

**“UTILIZAÇÃO DE ARGILITO E CHAMOTE DE BLOCOS
DE VEDAÇÃO NA COMPOSIÇÃO DE MASSA DE
PAVIMENTO INTERTRAVADO CERÂMICO - ADOQUIM”**

VERÔNICA SCARPINI CANDIDO

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JANEIRO - 2012**

“UTILIZAÇÃO DE ARGILITO E CHAMOTE DE BLOCOS DE VEDAÇÃO NA COMPOSIÇÃO DE MASSA DE PAVIMENTO INTERTRAVADO CERÂMICO - ADOQUIM”

VERÔNICA SCARPINI CANDIDO

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

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Maurício Fontes Vieira

Orientador: Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JANEIRO– 2012**

“UTILIZAÇÃO DE ARGILITO E CHAMOTE DE BLOCOS DE VEDAÇÃO NA COMPOSIÇÃO DE MASSA DE PAVIMENTO INTERTRAVADO CERÂMICO - ADOQUIM”

VERÔNICA SCARPINI CANDIDO

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

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Aprovada em 26 de agosto de 2012

Comissão Examinadora:

Prof. Gustavo de Castro Xavier (D. Sc., Engenharia Civil) – UENF

Prof. Sergio Neves Monteiro (Ph.D., Eng. e Ciências dos Materiais) – UENF

Jamil Duailibi Filho (D. SC., Engenharia Metalúrgica) - INT

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Terezinha e ao meu pai João.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que é o autor de todas as coisas, me deu a vida e que me permitiu chegar até aqui.

Aos meus pais e minha Irmã que sempre estiveram do meu lado me apoiando e dando força para que meus sonhos se realizassem. Muito obrigada!

Ao meu namorado Humberto por sempre acreditar na minha capacidade, pelas palavras de incentivo, pelo companheirismo incondicional, paciência, carinho e dedicação.

Ao Professor Carlos Maurício pela oportunidade de fazer o mestrado.

Ao Professor Sérgio Neves pelas palavras de apoio e incentivo sempre.

Aos professores Eduardo Atem, e Gustavo Xavier e Jonas Alexandre pelos ensinamentos, incentivo e apoio.

Ao Felipe Perissé e ao Leonardo Gama, pelos finais de semana e feriados de muito estudo e paciência comigo. Muito obrigada, vocês contribuíram muito para minha formação!!!

Às amigas de laboratório pela companhia, muitos risos e desabafos.

À Regina que muito me ajudou e contribuiu para os experimentos e, além disso, por sempre ser uma grande amiga.

À Luiza por ser sempre tão amiga, ter sempre palavras de conforto e ter acreditado em mim desde o início.

Ao Rômulo técnico do laboratório.

Ao setor de transporte em especial a Fernanda e aos motoristas que foram sempre muito solícitos quando precisei.

Ao laboratório de imagens da COPPE/UFRJ pela realização das análises com MEV.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral	4
2.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 3 - JUSTIFICATIVAS	5
CAPÍTULO 4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1. A indústria de cerâmica vermelha	6
4.1.1. Pólo cerâmico da região Norte Fluminense	8
4.2. Materiais cerâmicos	9
4.2.1. Argilas	10
4.2.2. Constituição das argilas.....	10
4.2.3. Argilas de Campos dos Goytacazes	11
4.2.4. Argilito	11
4.3. Pavimentos.....	13
4.3.1. Pavimentos intertravado.....	13
4.3.1.1. Peças pré-moldadas de concreto - PPC	14
4.3.1.2. Adoquim cerâmico.....	15
4.4. Legislação e Aplicações tecnológicas	17
4.5. Resíduos	20
4.5.1. Resíduos sólidos	21
4.5.2. Classificação dos resíduos.....	21
4.6. Relevância da incorporação de resíduos na indústria de cerâmica vermelha.....	24
4.7. Chamote.....	26
CAPÍTULO 5 - MATERIAIS E MÉTODOS	48
5.1. Materiais utilizados	48
5.2. Metodologias empregadas	59

5.2.1. Beneficiamento das matérias-primas	50
5.2.2. Caracterização das materias-primas	50
5.2.2.1. Difração de raios-X.....	50
5.2.2.2. Análises térmicas	50
5.2.2.3. Composição química	51
5.2.2.4. Distribuição de tamanho de partículas	51
5.2.2.5. Microscopia óptica.....	51
5.2.2.6. Microscopia eletrônica de varredura	52
5.2.3 Preparação das composições	52
5.2.4. Plasticidade	53
5.2.5. Preparação dos corpos de prova	54
5.2.6. Determinação das propriedades físicas e mecânicas	54
5.2.6.1. Ensaio físicos e mecânicos.....	55
5.2.6. 1.1. Massa específica aparente.....	55
5.2.6.1.2. Retração diametral de queima	55
5.2.6.1.3. Absorção de água	56
5.2.6.1.4. Resistência à compressão uniaxial	56
5.2.7. Avaliação microestrutural	57
5.2.7. 1. Microscopia ótica.....	57
5.2.7.2. Microscopia eletrônica de varredura	57
5.2.7.3.Difração de raios - X.....	57
CAPÍTULO 6 - RESULTDOS E DISCUSSÃO	58
6.1. Caracterização das matérias-primas.....	58
6.1.1. Caracterização mineralógica	58
6.1.2. Caracterização química.....	67
6.1.3. Caracterização física	69
6.1.4. Caracterização morfológica.....	72
6.2. Propriedades físicas e mecânicas.....	78
6.2.1. Plasticidade	78
6.2.2. Massa específica aparente das peças secas e queimadas.....	81
6.2.3. Absorção de água	82

