fabricante, para uso em áreas de circulação de pedestres. Isto indica que todas as formulações investigadas no teste industrial podem ser usadas para áreas com circulação de pedestres. Como a norma brasileira não estipula seu uso em áreas externas e internas, os adoquins podem ser usados em ambas as situações.

5.4.3. Resistência ao ataque químico

Neste ensaio os corpos de prova foram imersos na solução química, onde a parte sem corte, lado “A”, foi mergulhado na solução e a parte com corte, lado “B”, ficou fora da solução. As Figuras 5.59 a 5.65 apresentam imagens dos corpos de provas antes do ensaio e após o ensaio, lado “A” e lado “B”, onde (a), (b) e (c) são corpos de prova da composição **M**, (d), (e) e (f) composição **AFO**, (g), (h) e (i) composição **AFO50A**, (j), (k) e (l) **PPC**.

Observa-se que os corpos de prova nas três formulações dos adoquins não sofreram nenhuma alteração visual em suas superfícies e arestas, bem como não houve, para nenhum deles, perda de massa.

A submissão do **PPC** a reagentes químicos mostrou em três situações, visível alteração visual, Figuras 5.61, 5.62 e 5.63, e em duas situações perda de massa, Figuras 5.62 e 5.63. Essas alterações ocorreram para as soluções ácidas de baixa e alta concentração. Quando o **PPC** foi submetido à solução de ácido clorídrico 3% (v/v) observou-se alteração visual de coloração. Essa alteração, Figura 5.61 (k), mostra no lado “A”, uma região central de coloração normal do **PPC**, porém nota-se na borda dessa região uma mancha amarelada. Já na Figura 5.61 (l) nota-se, no lado “B”, uma separação de cores, sendo parte esbranquiçada e parte de coloração normal do **PPC**. Para esta solução não ocorreu perda de massa.

Nas Figuras 5.62 e 5.63 (k) e (l) observam-se os resultados de ataque químico para as soluções de ácido cítrico 100g/L e ácido clorídrico 18% (v/v) respectivamente, no **PPC**. É possível visualizar nitidamente o efeito dessas soluções sobre o **PPC**. Ocorreu mudança significativa, para ambas as soluções, no lado “A”, Figuras 5.62 e 5.63 (k), onde é possível observar arrancamento de materiais expondo de maneira relevante o interior do corpo de prova, causada pela solução de ácido cítrico, e mais superficial, pela solução de ácido clorídrico 18%. Verificou-se perdas de massa de 29,26 e de 9,52%, valores superiores ao estabelecido pela norma de adoquim UNE-NE-1344/2002. O lado “B” para a solução de ácido cítrico apresentou pequena perda de materiais Figura 5.62 (l). Já para a solução de ácido clorídrico 18% ocorreu uma pequena mudança de cor, Figura 5.63 (l). Portanto, após esta avaliação, os adoquins e o **PPC** foram classificados de acordo com a norma da ABNT 13818/1997 nas classes apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Classificação dos produtos após ataque químico (ABNT 13818, 1997)

Produto	Reagentes	Classificação
Adoquim: M, AFO e AFO50A	Cloreto de amônia (100g/L)	UA – Efeitos não visíveis
	Hipoclorito de sódio (20g/L)	UA – Efeitos não visíveis
	Ácido clorídrico 3% (v/v)	ULA – Efeitos não visíveis
	Ácido cítrico (100g/L)	ULA – Efeitos não visíveis
	Ácido clorídrico 18% (v/v)	UHA – Efeitos não visíveis
	Ácido láctico 5% (v/v)	UHA – Efeitos não visíveis
	Hidróxido de potássio (100g/L)	UHA – Efeitos não visíveis
PPC	Cloreto de amônia (100g/L)	UA – Efeitos não visíveis
	Hipoclorito de sódio (20g/L)	UA – Efeitos não visíveis
	Ácido clorídrico 3% (v/v)	ULC - Efeitos visíveis no lado do corte, no lado sem corte e na superfície
	Ácido cítrico (100g/L)	ULC - Efeitos visíveis no lado do corte, no lado sem corte e na superfície
	Ácido clorídrico 18% (v/v)	UHC - Efeitos visíveis no lado do corte, no lado sem corte e na superfície
	Ácido láctico 5% (v/v)	UHA – Efeitos não visíveis
	Hidróxido de potássio (100g/L)	UHA – Efeitos não visíveis

Este ensaio mostrou que os adoquins possuem melhor resistência a reagentes químicos que o **PPC**. Benefício que deve ser destacado como uma vantagem a mais para o seu uso.



Figura 5.59. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Cloreto de amônio (100g/L). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.

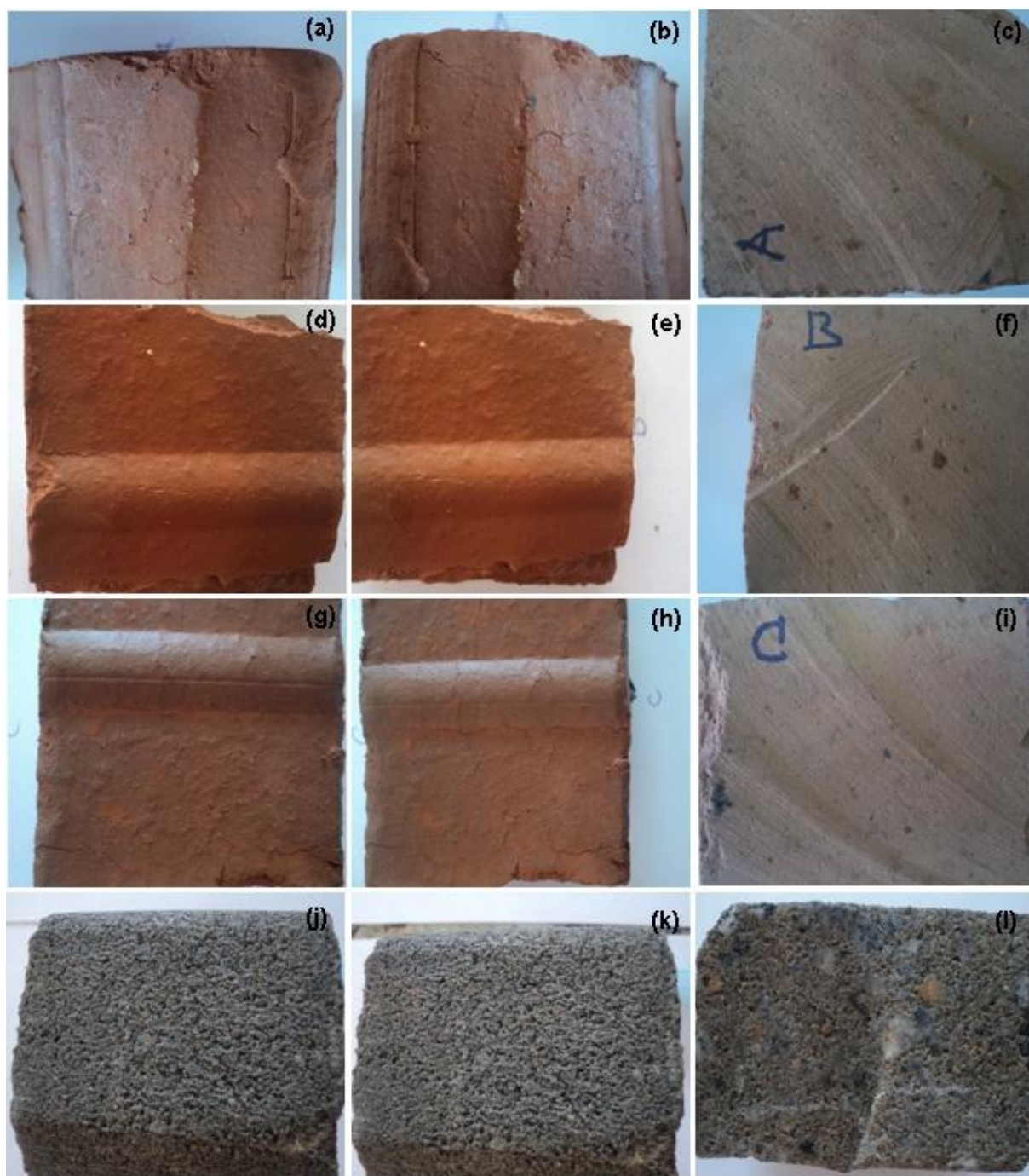


Figura 5.60. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Hipoclorito de sódio (20g/L). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.

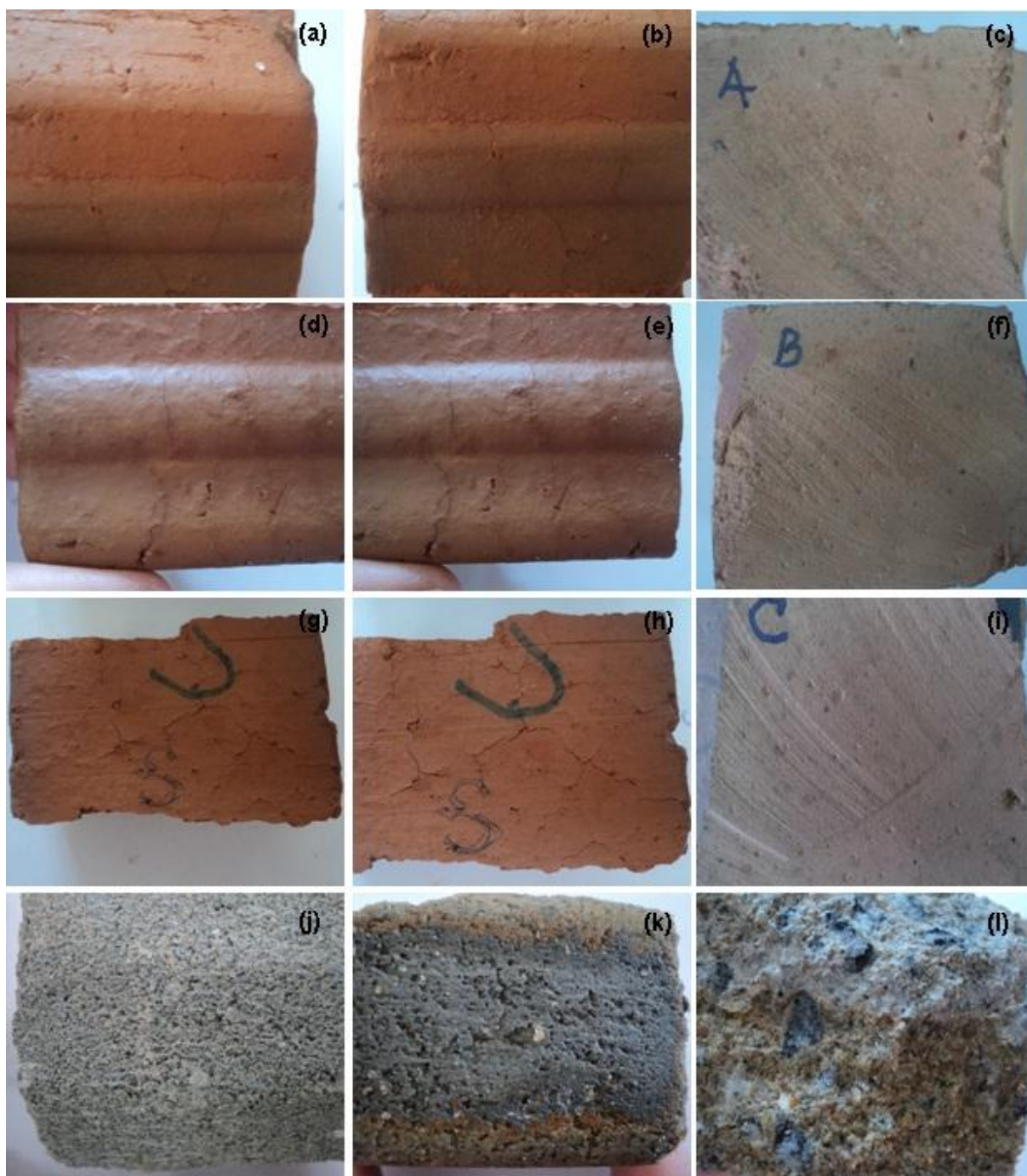


Figura 5.61. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Ácido clorídrico 3% (v/v). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.

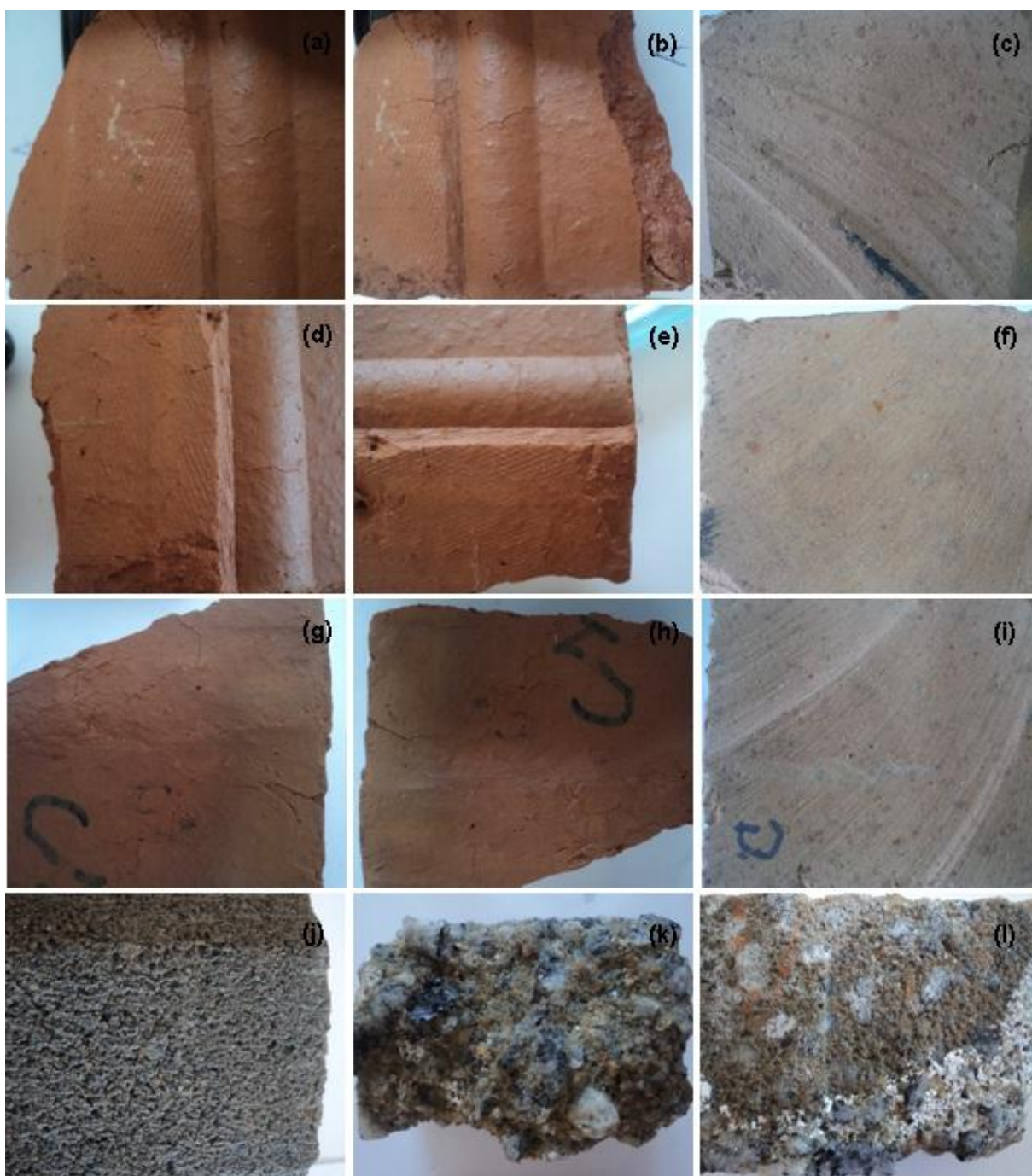


Figura 5.62. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Ácido cítrico (100g/L). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.