6.2.4. Retração diametral de queima	86
6.2.5. Resistência à compressão uniaxial	89
6.3. Microestrutura das cerâmicas queimadas	93
6.3.1. Microscopia ótica.....	93
6.3.2. Microscopia eletrônica de varredura	98
6.3.3. Difração de raios - X.....	109
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES.....	115
CAPÍTULO 8 - SUGESTÕES.....	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Pavimento cerâmico, adoquim, extrudado de formato retangular. Dimensões: 200 x 100 x 50 mm. Peso, 2,25 kg, Ensaio físicos e mecânicos	14
Figura 4.2. Exemplos de aplicações de pavimentos cerâmicos extrudados – adoquim	15
Figura 4.3. Metodologia empregada para a classificação dos resíduos sólidos.....	22
Figura 4.4. Diagrama de Winkler com a localização das matérias-primas e da massa com adição de até 20% em peso de chamote	29
Figura 4.5. Curva de Bigot para as composições analisadas	30
Figura 4.6. Propriedade de queima em função do teor de chamote das composições analisadas	31
Figura 4.7. Micrografia obtida por MEV do chamote	32
Figura 4.8. Perda de massa após secagem ao ar das massas com e sem chamote em função da granulometria do tamanho médio de partículas do chamote	34
Figura 4.9. Perda de massa após secagem em estufa das massas com e sem chamote em função da granulometria do tamanho médio de partículas do chamote	35
Figura 4.10. Resistência mecânica após secagem total das formulações com e sem chamote em função da granulometria do tamanho médio de partícula do chamote	36
Figura 4.11. Absorção de água das composições em função da temperatura de queima	40
Figura 4.12. Compressão diametral das composições em função das temperaturas de queima	41
Figura 4.13. Curva de gresificação para os corpos cerâmicos com e sem adição de chamote.....	42
Figura 4.14. Tensão de ruptura a flexão em função da temperatura de queima para os corpos cerâmicos com e sem adição chamote.....	43
Figura 4.15. Tensão de ruptura a flexão em função da temperatura de queima para os corpos cerâmicos com e sem adição chamote.....	48
Figura 5.1. (a) peças sinterizadas encaminhadas à trituração. (b) moinho de martelos.	59

Figura 5.2. Argilito no pátio da cerâmica	51
Figura 5.3. Moinho de porcelana lisa e bolas utilizado para a homogeneização das massas	53
Figura 6.1. Difratoograma de raios-X da argila FO . C = caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita; Es = Minerais esmectícios	58
Figura 6.2. Difratoograma de raios-X da argila FR . C = caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita; Es = Minerais esmectícios	59
Figura 6.3. Difratoogramas de raios-X do argilito. C = caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita; Mm = mineral micáceo; Mi = microclina; F_{PI} = feldspatos plagioclásios	60
Figura 6.4. Difratoogramas de raios-X do chamote. C = caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita; H = Hematita	61
Figura 6.5. Curvas de TG/DTG das argilas	63
Figura 6.6. Curvas de ATD das argilas	63
Figura 6.7. Curvas de TG/DTG do argilito	64
Figura 6.8. Curvas de ATD do argilito	65
Figura 6.9. Curvas de TG/DTG do chamote	66
Figura 6.10. Curvas de ATD do chamote	66
Figura 6.11. Curva de distribuição de tamanho de partículas das argilas FO e FR	70
Figura 6.12. Curva de distribuição de tamanho de partículas do argilito e do chamote	71
Figura 6.13. Diagrama de Winkler para a argila FO , argila FR , argilito e chamote	72
Figura 6.14. Micrografias obtidas por MO da argila FO . (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh	73
Figura 6.15. Micrografias obtidas por MO da argila FR . (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh	74
Figura 6.16. Micrografias obtidas por MO do argilito. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh	75
Figura 6.17. Micrografias obtidas por MO do chamote. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh	76

Figura 6.18. Micrografias obtidas por MEV da argila forte (a), argila fraca (b), argilito (c) e chamote (d)	77
Figura 6.19. Prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg	79
Figura 6.20. Diagrama de Winkler para a argila FO , argila FR , argilito, chamote e composições investigadas.....	80
Figura 6.21. Absorção de água na faixa de variação I de massa específica das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C).....	84
Figura 6.22. Absorção de água na faixa de variação II de massa específica das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C).....	85
Figura 6.23. Retração diametral de queima das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C) na faixa de variação I de massa específica	88
Figura 6.24. Retração diametral de queima das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C) na faixa de variação II de massa específica	88
Figura 6.25. Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950, 1050°C) na faixa de variação I de massa específica	91
Figura 6.26. Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C) na faixa de variação II de massa específica	91
Figura 6.27. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 850°C na faixa de variação I de massa específica. (a) M ; (b) M50A ; (c) 45M50A5CH ; (d) 40M50A10CH . Aumento: 6,5 x.....	94
Figura 6.28. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 1050°C na faixa de variação I de massa específica. (a) M ; (b) M50A ; (c) 45M50A5CH ; (d) 40M50A10CH . Aumento: 6,5 x.....	95
Figura 6.29. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 850°C na faixa de variação II de massa específica. (a) M ; (b) M50A ; (c) 45M50A5CH ; (d) 40M50A10CH . Aumento: 6,5 x.....	96

Figura 6.30. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 1050°C na faixa de variação II de massa específica. (a) M ; (b) M50A ; (c) 45M50A5CH ; (d) 40M50A10CH . Aumento: 6,5 x.....	97
Figura 6.31. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	99
Figura 6.32. Micrografia de MEV da formulação M50A queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	100
Figura 6.33. Micrografia de MEV da formulação 40M50A10CH queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.....	101
Figura 6.34. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 1050°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 600x	103
Figura 6.35. Micrografia de MEV da formulação M50A queimada a 1050°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 600x.....	103
Figura 6.36. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	104
Figura 6.37. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 850°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	105
Figura 6.38. Micrografia de MEV da formulação M50A queimada a 850°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	106
Figura 6.39. Micrografia de MEV da formulação 40M50A10CH queimada a 850°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.....	106