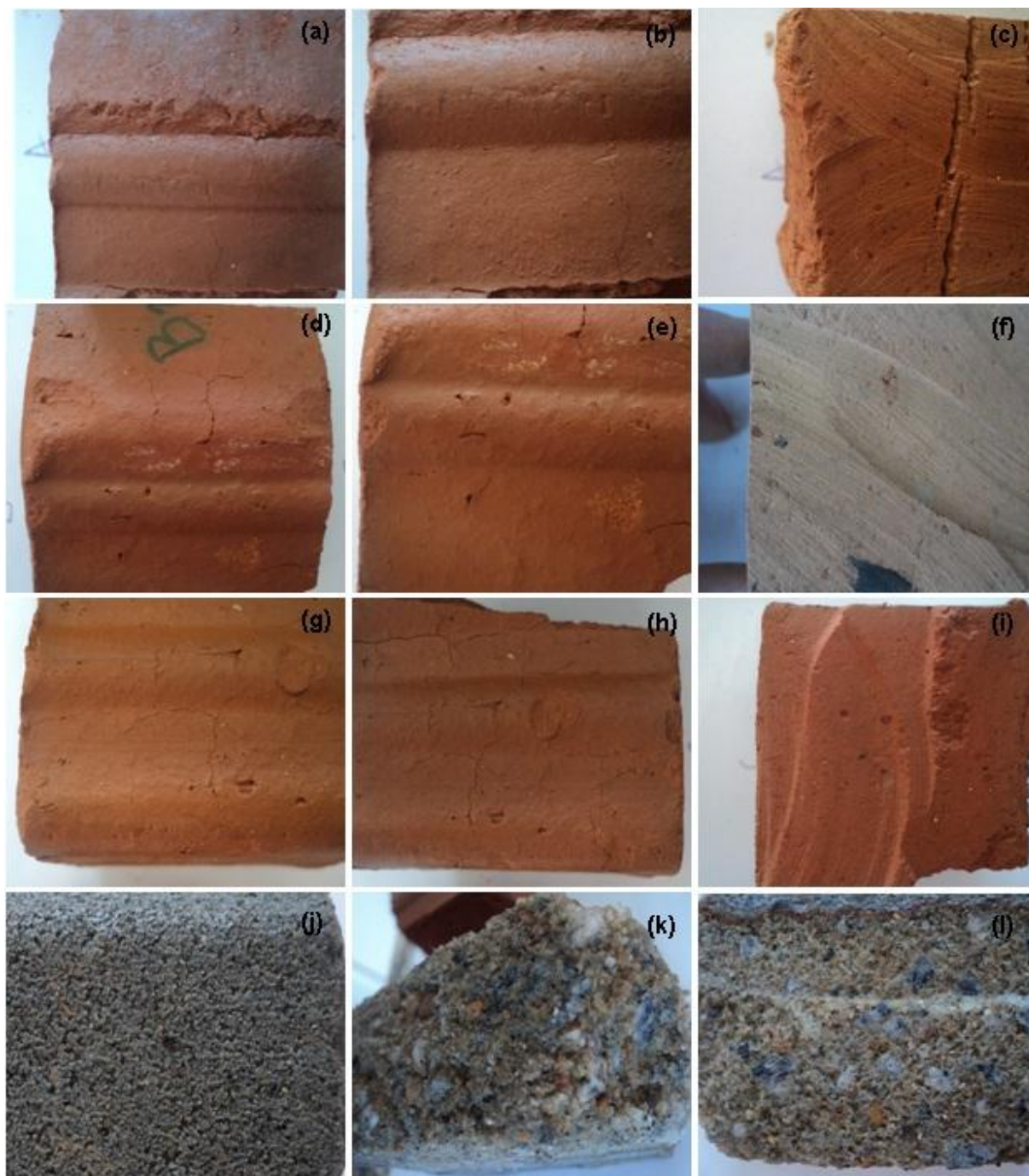


Figura 5.63. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Ácido clorídrico 18% (v/v). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.

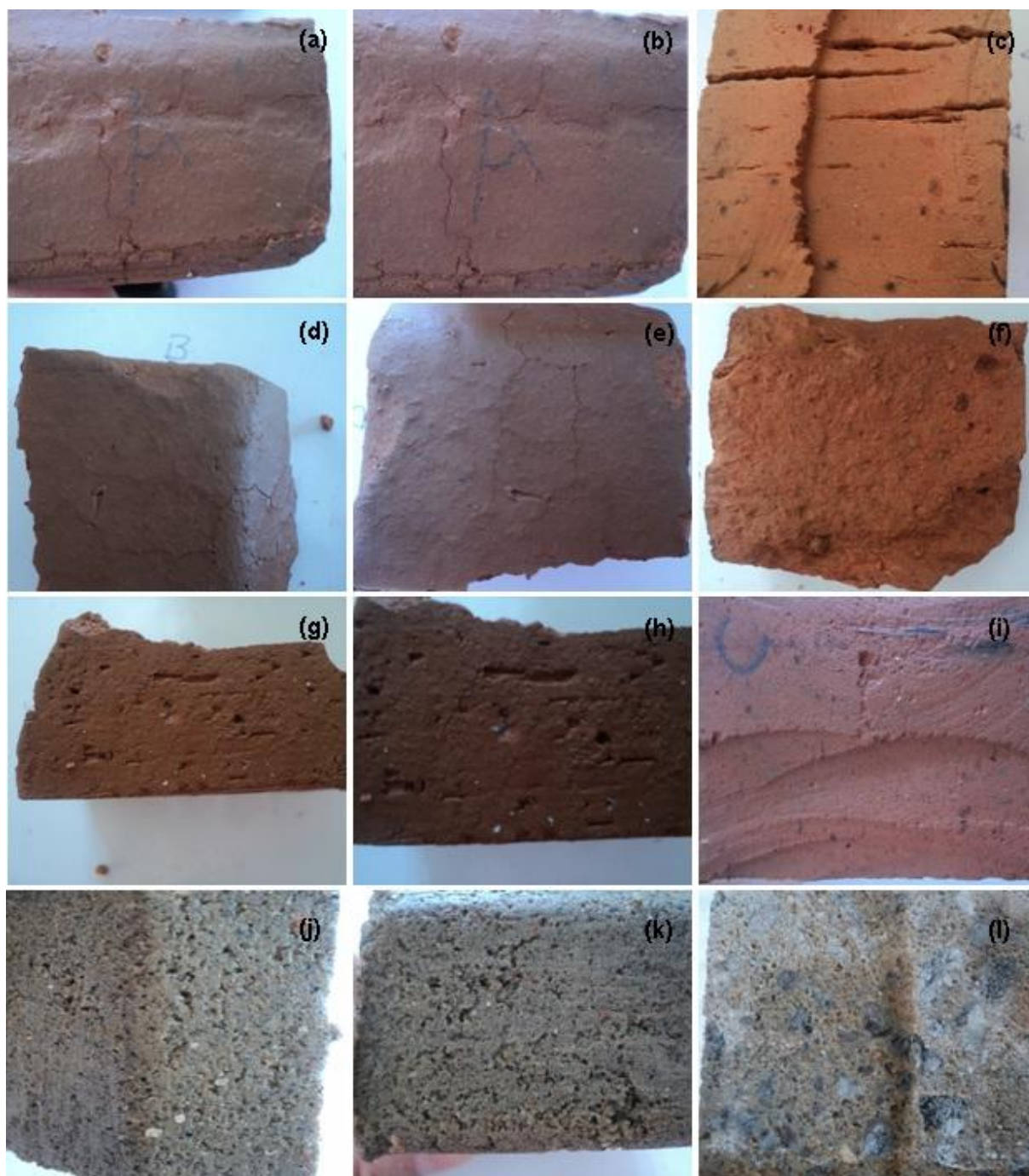


Figura 5.64. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Ácido láctico 5% (v/v). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.

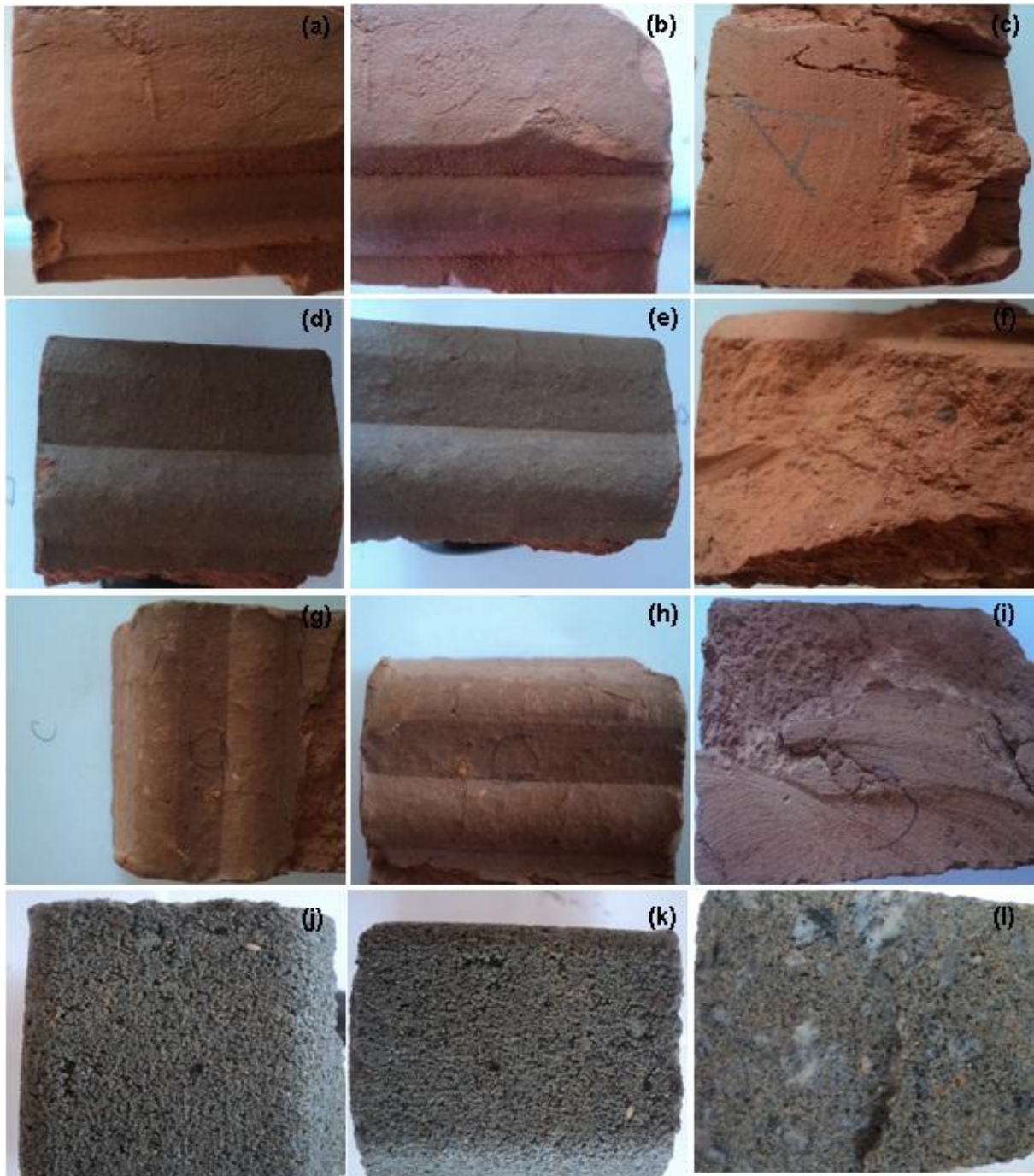


Figura 5.65. Corpos de prova após ensaio de ataque químico com Hidróxido de potássio (100g/L). (a) antes de ensaio, (b) após o ensaio, lado “A”, (c) após o ensaio, lado “B”; (d) antes de ensaio, (e) após o ensaio, lado “A”, (f) após o ensaio, lado “B”; (g) antes de ensaio, (h) após o ensaio, lado “A”, (i) após o ensaio, lado “B”; (j) antes de ensaio, (k) após o ensaio, lado “A”, (l) após o ensaio, lado “B”.

5.4.4. Microscopia ótica das peças industriais e do PPC

As Figuras 5.66 e 5.67 apresentam micrografias óticas das cerâmicas **M**, **AFO** e **AFO50A**. As letras (a) e (c) representa aumento de 108x e (b) e (d) aumento de 430x. De um modo geral são observadas características parecidas com as micrografias do teste laboratorial. A cor avermelhada é devida à presença de compostos de ferro na argila e no argilito. Observa-se também a presença de quartzo (setas em preto), algumas partículas pretas associadas a compostos de ferro (setas brancas), partículas avermelhadas, provavelmente hematita (circuladas em preto). Nas cerâmicas incorporadas com argilito aparecem partículas de cor acinzentadas (circuladas em branco). O **PPC**, Figura 5.68, apresenta um agregado de brita e areia, círculo preto, envolto pelo cimento bastante adensado.

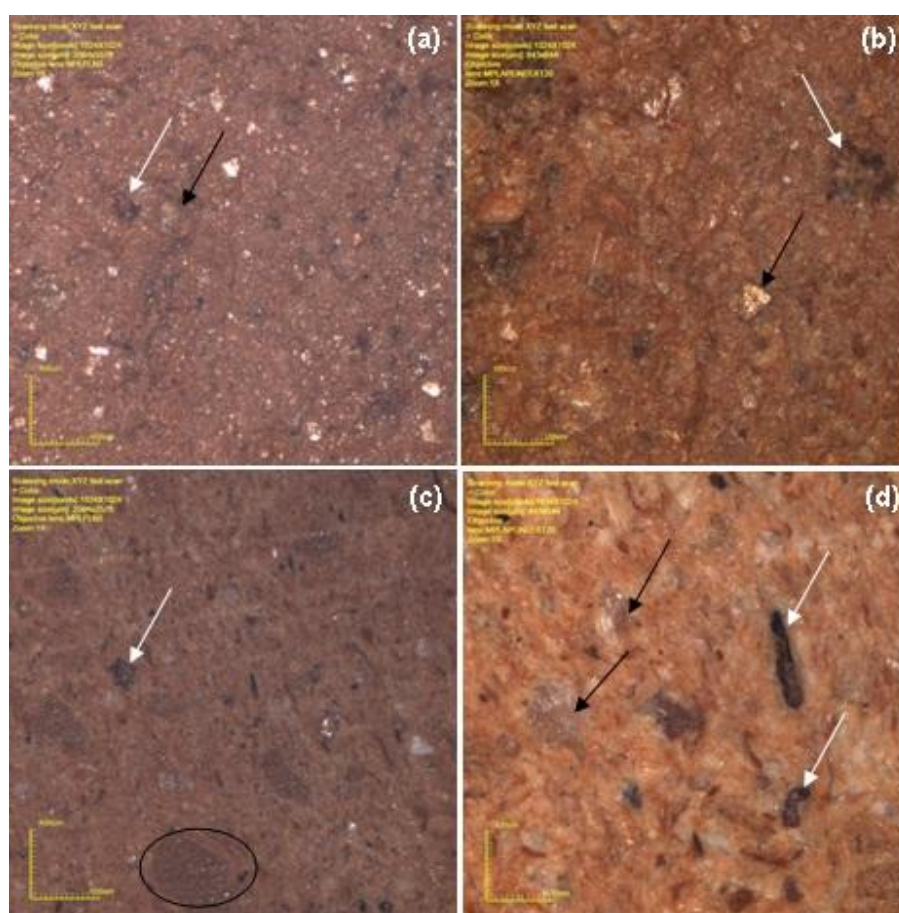


Figura 5.66. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 950°C, (a) e (b) **M**; (c) e (d) **AFO**.