Figura 6.40. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 1050°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	107
Figura 6.41. Micrografia de MEV da formulação M50A queimada a 1050°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.....	108
Figura 6.42. Micrografia de MEV da formulação 40M50A10CH queimada a 1050°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	109
Figura 6.43. Difratoograma de raios-X da formulação M queimada 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo	110
Figura 6.44. Difratoograma de raios-X da formulação M queimada 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; Mu = mulita	111
Figura 6.45. Difratoograma de raios-X da formulação M50A queimada 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; F_{PI} = feldspatos plagioclásios; F_K = feldspatos potássicos	112
Figura 6.46. Difratoograma de raios-X da formulação M50A queimada 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; Mu = mulita; F_{PI} = feldspatos plagioclásios; F_K = feldspatos potássicos.....	112
Figura 6.47. Difratoograma de raios-X da formulação 45M50A10CH queimada 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; F_{PI} = feldspatos plagioclásios; F_K = feldspatos potássicos.....	113
Figura 6.48. Difratoograma de raios-X da formulação 45M50A10CH queimada 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; Mu = mulita, F_{PI} = feldspatos plagioclásios; F_K = feldspatos potássicos	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Composição química de diferentes tipos de argilitos estudado por diversos autores	12
Tabela 4.2. Características técnicas para produção do adoquim cerâmico extrudado e prensado estabelecidas pela UNE-NE-1344/2002	17
Tabela 4.3. Especificações técnicas para adoquins cerâmicos de acordo com as normas americanas (ASTM) e Colombianas (NTC)	18
Tabela 4.4. Especificações técnicas para a produção de PPC segundo a ABNT 97810/1987	19
Tabela 4.5. Composição química do chamote estudado por diversos autores	27
Tabela 4.6. Retração linear das amostras estudadas	37
Tabela 4.7. Absorção de água das amostras estudadas	38
Tabela 4.8. Módulo de ruptura a flexão das amostras estudadas.....	38
Tabela 5.1. Composição em peso das matérias-primas utilizadas. M - massa, argilosa, A - argilito; CH - chamote, FO - argila forte.....	52
Tabela 6.1. Composição química das matérias-primas estudadas (% em peso).....	68
Tabela 6.2. Massa específica aparente dos corpos de prova a seco.....	81
Tabela 6.3. Massa específica aparente dos corpos de prova queimados a 850, 950 e 1050°C	82

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação do argilito e do chamote, um resíduo proveniente da queima de blocos de vedação em baixas temperaturas (menores que 600°C), no processamento, nas propriedades e nas microestruturas da massa argilosa visando à fabricação de adoquim. Foram testadas formulações compostas pela mistura de dois tipos de argila (forte e fraca) com adição de 50% em massa de argilito e 5 e 10% em massa de chamote para a produção de adoquim. As matérias-primas foram submetidas a ensaios de DRX, FRX, ATD/TG, MO, MEV e peneiramento e sedimentação por gravimetria. Os corpos de prova foram prensados uniaxialmente em matriz cilíndrica. As propriedades físicas e tecnológicas determinadas foram: Absorção de água, retração diametral de queima e resistência a compressão uniaxial. A microestrutura das cerâmicas foi avaliada por MO, MEV e DRX. Os resultados indicaram que o argilito e o chamote possuem características favoráveis a incorporação em cerâmica vermelha para a produção do adoquim.

Palavras-chave: adoquim, argila, argilito, chamote, cerâmica vermelha.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the influence of argillite and grog addition, resulting from fired bricks at low temperatures (less than 600 °C), on processing and properties and microstructures of clayey body in order to paver production. Elaborated compositions formed by the mixture of two clays and containing 10% of grog addition and 50% of argillite will be tested for paver production. Cylindrical specimens uniaxially were prepared and fired at 850, 950 and 1050°C. The raw materials were characterized by XDR, XFR, OM, SEM, DTA/TG and sedimentation by gravimetry. Physic and mechanical properties of the ceramic were also determined with the several contents of addition, such as water absorption, diametral shrinkage and mechanical strength.

Key words: paver, clay, argillite, grog, red ceramic.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABELAS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral	4
2.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 3 - JUSTIFICATIVAS	5
CAPÍTULO 4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
4.1. A indústria de cerâmica vermelha	6
4.1.1. Pólo cerâmico da região Norte Fluminense	8
4.2. Materiais cerâmicos	9
4.2.1. Argilas	10
4.2.2. Constituição das argilas.....	10
4.2.3. Argilas de Campos dos Goytacazes	11
4.2.4. Argilito	11
4.3. Pavimentos.....	13
4.3.1. Pavimentos intertravado.....	13
4.3.1.1. Peças pré-moldadas de concreto - PPC	14
4.3.1.2. Adoquin cerâmico.....	15
4.4. Legislação e Aplicações tecnológicas	17
4.5. Resíduos	20
4.5.1. Resíduos sólidos	21
4.5.2. Classificação dos resíduos.....	21
4.6. Relevância da incorporação de resíduos na indústria de cerâmica vermelha.....	24
4.7. Chamote.....	26
4.8. Considerações Ambientais.....	48
CAPÍTULO 5 - MATERIAIS E MÉTODOS	50
5.1. Materiais utilizados	50

5.2. Metodologias empregadas	51
5.2.1. Beneficiamento das matérias-primas	52
5.2.2. Caracterização das materias-primas.....	52
5.2.2.1. Difração de raios-X.....	52
5.2.2.2. Análises térmicas	52
5.2.2.3. Composição química	53
5.2.2.4. Distribuição de tamanho de partículas	53
5.2.2.5. Microscopia óptica.....	53
5.2.2.6. Microscopia eletrônica de varredura	54
5.2.3 Preparação das composições	54
5.2.4. Plasticidade	55
5.2.5. Preparação dos corpos de prova	56
5.2.6. Determinação das propriedades físicas e mecânicas	56
5.2.6.1. Ensaio físicos e mecânicos.....	57
5.2.6. 1.1. Massa específica aparente.....	57
5.2.6.1.2. Retração diametral de queima	57
5.2.6.1.3. Absorção de água	58
5.2.6.1.4. Resistência à compressão uniaxial	58
5.2.7. Avaliação microestrutural	59
5.2.7. 1. Microscopia óptica.....	57
5.2.7.2. Microscopia eletrônica de varredura	59
5.2.7.3.Difração de raios - X.....	59
CAPÍTULO 6 - RESULTDOS E DISCUSSÃO	60
6.1. Caracterização das matérias-primas.....	60
6.1.1. Caracterização mineralógica	60
6.1.2. Caracterização química.....	69
6.1.3. Caracterização física	71
6.1.4. Caracterização morfológica.....	75
6.2. Propriedades físicas e mecânicas.....	80
6.2.1. Plasticidade	80
6.2.2. Massa específica aparente das peças secas e queimadas.....	83

6.2.3. Absorção de água	84
6.2.4. Retração diametral de queima	88
6.2.5. Resistência à compressão uniaxial	91
6.3. Microestrutura das cerâmicas queimadas	95
6.3.1. Microscopia ótica.....	95
6.3.2. Microscopia eletrônica de varredura	100
6.3.3. Difração de raios - X.....	111
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES.....	117
CAPÍTULO 8 - SUGESTÕES.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Pavimento cerâmico, adoquin, extrudado de formato retangular. Dimensões: 200 x 100 x 50 mm. Peso, 2,25 kg, Ensaio físicos e mecânicos	15
Figura 4.2. Exemplos de aplicações de pavimentos cerâmicos extrudados – adoquin	16
Figura 4.3. Metodologia empregada para a classificação dos resíduos sólidos	23
Figura 4.4. Diagrama de Winkler com a localização das matérias-primas e da massa com adição de até 20% em peso de chamote	30
Figura 4.5. Curva de Bigot para as composições analisadas	31
Figura 4.6. Propriedade de queima em função do teor de chamote das composições analisadas	32
Figura 4.7. Micrografia obtida por MEV do chamote	33
Figura 4.8. Perda de massa após secagem ao ar das massas com e sem chamote em função da granulometria do tamanho médio de partículas do chamote	35
Figura 4.9. Perda de massa após secagem em estufa das massas com e sem chamote em função da granulometria do tamanho médio de partículas do chamote	36
Figura 4.10. Resistência mecânica após secagem total das formulações com e sem chamote em função da granulometria do tamanho médio de partícula do chamote	37
Figura 4.11. Absorção de água das composições em função da temperatura de queima	41
Figura 4.12. Compressão diametral das composições em função das temperaturas de queima	42
Figura 4.13. Curva de gresificação para os corpos cerâmicos com e sem adição de chamote.....	43
Figura 4.14. Tensão de ruptura a flexão em função da temperatura de queima para os corpos cerâmicos com e sem adição chamote.....	44
Figura 4.15. Tensão de ruptura a flexão em função da temperatura de queima para os corpos cerâmicos com e sem adição chamote.....	42
Figura 5.1. (a) peças sinterizadas encaminhadas à trituração. (b) moinho de martelos.	50

Figura 5.2. Argilito no pátio da cerâmica	51
Figura 5.3. Moinho de porcelana lisa e bolas utilizado para a homogeneização das massas	55
Figura 6.1. Difratoograma de raios-X da argila FO . C = caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita; Es = Minerais esmectícios	60
Figura 6.2. Difratoograma de raios-X da argila FR . C = caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita; Es = Minerais esmectícios	61
Figura 6.3. Difratoogramas de raios-X do argilito. C = caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita; Mm = mineral micáceo; Mi = microclina; F_{PI} = feldspatos plagioclásios	62
Figura 6.4. Difratoogramas de raios-X do chamote. C = caulinita; Q = quartzo; M = mica muscovita; H = Hematita	63
Figura 6.5. Curvas de TG/DTG das argilas	65
Figura 6.6. Curvas de ATD das argilas	65
Figura 6.7. Curvas de TG/DTG do argilito	66
Figura 6.8. Curvas de ATD do argilito	67
Figura 6.9. Curvas de TG/DTG do chamote	68
Figura 6.10. Curvas de ATD do chamote	68
Figura 6.11. Curva de distribuição de tamanho de partículas das argilas FO e FR	72
Figura 6.12. Curva de distribuição de tamanho de partículas do argilito e do chamote	73
Figura 6.13. Diagrama de Winkler para a argila FO , argila FR , argilito e chamote.....	74
Figura 6.14. Micrografias obtidas por MO da argila FO . (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.....	75
Figura 6.15. Micrografias obtidas por MO da argila FR . (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.....	76
Figura 6.16. Micrografias obtidas por MO do argilito. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.....	77
Figura 6.17. Micrografias obtidas por MO do chamote. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.....	78

Figura 6.18. Micrografias obtidas por MEV da argila forte (a), argila fraca (b), argilito (c) e chamote (d)	79
Figura 6.19. Prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg	81
Figura 6.20. Diagrama de Winkler para a argila FO , argila FR , argilito, chamote e composições investigadas.....	82
Figura 6.21. Absorção de água na faixa de variação I de massa específica das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C).....	86
Figura 6.22. Absorção de água na faixa de variação II de massa específica das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C).....	87
Figura 6.23. Retração diametral de queima das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C) na faixa de variação I de massa específica	90
Figura 6.24. Retração diametral de queima das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C) na faixa de variação II de massa específica	90
Figura 6.25. Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950, 1050°C) na faixa de variação I de massa específica	93
Figura 6.26. Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C) na faixa de variação II de massa específica	93
Figura 6.27. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 850°C na faixa de variação I de massa específica. (a) M ; (b) M50A ; (c) 45M50A5CH ; (d) 40M50A10CH . Aumento: 6,5 x.....	96
Figura 6.28. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 1050°C na faixa de variação I de massa específica. (a) M ; (b) M50A ; (c) 45M50A5CH ; (d) 40M50A10CH . Aumento: 6,5 x.....	97
Figura 6.29. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 850°C na faixa de variação II de massa específica. (a) M ; (b) M50A ; (c) 45M50A5CH ; (d) 40M50A10CH . Aumento: 6,5 x.....	98