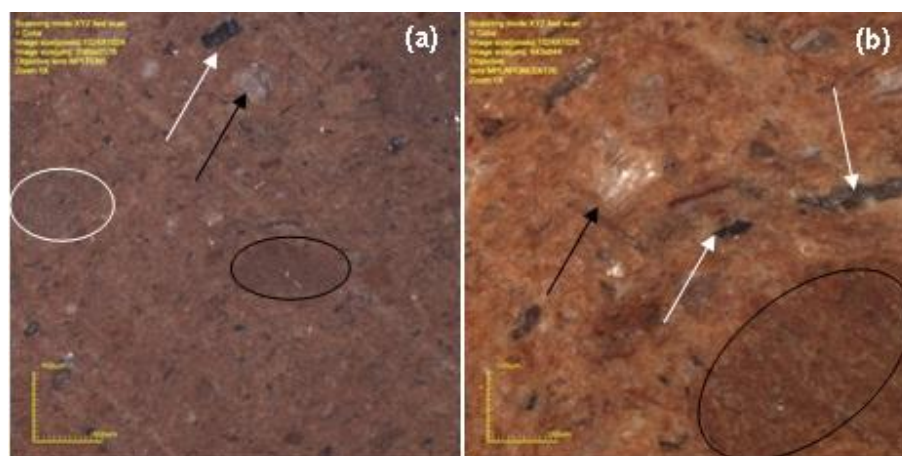


Figura 5.67. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 950°C, (a) e (b) **AFO50A**.

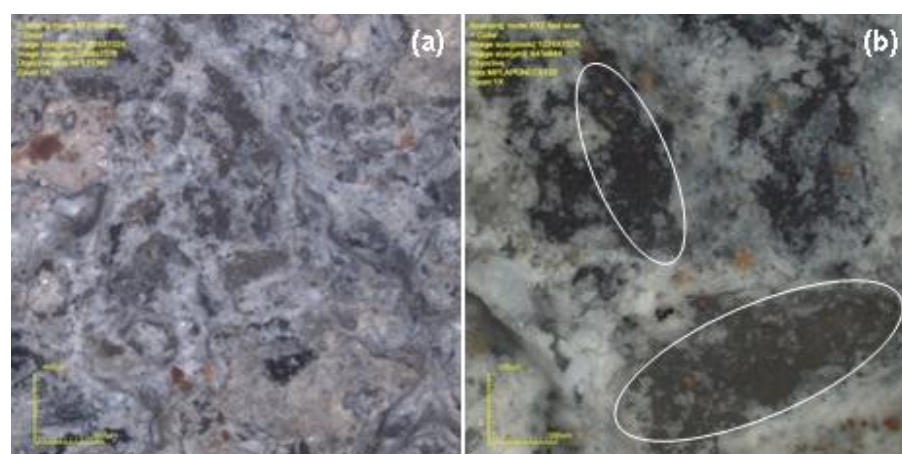


Figura 5.68. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas 950°C, (a) e (b) **PPC**.

5.4.5. Comparação entre os testes laboratorial e industrial

A Tabela 5.6 apresenta as propriedades tecnológicas do teste industrial e laboratorial, das peças queimadas a 950°C, sendo que os dados do teste laboratorial para comparação são da faixa II de variação de massa específica.

Observa-se que, de modo geral, as propriedades investigadas ficaram com resultados bem diferentes. Essas diferenças são atribuídas ao grau de empacotamento das partículas no teste industrial, que ficaram bem abaixo do ideal. Com exceção da

absorção de água, no teste industrial, as demais propriedades avaliadas tiveram resultados melhores no teste laboratorial.

Tabela 5.6. Propriedades tecnológicas do teste laboratorial e industrial

Massas	Teste	Propriedades			
		MES (g/cm ³)	RL (%)	AA (%)	RM (MPa)
M	Laboratorial	2,18 ± 0,01	1,39 ± 0,06	16,87 ± 0,84	56,84 ± 4,52
	Industrial	1,80 ± 0,02	2,68 ± 0,60	17,61 ± 0,36	23,78 ± 0,95
AFO	Laboratorial	2,15 ± 0,02	2,95 ± 0,03	16,97 ± 1,32	79,83 ± 6,87
	Industrial	1,70 ± 0,03	3,78 ± 0,22	14,84 ± 0,30	28,29 ± 0,58
AFO50A	Laboratorial	2,16 ± 0,015	1,12 ± 0,10	15,31 ± 1,64	50,87 ± 4,34
	Industrial	1,88 ± 0,06	2,45 ± 0,53	13,90 ± 0,43	26,24 ± 0,67

5.4.6. Análise de viabilidade econômica

Para a análise de viabilidade econômica foram consideradas as seguintes variáveis:

- i – Argilito R\$ 25,00/tonelada
- ii – Frete R\$ 100,00/tonelada
- iii – Argila R\$ 10,00/tonelada
- iv – Consumo do forno a 850°C 0,8m³/tonelada
- v – Consumo do forno a 950°C é 25% superior a 850°C, portanto, 1m³/tonelada
- vi – 1m³ de lenha custa R\$ 45,00
- vii – Peso médio do adoquim 1,950 kg
- viii – m² do adoquim possui 50 peças

Foi considerado, comparativamente, um item da cerâmica que é produzido da mesma forma que o adoquim, porém, é queimado em temperatura de 850°C. Este item é o tijolo maciço e possui comprimento e largura igual ao do adoquim. A Tabela 5.6 apresenta algumas características do tijolo maciço considerando o preço final de venda do produto. Foi feita análise de viabilidade para as três formulações do teste industrial.

Tabela 5.7. Características do tijolo maciço

Dados	Tijolo maciço
Peso	1,3kg
m ²	50 peças
m ²	65kg
m ²	20,00 R\$
Tonelada	307,70R\$

- Custo com matéria-prima considerando a formulação **AFO50A**:
 $0,5 \cdot 10,00 + 0,5 \cdot 125,00 = \text{R\$ } 67,50/\text{tonelada}$ de material produzido;
 1m^2 que possui 50 peças de adoquim pesa: $50 \cdot 1,950 = 97,5$ kg. Portanto, o custo para produzir o m^2 é de **R\$ 6,60 (A)**.
- Custo para queimar o produto 100°C acima dos itens para comparação:
 $97,5 \cdot 45,00/1000 = \text{R\$ } 4,40$ (950 C); $0,8 \cdot 45,00 \cdot 65/1000 = \text{R\$ } 2,34$ (tijolo maciço), portanto, a diferença é de **R\$ 2,10 (B)**.
- Adoquim comparado ao tijolo maciço:
Se a tonelada de tijolo maciço custa **R\$ 307,70**, temos que:
 $97,5 \cdot 307,70/1000 = \text{R\$ } 30,00/\text{m}^2$ de adoquim **(C)**.
- Por fim, obtém-se o valor aproximado de venda do adoquim **AFO50A**:
A+B+C = 6,60+2,10+30,00=R\$ 38,70, portanto, o m^2 de adoquim possui preço final de venda aproximado de **R\$ 38,70**.
- Preço final de venda dos adoquins **M** e **AFO**:
Neste caso o preço final de venda é equivalente a **C+B = 30,00+2,10=R\$ 32,10**, portanto o adoquim para essas duas formulações possui preço final de venda aproximado de **R\$ 32,10**.