Figura 6.30. Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 1050°C na faixa de variação II de massa específica. (a) M ; (b) M50A ; (c) 45M50A5CH ; (d) 40M50A10CH . Aumento: 6,5 x.....	99
Figura 6.31. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	101
Figura 6.32. Micrografia de MEV da formulação M50A queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	102
Figura 6.33. Micrografia de MEV da formulação 40M50A10CH queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.....	103
Figura 6.34. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 1050°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 600x	104
Figura 6.35. Micrografia de MEV da formulação M50A queimada a 1050°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 600x.....	105
Figura 6.36. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 850°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	106
Figura 6.37. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 850°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	107
Figura 6.38. Micrografia de MEV da formulação M50A queimada a 850°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	108
Figura 6.39. Micrografia de MEV da formulação 40M50A10CH queimada a 850°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.....	108

Figura 6.40. Micrografia de MEV da formulação M queimada a 1050°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	109
Figura 6.41. Micrografia de MEV da formulação M50A queimada a 1050°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.....	110
Figura 6.42. Micrografia de MEV da formulação 40M50A10CH queimada a 1050°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x	111
Figura 6.43. Difratoograma de raios-X da formulação M queimada 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo	112
Figura 6.44. Difratoograma de raios-X da formulação M queimada 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; Mu = mulita	113
Figura 6.45. Difratoograma de raios-X da formulação M50A queimada 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; F_{PI} = feldspatos plagioclásios; F_K = feldspatos potássicos	114
Figura 6.46. Difratoograma de raios-X da formulação M50A queimada 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; Mu = mulita; F_{PI} = feldspatos plagioclásios; F_K = feldspatos potássicos.....	114
Figura 6.47. Difratoograma de raios-X da formulação 45M50A10CH queimada 850°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; F_{PI} = feldspatos plagioclásios; F_K = feldspatos potássicos.....	115
Figura 6.48. Difratoograma de raios-X da formulação 45M50A10CH queimada 1050°C. H = hematita; M = mica muscovita; Q = quartzo; Mu = mulita, F_{PI} = feldspatos plagioclásios; F_K = feldspatos potássicos	116

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Composição química de diferentes tipos de argilitos estudado por diversos autores	12
Tabela 4.2. Características técnicas para produção do adoquin cerâmico extrudado e prensado estabelecidas pela UNE-NE-1344/2002	18
Tabela 4.3. Especificações técnicas para adoquins cerâmicos de acordo com as normas americanas (ASTM) e Colombianas (NTC)	19
Tabela 4.4. Especificações técnicas para a produção de PPC segundo a ABNT 97810/1987	20
Tabela 4.5. Composição química do chamote estudado por diversos autores	28
Tabela 4.6. Retração linear das amostras estudadas	38
Tabela 4.7. Absorção de água das amostras estudadas	39
Tabela 4.8. Módulo de ruptura a flexão das amostras estudadas.....	39
Tabela 5.1. Composição em peso das matérias-primas utilizadas. MA - massa, argilosa, A - argilito; CH - chamote, FO - argila forte.....	54
Tabela 6.1. Composição química das matérias-primas estudadas (% em peso).....	70
Tabela 6.2. Massa específica aparente dos corpos de prova a seco.....	88
Tabela 6.3. Massa específica aparente dos corpos de prova queimados a 850, 950 e 1050°C	84

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação do argilito e do chamote, proveniente da queima de blocos de vedação em baixas temperaturas (menores que 600°C), no processamento, nas propriedades e nas microestruturas da massa argilosa visando à fabricação de adoquin. Foram testadas formulações compostas pela mistura de dois tipos de argila (forte e fraca) com adição de 50% em massa de argilito e 5 e 10% em massa de chamote para a produção de adoquin. As matérias-primas foram submetidas a ensaios de DRX, FRX, ATD/TG, MO, MEV e peneiramento e sedimentação por gravimetria. Os corpos de prova foram prensados uniaxialmente em matriz cilíndrica. As propriedades físicas e tecnológicas determinadas foram: Absorção de água, retração diametral de queima e resistência a compressão uniaxial. A microestrutura das cerâmicas foi avaliada por MO, MEV e DRX. Os resultados indicaram que o argilito e o chamote possuem características favoráveis a incorporação em cerâmica vermelha para a produção do adoquin.

Palavras-chave: adoquin, argila, argilito, chamote, cerâmica vermelha.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the influence of argillite and grog addition, arising from fired bricks at low temperatures (below than 600 °C), on processing, properties and microstructures of clayey body in order to adoquin production. Elaborated compositions formed by the mixture of two clays (strong and weak) containing 5 and 10% of grog addition and 50% of argillite were tested for adoquin production. The raw materials were characterized by XDR, XFR, OM, SEM, DTA/TG and sedimentation by gravimetry. They were prepared uniaxially into a cylindrical array. The physical and technological properties evaluated were: water absorption, diametral shrinkage and mechanical strength. The microstructure of the ceramics was evaluated by OM, SEM and XRD. The results indicated that the argillite and grog have favorable characteristics incorporation in the red clay for the production of adoquin.

Key words: adoquin, argillite, clay, grog, red ceramic.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Com a evolução dos processos industriais e o conseqüente surgimento de inúmeros produtos que rapidamente se tornaram de primeira necessidade, a atividade industrial adquiriu um caráter essencial na atualidade. Embora a sua importância seja indiscutível, a atividade industrial é responsável por gerar uma quantidade elevada de resíduos, com diferenciadas formas e características, sejam eles sólidos líquidos ou gasosos (Dondi *et al.*, 1997).

A indústria de cerâmica vermelha no Brasil tem grande importância no cenário da construção civil devido à expressiva produção nacional de blocos cerâmicos. Além disso, existe um fator cultural indicando que os blocos cerâmicos ainda são de preferência do consumidor na maioria das regiões, mesmo com o surgimento de outros blocos tais como blocos de concreto e concreto celular (Gouveia, 2008).

A cidade Campos dos Goytacazes, localizada no norte do estado do Rio de Janeiro, é um importante pólo cerâmico do estado. A fabricação de cerâmica vermelha nessa região varia significativamente de acordo com a época do ano, sendo também influenciada pelas leis de mercado. Já se chegou a fabricar 135 milhões de peças/mês, mas atualmente a fabricação de cerâmica vermelha situa-se em torno de 70 milhões de peças/mês (Vieira *et al.* 2009).