A Tabela 5.7 apresenta os preços de venda **PPCs** em diferentes espessuras e cores, onde pode ser observados valores para pisos com espessura de 4, 6 e 8cm.

Tabela 5.8. Preço de venda do **PPC** por espessura e cor

Espessura (cm)	Tonalidade	Preço/m² (R\$)
4	Natural	28,80
6	Natural	39,10
8	Natural	46,65
4	Colorido	38,50
6	Colorido	48,00
8	Colorido	56,30

Analisando a Tabela 5.7 e o valor final de venda do adoquim, devemos utilizar o PPC de 4cm de espessura colorido para comparação, devido a coloração natural diferenciada do adoquim. Verifica-se que é possível produzir o adoquim usando as formulações **M** e **AFO**, já que o valor final de venda dessas duas formulações gira em torno de R\$ 32,10, e o **PPC** colorido de 4cm custa R\$ 38,50, 16,62% mais caro do que o adoquim. A diferença de R\$ 6,40/m² no preço final de venda é relevante na hora da escolha do pavimento. Vale ressaltar ainda que o adoquim ficou com 1cm a mais de espessura quando comparado ao **PPC** de 4cm.

Ao comparar o adoquim **AFO50A** com o **PPC** de 6cm, observa-se que o **PPC** é vendido em torno de 20,82% acima do preço final de venda do adoquim, isto representa uma diferença de R\$ 10,00 em seu valor de venda. Como o adoquim é um produto novo no mercado a diferença de R\$ 10,00/m² pode-se tornar um atrativo para que o mesmo seja aceito e aprovado pelo mercado consumidor.

Vale lembrar que o adoquim possibilita um melhor conforto térmico e níveis sonoros reduzidos quando comparados a outros tipos de pavimentos. Estes benefícios associados a todos os outros já citados no início desta discussão, podem contribuir para o adoquim ganhar nome no mercado.

O **PPC** usado para comparar ao adoquim possui 1cm a mais de espessura, e portanto, propriedades como resistência mecânica e absorção de água, podem melhorar, caso o adoquim seja produzido com a mesma espessura do **PPC**.

Por fim, vale ressaltar que o adoquim apresentou qualidades quando comparado ao **PPC**, o que mostra o seu grande potencial de uso no mercado brasileiro.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo conclui-se que:

A caracterização das duas argilas revelou que ambas são constituídas, sobretudo, por caulinita, quartzo, mica muscovita e gibisita. Traços de minerais esmectícios também foram identificados. O argilito apresenta como fases cristalinas predominantes a caulinita, quartzo, mica muscovita, mineral micáceo, microclina e feldspatos plagioclásios.

O argilito apresenta um maior teor de fundentes, maior quantidade de sílica livre e menor teor de alumina que as argilas, o que favorece uma maior formação de fase líquida durante a queima.

O argilito apresenta granulometria mais grosseira que as argilas o que melhora o empacotamento e facilita a secagem das cerâmicas por meio da redução de água de plasticidade.

O argilito apresenta uma perda ao fogo significativamente menor que as argilas, o que favorece a redução da retração de queima e também a redução da porosidade.

O grau de empacotamento das partículas influenciou positivamente nas propriedades tecnológicas. As cerâmicas com faixa de variação II de massa específica apresentaram menor retração de queima, menor absorção de água e maior resistência mecânica que as cerâmicas com faixa de variação I de massa específica.

O teste laboratorial indicou que todas as cerâmicas em todas as temperaturas de queima, nas duas faixas de variação de massa específica, podem ser usadas para pavimentação de vias para tráfego de pedestre.

Segundo a norma brasileira para a produção de **PPC**, os resultados de resistência mecânica na faixa de variação **I** indicaram que a cerâmica **AFO50A**, queimada a 850 e 950°C, não alcançou o mínimo de 35MPa, não sendo indicado seu uso em nenhum tipo de via de veículos, sendo indicado somente para vias de pedestres. Já as cerâmicas **M**, **M25A** e **M50A**, queimadas nas três temperaturas e a cerâmica **AFO50A** queimada na temperatura de 1050°C são indicadas para pavimentação de vias de tráfego de veículos leves. A cerâmica **AFO** queimada nas três temperaturas de queima pode ser usada em vias de tráfego de veículos pesados. Na faixa de variação **II** de massa específica todas as cerâmicas nas três temperaturas de queima podem ser usadas para pavimentação de vias de tráfego pesado, com exceção da cerâmica **AFO50A** queimada a 850°C que teve seu uso restrito a pavimentação de vias de tráfego leve.

O teste industrial mostrou que, segundo a norma brasileira, todas as formulações atendem aos requisitos técnicos e, portanto, são indicadas para a produção de adoquim em escala industrial, para vias de tráfego de pedestres. Já segundo as normas americanas e colombianas, apenas a cerâmica **AFO50A** atende os requisitos técnicos e é indicada para pavimentação de vias de tráfego de pedestres em áreas exteriores, as demais composições são indicadas para uso interno.

A análise de ataque químico mostrou que o **PPC** apresentou problema em algumas soluções enquanto os adoquins não sofreram nenhum tipo de alteração.

O teste industrial mostrou que é viável, do ponto de vista econômico, a produção de adoquim para utilização em áreas de circulação de pedestre.

Por fim, os resultados indicaram que o uso de argilito na formulação de massa para a produção de adoquim tem potencial para uso em cerâmica vermelha. O ideal é utilizar na indústria, para ambas as composições, a faixa de variação **II** de massa específica que pode melhorar ainda mais as propriedades tecnológicas.

7. SUGESTÕES

- Realizar teste industrial confeccionando peças com espessuras idênticas às dos **PPCs**.
- Buscar matérias-primas com características fundentes próximas à região de Campos dos Goytacazes.
- Realizar teste industrial com temperatura de queima 1000 e 1050°C.
- Usar no teste industrial massa específica em torno de 2,2g/cm³.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAJO, M. F. **Manual Sobre Fabricación de Baldosas.** Tejas y Ladrillos. Editora. BERALMAR S. A. Espanha, 2000, pp. 125.

ABC ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Cerâmica no Brasil- número do setor.** Disponível em: <<http://www.abeceram.org.br>>. Acesso em: 21 de agosto de 2010.

ABC ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Informações diversas.** Disponível em: <<http://www.abceram.org.br>>. Acesso em: 10 de maio de 2008.

ABNT NBR 7180 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação de limites de plasticidade: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1984c.

ABNT NBR 6454. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação do limite de liquidez: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1984.

ABNT NBR 6508. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.

ABNT NBR 13.818 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placas Cerâmicas para Revestimento – especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 1997.

ABNT NBR 9780 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Peças de Concreto para Pavimentação: “Determinação da Resistência à Compressão.** Rio de Janeiro.

ABNT NBR 9781 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Peças de concreto para pavimentação – Especificações.** Rio de Janeiro, 1987.

ABNT NBR 7207 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 7207. **Terminologia e classificação de pavimentação**. Rio de Janeiro. 1992.

ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; HOTZA, D. Effect of marble and granite sludge in clay materials. **Materials Science and Engineering:A**, v. 419, n. 1-2, 2006, p.306–309.

ALEXANDRE, J. **Análise de matéria-prima e composições de massa utilizada em cerâmica vermelha**. 174p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2000.