As argilas utilizadas pelas cerâmicas são tipicamente cauliniticas e apresentam comportamento de queima refratário, que para alguns produtos de elevado valor agregado, não permite alcançar as propriedades requeridas (Vieira *et al.*, 2003). A adição de fundentes e controle da densidade das peças seria uma alternativa para melhorar as propriedades de queima.

O argilito, uma rocha de origem sedimentar, apresenta maior teor de óxidos fundentes e menor perda ao fogo que as argilas da região (Vieira & Emiliano, 2005), sendo uma alternativa para composição de massa cerâmica.

Além do argilito, pode ser adicionado também à massa argilosa o chamote, resíduo oriundo de peças cerâmicas queimadas em baixas temperaturas e submetidas à trituração. Esse resíduo pode reduzir a plasticidade das argilas e

consequentemente pode diminuir a retração de secagem das peças (Vieira *et al.*, 2004).

A produção das cerâmicas de Campos dos Goytacazes está voltada sobretudo para a fabricação de blocos de vedação, que se constitui em um produto de baixo valor agregado. Há ainda uma pequena produção de telhas, pisos extrudados, plaquetas para revestimento, bloco estrutural e tijolo aparente (Vieira *et al.*, 2004).

O piso intertravado cerâmico, adoquim, é um produto inovador e de elevado valor agregado, sendo uma alternativa para diversificar a produção das cerâmicas de Campos dos Goytacazes. Além disso, a fabricação do intertravado de cerâmica é uma possibilidade de introduzir no mercado um novo produto com características desejáveis ao mercado como: coloração natural exuberante, elevada resistência mecânica, fácil manejo, facilidade de aplicação e baixo custo de manutenção (MALPESA, 2006).

Este trabalho faz parte de um projeto de inovação tecnológica em parceria com a cerâmica Stilbe e a Arte Cerâmica Sardinha, financiado pela Faperj. O objetivo deste estudo é desenvolver uma formulação de massa cerâmica composta por dois tipos de argilas, argilito e chamote para a fabricação de um produto inovador e de elevado valor agregado o piso intertravado de cerâmica - adoquim. Além dessa dissertação de mestrado, também está sendo desenvolvida uma tese de doutorado que também objetiva a formulação de massa para fabricação do piso intertravado de cerâmica – adoquim - utilizando dois tipos de argilas e argilito.

CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS

2.1 - Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação do argilito, uma rocha de origem sedimentar, e do chamote, proveniente da queima de blocos de vedação em baixas temperaturas, no processamento, propriedades e microestrutura de massa argilosa visando à fabricação de adoquim.

2.2 - Objetivos específicos

- Determinar as características físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas das matérias-primas;
- Avaliar o efeito da incorporação de chamote e argilito na plasticidade/trabalhabilidade da massa argilosa;
- Avaliar a influência da temperatura de queima nas propriedades e na microestrutura das cerâmicas;
- Determinar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais das cerâmicas queimadas;
- Correlacionar a microestrutura das cerâmicas queimadas com as propriedades físicas e mecânicas obtidas.

3 - JUSTIFICATIVAS

Na região Norte Fluminense há um elevado número de indústrias de cerâmica vermelha e a maioria delas utiliza de métodos empíricos para a produção das peças, tanto blocos de vedação quanto telhas.

Não se observa um estudo prévio para a otimização das peças cerâmicas o que pode dificultar a produção, pois pode haver gasto excessivo de energia e de matéria-prima. Além disso, a produção é pouco diversificada e voltada para peças de menor valor agregado como blocos de vedação; sendo a produção de pisos intertravados - adoquim, pouco difundida.

O adoquim apresenta elevada resistência mecânica, fácil manejo e elevada vida útil e pode ser uma alternativa para a diversificação da produção.

Outro fator que deve ser levado em consideração é que essas indústrias são potenciais poluidoras do ambiente desde a etapa de extração das argilas até a fabricação dos produtos.

Assim, observa-se que existe uma necessidade de valorização dos rejeitos de queima como um subproduto e a dar eles uma destinação final ambientalmente correta. Além disso, observa-se a necessidade de fabricação de um produto inovador e de elevado valor agregado para diversificar a produção das cerâmicas do município de Campos dos Goytacazes.

4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 - A indústria de cerâmica vermelha

Indústria de cerâmica vermelha é a indústria de blocos, tijolos, telhas, tubos, ladrilhos, elementos vazados e outros (Ripoli Filho, 1997). As matérias-primas são constituídas por argilas plásticas (caulinito-ilíticas) cujos componentes principais são os argilominerais (silicatos hidratados de alumínio), matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio (Ripoli Filho, 1997).

A atividade cerâmica tem um 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 (ABC, 2010). Isso permitiu que muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem os níveis de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada (ABC, 2010).

O setor industrial cerâmico é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolantes térmicos (Pinheiro, 2008).

A indústria de cerâmica vermelha constitui um setor de relevante importância nacional, tanto pela quantidade de produtos quanto pelo número de empregos gerados. Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC), o setor de cerâmica vermelha teve um rendimento no ano de 2003 (base 2002) de aproximadamente R\$ 4,2 bilhões, com geração de 214.000 empregos diretos em quase 7.000 unidades produtoras.

Estima-se que existe cerca de 1.639 licenças expedidas para operações de empresas do setor cerâmico em São Paulo (Cabral, 2006). Esse número, mais uma vez, não representa a totalidade das empresas ativas, mas serve como

referência para o dimensionamento qualitativo e o mapeamento dos principais grupos de produtores cerâmicos no estado de São Paulo (Cabral, 2006). Os destaques regionais referem-se principalmente aos municípios de Tambaú, Panorama, Itú, Tatuí e Barra Bonita, seguidos pelos municípios de Vargem Grande do Sul, Ourinhos, Jaboticabal, Campinas e Conchas (Cabral, 2006).