ALMADA, M. M.; VLCEK, T. F. Pilhas de Homogeneização: uma Nova Visão para Feldspato Cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 4 Jul/Ago, 2000, p. 31–34.

ANDRADE, M. C.; SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; BUOSO, A. **Rochas e minerais par cerâmica de revestimento**. Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações Pág. 559 a 581. Rio de Janeiro, Dezembro, 2005.

ANFALIT – ASSOCIACIÓN NACIONAL DE FABRICANTES DE LADRILLO Y DERIVADOS DE LA ARCILLA. Manual técnico para pavimentos articulados com adoquín de arcilla. Bogotá, 99p. 2007.

ANICER – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS CERÂMICAS. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br>>. Acesso em: 21 janeiro, 2007.

Anuário Brasileiro de Cerâmica. Anuário Brasileiro de Cerâmica. . 2003, p. 50-54.

APL-SE – NÚCLEO ESTADUAL DE ARRANJOS PRODUTIVOS LOCAIS. **Plano de desenvolvimento do arranjo produtivo de cerâmica vermelha sergipana**. Aracajú, dezembro, 2008, 32p.

ASTM C1272 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Heavy Vehicular Paving Brick**. 2006.

ASTM C902 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Pedestrian and Light Traffic Paving Brick**. 2006.

ASTM C373-72 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Test method for water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired whiteware products**. 1977a.

ASTM C674-77 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Flexural properties of ceramic whiteware Materials**. 1977b.

ASTM C373-72 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Test method for water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired whiteware products**. 1977a.

ASTM C373-72 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Test method for water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired whiteware products**. 1977a.

BARBA, A.; BELTRAN, V.; FELIU, C.; GARCIA, J.; GINES, F.; SANCHEZ, E.; SANZ, V. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerâmicas**. Instituto de Tecnologia Ceramica- AICE, Faenza, 1997.

BARROSO, J. A. **Evolução da Planície Costeira do Rio Paraíba do Sul**. Seminário proferido no LCENG /CCT/UENF. Campos dos Goytacazes, 1997.

BELTRÁN, V. Extruded rustic floor tile, II: Impact of the composition on the body's behaviour during firing and fired product characteristics. **Tile e Brick Int.**, v. 12, n. 4, 1996, p. 320–325.

BIA – BRICK INDUSTRY ASSOCIATION. **Technical Notes 29 - Brick in Landscape Architecture - Pedestrian Applications**. July 1994

BLACKBURN, S.; LAWSON, T. A. Mullite – Alumina composites by extrusion. **Journal of the American Ceramic Society**. V. 75, n. 4, 1992, p.953–957.

BRAGANÇA, S. R.; LENGLER, H. C. M.; BERGMAN, C. P. **Análise da reação sílicafeldspato e sua influência nas propriedades de material cerâmico**. In: Anais do 45º Congresso de Cerâmica Vermelha. Junho, Florianópolis, 2001.

BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica Industrial**, v. 5, nº 3, mai/jun, 2000, p. 31–36.

CANNON, S. B.; WYNN, A. M. A new method for establishing the upper and lower limits of clay plastic behaviour. **Interceram**, v. 48, nº 1, 1999, p. 9–15.

CONORSA, 2008. Disponível em < <http://www.conorsa.es>>. Acesso em: dez. 2008.

CORREIA, S. L. **Desenvolvimento de Metodologia de Formulação de Massas Cerâmicas Triaxiais Utilizando Delineamento de Misturas e Otimização**. 140f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CRUZ, L. O. M. (2003) **Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento**. 281p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DIM 18503. **Clinker bricks for paving – Requirements and test methods**, 2003.

EMILIANI, G. P.; CORBARA, F. **Tecnología Cerámica – La Lavorazione**. Gruppo Editoriale Faenza Editrice, Castellon, 1999.

FERREIRA, C. E. O. **Mapeamento e Qualificação das Coberturas inconsolidadas Aplicados ao Planejamento territorial na Escala 1:25.000 Folha de Macaé, Estado do Rio de Janeiro**. 64p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

FERRO, J. E. M. **Proposta de ambiente virtual colaborativo/cooperativo para atualização e capacitação de designers no desenvolvimento de novos produtos para o setor de revestimentos cerâmicos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. 192p. Florianópolis, 2003.

FUNTAC - Fundação de Tecnologia do Estado do Acre; IEL - Instituto Evaldo Lodi/ Núcleo Regional. Diagnóstico das Indústrias Cerâmicas de Rio Branco. **Relatório Técnico**. Rio Branco, AC, 1990.

GARI GUIU, J. M. Almacenes homogeneizadores o pudrideros. Automatización com draga (I). **Técnica Cerámica**, n. 205, 1992, p. 484–492.

GOUVEIA, F. P. **Efeito da incorporação de chamote (resíduo cerâmico queimado) em massas cerâmicas para a fabricação de blocos de vedação para o distrito federal – DF. Um estudo experimental**. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília. 111p. Brasília, 2008.

GRIM, R. E. The clay mineral concept. *Ceramic Bulletin*. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 9, n. 44, 1965, p. 687–692.

IBGE INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA IBGE. 2007. Contagem populacional em 2007; acesso em: fevereiro de 2009, (<http://www.ibge.com.br/cidadesat/topwindow.htm?1>)

KILIKOGLU, V.; VERNIS, G. Toughening of ceramic earthenwares by quartz inclusions: an ancient art revisited. **Acta Metall. Máster**, v. 43, n. 8, 1995, p. 2959.

LAMEGO, A. R. **O Homem e o Brejo**. 2º ed., Editora Lidador Ltda, Rio de Janeiro, p 230, 1974.

LAMEGO, A. R. **Ciclo evolutivo das lagoas fluminenses**. Departamento Nacional de Produção Mineral, 480 p. (Boletim 118), 1945.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. Geologia Geral. 13 ed. rev. São Paulo: Companhia Editorial Nacional, 399p. 1998.

MÁS, E. **Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha**. Editora Pólo Produções Ltda, São Paulo. (Apostilas), 2002.

MALPESA – Cerâmica Malpesa SA. **Adoquín cerâmico catálogo 08/09**. 52p. 2008.

MALPESA – Cerâmica Malpesa SA. **Adoquín klinker cerâmico**. 56p. 2006.

MALPESA GUERREIRO, J. **El ladrillo cara vista y el adoquín cerâmico**. Cerâmica Malpesa AS, 3º edição, 2003.

MANFREDINI & SCHIANCHI do Brasil LTDA. Contribuição da preparação de massa a seco no desenvolvimento de novas tecnologias na indústria de cerâmica estrutural. **Cerâmica Industrial**, v.7, n. 6, nov/dez de 2002.

MARQUES, G. L. de O. **Terminologia e Classificação dos Pavimentos**. Curso Básico Intensivo de Pavimentação Urbana – Módulo I. Juiz de Fora – MG, 2002.

MARSIGLI, M.; DONDI, M. Plasticità delle argille italiane per laterizi e previsione del loro comportamento in foggatura. **L'Industria dei Laterizi**. V. 46, 1997, p.214–222.

MONIZ, A. C; JACKSON, M. L. Quantitative mineralogical analysis of Brazil soils derived from basic rocks and slates. **Wisconsin Soil Science Report**. v. 212, 1973.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Effect of oily waste addition to clay ceramic. **Ceramics International**, n° 30, 2005, p.353–358.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brasil. **Applied Clay Science**, v. 24, 2004, pp. 229–234.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F.; CARVALHO, E. A. Technological behavior of red ceramics incorporated with brick waste. **Revista Matéria**, v. 10, n° 4, 2005, p. 537–542.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR, M. As Matérias-Primas Plásticas para a Cerâmica Tradicional: Argilas e Caulins. **Cerâmica Industrial**, v.9, n. 2, 2004, p. 33–46.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR, M. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. **Cerâmica Industrial**. v. 6, n°2, 2001.

MOTTA, J. F. M.; CABRAL JUNIOR, M.; TANNO, L. C. Panorama das matérias-primas utilizadas na indústria de revestimento cerâmico: Desafios ao setor produtivo. **Cerâmica Industrial**, v. 3, n. 4-6, 1998, p. 30–38.

MÜLLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 256p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NASCIMENTO, R. R. **Utilização de argila calcinada em pavimentação; uma alternativa para o estado do Acre**. 185p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NAVARRO, J. E. E.; ALBRO, J. L. A. Matérias-Primas para la fabricación de pavimentos y revestimientos cerâmicos. **Técnica Cerâmica**. 91, 1981, p. 119–130.

NTC 3829 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. **Adoquín de arcilla para tránsito peatonal e vehicular liviano**, 2002.

NTC 5282 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. **Adoquín de arcilla para tránsito peatonal e vehicular pesado**, 2002.

PEÇANHA JUNIOR, L. A. F. **Formulação de massa cerâmica para telhas do município de Campos dos Goytacazes**. 124p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2006.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária. Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis**. COPIART, Rio de Janeiro – RJ, 2002.

PINTO, N. B. **Tecnologia cerâmica aplicada a produção de pisos e azulejos**. Centro de Instrução Profissional Octávia Gaidzinski. 1999.

PINHEIRO, R. M.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização de matérias-primas para fabricação de adoquim. **Anais**: 54^o Congresso Brasileiro de Cerâmica. Foz do Iguaçu, Paraná, 2010.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 1/2, 1997, p. 31–35.

PREGO, A. S. S. **A Memória da Pavimentação no Brasil. Relatos Históricos, Recordações e Depoimentos**. ABPV, Rio de Janeiro, 2001.

RESTREPO, J. J.; DINGER, D. R. Controle da deformação pirolástica em massas de porcelanas triaxiais usando a análise dilatométrica. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 4, 2003, p.37–48.

RIBEIRO, M. J.; FERREIRA, A. A. L.; LABRINCHA, J. A. Aspectos fundamentais sobre extrusão de massas de cerâmicas vermelhas. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 1, jan/fev, 2003, p.37–42.

RIBEIRO, M. M. **Material particulado de planta de sinterização de usina siderúrgica integrada em composição de massa de cerâmica vermelha**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual do Norte Fluminense. 145 p. Campos dos Goytacazes, 2010.

RIELLA, H. G.; FRANJNDLICH, E. U. de C.; DURAZZO, M. Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 3, mai/jun, 2002, p. 33–36.

RODRIGUEZ, A. M.; PIANARO, S. A.; BERG, E. A. T.; SANTOS, A. H. Propriedades de matérias-primas selecionadas para a produção de grés porcelanato. **Cerâmica Industrial**, v. 9, n.1, jan/fev, 2004, p. 33–38.

SABEDOT, S.; VOLKMANN, A. R.; SAMPAIO, C. H. Estudos de rotas de beneficiamento da nefelina-sienito para aplicação como fundente na massa cerâmica do porcelanato. In: 60 Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005, Belo Horizonte. **Anais** do 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. v. único. p. 2926—2936.

SAEZ, R. G. **Manual para el uso del adoquín cerámico**. Madrid, 102p. 2004

SÁNCHEZ, E.; GARCIA, J.; SANZ, V.; OCHANDIO, E. Raw material selection criateria for the production of floor end wall tiles. **Tile & Brick Int.**, v. 6, n. 4, 1990, p. 15–21.

SANTOS, A. C. P. **Queima de cerâmica vermelha em fornos a gás resistivo**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2003.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de Argilas: aplicada às argilas brasileiras**. São Paulo, Editora Edgard Blucher, v. 2, 1975.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia das Argilas**. 2 ed. São Paulo, Editora Edgard Blucher. v. 01, 1989, 408p.

SHACKEL, B. **Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavements**. First Edition and Reprinted 1991, Elsevier, New York and London, 1990.

SILVEIRA, G. C. L.; SILVA, D. **Caracterização Físico-Química de Argilas para Aplicação de Cerâmica Estrutural**. In: 14º Congresso Brasileiro de Ciências de Materiais, São Pedro, 2000.

SOARES, J. M. D. *et al.* Panorama Sócio-Econômico das Indústrias de Cerâmica Vermelha da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, **Cerâmica Industrial**, Mai/Jun, 2004.

SÓRIA, M. H. A. **Notas de Aulas – Projeto de Pavimentos**. EESC/USP, São Carlos, SP, 1997.

SOUSA, S. J. G.; HOLANDA, J. N. F. Development of red wall tile bodies produced by dry process with Brazilian raw materials. **Ceramics International**, Reino Unido, v. 31, nº. 2, 2005. p.215–222,.

UNE – ES 1344. **Adoquines de arcilla cocida. Especificaciones y métodos de ensayo**. 2002.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. Tradução: Luiz Paulo Camargo Ferrão. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

VERDUCH, A. G. Características de las arcillas empleadas en la fabricación de ladrillos. **Tecnica Ceramica**, nº 232, 1995, p. 214–228.

VICENZI, J.; BERGMANN, C. P. Adição de chamota em uma massa cerâmica à base de argila vermelha: Efeito na secagem pré-queima. **Cerâmica Industrial**, v. 14, nº 2, Mar/Abr, 2009. p.16–21.

VIEIRA, C. M. F. **Caracterização das Argilas de Campos dos Goytacazes visando à fabricação de revestimento cerâmico semiporoso**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual do Norte Fluminense. 124 p. Campos dos Goytacazes, 2001.

VIEIRA, C. M. F., EMILIANO. J. V. Incorporação de rocha sedimentar em pó em massas para telhas cerâmicas: efeitos nas propriedades físicas e mecânicas. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro – SP, 2005. **Anais**: 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, p.15, 2005.

VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S.N. Avaliação da Secagem de Cerâmica Vermelha através da Curva de Bigot, **Cerâmica Industrial**, Jan/Fev, 2003.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F.; PINATTI, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ. **Cerâmica**, v. 46 nº 297, Jan./Feb./Mar, 2000.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. **Effect of the particle size of the grog on the properties of bricks**. In: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2009, 249–254.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Effect of grog addition on the properties and microstructure of a red ceramic body for brick production. **Construction and Building Materials**, v. 21, 2007, p. 1754–1759.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Microstructure evolution in kaolinit clay as a function of firing temperature. **Interceram**. v. 54, 2005, p. 268–271.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; DUALIBI FILHO, J. Formulação de massa de revestimento cerâmico com argilas plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e taguá (SP). **Cerâmica Industrial**, v. 6, n° 6, Nov/Dez, 2001, p. 43–49.

VIEIRA, C. M. F.; SALES, H. F.; MONTEIRO, S. N. Efeito da Adição de Argila Fundente Ilítica em Cerâmica Vermelha de Argilas Cauliníticas. **Cerâmica**, 50, 2004, p. 239–246.

VIEIRA, C. M. F.; SOUZA, E. T. A.; MONTEIRO, S. N. Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, n° 50, 2004, p. 254–260.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, T. M.; MONTEIRO, S. N. Massas cerâmicas para telha: características e comportamento de queima. **Cerâmica**, n° 49, 2003, p. 245–250.

VIEIRA, C. M. F.; TEIXEIRA, S. S.; MONTEIRO, S. N. Efeito da temperatura de queima nas propriedades de cerâmica vermelha incorporada com chamote. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro – SP, 2005. **Anais**: 49° Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2005. p.12.

Winkler, H. Bedeutung der Korngrößen-Verteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse. **Berichte Deutsche Keramische Gesellschaft**, 31/10, 1954, p. 337-343.

ZAUBERAS, R. T.; RIELLA, H. G. Defeitos da queima causados pelo quartzo em monoporosas. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, 2001, p. 41–43.