No que se refere ao estado do Rio Janeiro, destaca-se o papel das indústrias cerâmicas localizadas na região de Campos dos Goytacazes, que geram cerca de R\$ 168 milhões por ano, com uma produção estimada de 75 milhões de peças por mês. O Pólo de Campos é o segundo maior produtor de tijolos do Brasil, cuja produção é, basicamente, vendida para os mercados do Sul Fluminense, Grande Rio, Zona da Mata Mineira e Espírito Santo (Ramos *et al*, 2006).

Os principais problemas para a produção do material cerâmico são:

- Não são realizadas análises químicas ou físicas das argilas utilizadas;
- Ausência de mão-de-obra qualificada;
- Defasagem tecnológica;
- Ausência de controle de qualidade o que contribui para a obtenção de produtos com inconstância nas suas propriedades;
- Quando são usados dois ou mais tipos de argila, a mistura é realizada empiricamente sem a determinação das quantias exatas de cada uma;
- Não há controle na moldagem. A argila é colocada próxima a máquina de moldagem sem peneiramento para homogeneização dos grãos. A água é adicionada sem controle rígido de dosagem;
- A secagem das peças é feita na maioria das vezes em galpões cobertos sem paredes, não havendo controle das condições ambientais como vento, umidade e temperatura;
- A queima geralmente é realizada em fornos intermitentes de tijolos, abobadados com pequenas aberturas laterais por onde é feito o fogo. O esquentado é feito com lenha e, para manter o fogo, muitas olarias utilizam casa de arroz o que pode aumentar a emissão de particulados no ambiente;

- Há desperdício de energia (Vieira *et al.*, 2004; Ripoli Filho, 1997, Bustamante & Bressiani, 2000)

4.1.1 – Pólo cerâmico da região Norte Fluminense

A cidade de Campos dos Goytacazes localiza-se no norte do estado do Rio de Janeiro e possui uma população de aproximadamente 460.000 habitantes e área de 4.032 km² (IBGE, 2010). É o maior município do estado e está a aproximadamente 280 Km da capital Rio de Janeiro (Lamego, 1945).

O solo da região do norte fluminense é caracterizado por ser uma planície costeira quaternária formada na desembocadura do rio Paraíba do Sul. Geograficamente, mais da metade do município apresenta-se como uma planície com cerca de 75 km de comprimento, 40 km de largura e 17 m de altitude (Vieira, 2001). É constituída por terraços marinho arenosos de idade pleistocênica (há 120.000 anos) de sedimentos lagunares e fluviais de idade holocênica (há 5.100 anos) (Martins *et al.*, 1984).

No século XVIII, a economia local girava exclusivamente em torno de atividades rurais como a cana-de-açúcar, atividade que perdurou por muito tempo. Com a queda da atividade açucareira, a indústria cerâmica tornou-se uma atividade de destaque, absorvendo mão-de-obra advinda do campo (Souza, 2007).

A indústria de cerâmica vermelha tem papel importante na economia local. Esse pólo congrega, hoje, mais de cem empresas produtoras as quais geram, mensalmente, cerca de noventa milhões peças, entre telhas, tijolos e lajotas, respondendo por aproximadamente três mil empregos diretos (Ramos *et al.*, 2006).

A fabricação de cerâmica vermelha nessa região varia significativamente de acordo com a época do ano, sendo também influenciada pelas leis de mercado. Já se chegou a fabricar 135 milhões de peças/mês, mas atualmente a fabricação de cerâmica vermelha situa-se em torno de 70 milhões de peças/mês (Vieira *et al.*, 2004). A produção está voltada sobretudo para a fabricação de blocos de

vedação, que se constitui em um produto de baixo valor agregado. Há ainda uma pequena produção de telhas, pisos extrudados, plaquetas para revestimento, bloco estrutural e tijolo aparente (Vieira *et al.*, 2004).

4.2 - Materiais cerâmicos

A maioria dos materiais cerâmicos consiste em compostos que são formados entre elementos metálicos e não metálicos, para os quais as ligações interatômicas, ou são totalmente iônicas, ou predominantes iônicas com alguma natureza covalente (Callister, 2002). O termo cerâmica vem da palavra grega “Keramicos”, que significa matéria-prima queimada, indicando que as propriedades desses materiais são normalmente atingidas através de um processamento térmico ou ignição (Callister, 2002).

A associação brasileira de cerâmica (ABC) define que material cerâmico é todo material de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, excetuados os metais e suas ligas, que são utilizáveis geralmente pelo tratamento em temperaturas elevadas.

Para associação americana de cerâmica, a definição mais aceita é: “cerâmicas são materiais inorgânicos, não metálicos, cuja produção e/ou aplicação envolve tratamento térmico. Geralmente são duros, mas frágeis, tem ponto de fusão elevado e são isolantes elétricos”.

Alguns materiais são constituídos exclusivamente por matérias-primas naturais como: argila, caulins, cromita, feldspato, magnesita, quartzitos, talcos e outras. Já outros materiais cerâmicos podem apresentar em sua constituição algumas matérias-primas sintéticas como: carbeto de silício (SiC), coríndon (Al_2O_3), Tintanato de bário ($BaTiO_3$), entre outros (Jordão, 1988).

Materiais cerâmicos, em geral, apresentam elevada resistência ao calor, considerável resistência a oxidação e ao ataque químico, elevada resistência a deformação plástica e alta rigidez mecânica, além de normalmente serem bons isolantes térmicos e elétricos (Silva, 2000). Estes materiais possuem, em geral,

baixa resistência ao impacto, e grande variação da resistência a fratura (Silva, 2000).

4.2.1 - Argilas

Argila pode ser definida como rocha finamente dividida, constituída principalmente por argilominerais, podendo conter minerais que não são considerados argilominerais (calcita, dolomita, gipsita, quartzo, alumina, pirita e outros), bem como matéria orgânica e outras impurezas. Assim uma argila caracteriza-se por: a) ser constituída essencialmente por argilominerais, geralmente cristalinos; b) possuir elevado teor de partículas de diâmetro equivalente a 2 μm ; c) quando pulverizada ou umedecida, torna-se plástica; d) após secagem é relativamente dura e rígida e após queima em uma temperatura elevada (superior a 1000°C), adquire dureza comparável a dos metais; e) possuir capacidade de troca de catiônica (Santos, 1989).

Segundo Vicenzi (1999) argila é o produto da alteração intempérica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. Em seu estado natural, as argilas são constituídas de minerais primários (que se encontram presentes nas rochas e apenas se alteraram na sua composição) e/ou secundários (produzidas pela ação de agentes químicos sobre os minerais primários). Pela sua formação e localização, as argilas podem ser consideradas residuais, formadas *in situ* (que sofreram pouco ou nenhum transporte e contêm uma proporção de minerais primários maiores que as argilas sedimentares) e/ou sedimentares (que foram transportadas e depositadas, encontrando-se poucos minerais associados as rochas, com exceção de quartzo e alguma muscovita).

4.2.2 - Constituição das argilas

Em termos físico-químicos, as argilas são constituídas, sobretudo por argilominerais que são geralmente cristalinos e, quimicamente, são silicatos

hidratados, podendo conter cátions como: alumínio, magnésio, ferro, cálcio, potássio e outros (Silva, 2000).

Esses argilominerálias são geralmente formados por lamelas constituídas por estratos ou lâminas de tetraedros de SiO_4 e octaedros de $\text{Al}(\text{OH})_6$, possuindo cristalinidade variável (ABNT/NBR 6502,1995). Formam-se por alteração de minerais primários das rochas ígneas e metamórficas, como feldspatos, piroxênios e anfibólios, ou são constituintes de rochas sedimentares (ABNT/NBR 6502,1995). Possuem a propriedade de absorver às superfícies de suas partículas quantidades variáveis de água e íons. Os principais grupos de argilominerais são: caulinita, micas hidratadas (ilítas) e esmectitas (montmorilonita) (ABNT/NBR 6502,1995).

4.2.3 - Argilas de Campos dos Goytacazes

As indústrias cerâmicas de Campos dos Goytacazes utilizam a argila da própria região, pois esta demonstra ser bastante propícia à confecção de produtos de cerâmica vermelha/estrutural (Ramos *et al.*, 2006).

Segundo estudos sobre a caracterização dessa matéria-prima, as argilas da região se caracterizam por apresentarem como argilomineral predominante a caulinita. Além disso, apresentam como principais características a elevada perda ao fogo, baixo percentual em peso de óxidos fundentes (K_2O , MgO) e elevado teor de óxido corante (Fe_2O_3) que confere cor de queima avermelhada. Estas argilas apresentam baixo percentual relativo de sílica e elevado percentual relativo de Al_2O_3 , que tende a aumentar a refratariedade da massa (Vieira *et al.*, 2000; Monteiro, 2002; Vieira *et al.*, 2005, Monteiro & Vieira, 2005, Vieira *et al.*, 2007, Monteiro & Vieira, 2009, Vieira & Emiliano, 2005).

4.2.4 – Argilito

O argilito é uma rocha de origem sedimentar (Leinz & Amaral, 1998) compacta, de grãos finos e laminados, contendo feldspato, quartzo, argilominerais e clorita. As laminações são sobretudo compostas por grãos na granulometria dos

siltes, mais clorita intersticial (Luz & Lins, 2005). Na Tabela 4.1 está apresentada a composição química de diferentes tipos de argilito pesquisada por alguns autores.

Tabela 4.1: Composição química de diferentes tipos de argilitos estudado por diversos autores.

Composição química				
	Huang (1962) *	Luz e Lins (2005)	Vieira e Emiliano (2005)	Riker (2008)
SiO₂	60,8	68,74	56,02	50,88
Al₂O₃	16,7	14,27	17,70	27,27
Fe₂O₃	1,4	2,55	9,04	6,27
TiO₂	0,6	0,52	1,05	2,04
K₂O	2,1	4,56	5,77	1,04
Na₂O	4,3	1,45	0,21	0,1
CaO	0,8	1,28	1,11	0,05
MgO	0,77	1,63	4,09	0,22
MnO	3,8	-	-	0,05
FeO	5,8	-	-	-
Outros	3,8	5	6,12	12,08

*Média de três argilitos do pré-cambriano.

O argilito, matéria-prima utilizada nesse trabalho, é um material comumente empregado na fabricação de telhas e blocos cerâmicos na região de Itú – SP (Vieira & Emiliano, 2005). Uma vez que a sua composição química e mineralógica é similar à das argilas da região, este material atua como um inerte durante a secagem e apresenta, durante a queima, comportamento físico-químico similar ao da argila (Vieira & Emiliano, 2005). Essa combinação de materiais com características geológicas distintas, porém propriedades físico-químicas similares,

são as principais responsáveis pela boa reputação que a cerâmica estrutural produzida em Itú ainda goza (Vieira & Emiliano, 2005).

4.3 - Pavimentos

Segundo a ABNT NBR- 7207 (1992) pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplenagem, ou base concretada, e tem como função:

- Resistir os esforços verticais oriundos do tráfego;
- Melhorar condições de rolamento (conforto e segurança);
- Resistir esforços horizontais;
- Resistir ao intemperismo.

De maneira geral, os pavimentos podem ser classificados em pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos.

- **Pavimento flexível:** constituído por camadas que não trabalham à tração, exceção feita ao revestimento que pode ou não suportar esse tipo de esforço. Normalmente são constituídos de revestimento betuminoso delgado sobre camadas puramente granulares. A capacidade de suporte é função das características de distribuição de cargas por um sistema de camadas superpostas, onde as mais resistentes encontram-se na parte superior da estrutura (Sória, 1997).
- **Pavimento rígido:** estrutura cuja placa de revestimento trabalha essencialmente à tração. Seu dimensionamento é baseado nas propriedades resistentes de placas de concreto de cimento Portland, as quais são apoiadas em uma camada de transição, a sub-base (Sória, 1997).

4.3.1 - Pavimentos intertravados

A pavimentação intertravada constitui uma excelente alternativa tanto do ponto de vista técnico como econômico. Trata-se de uma opção intermediária

entre os pavimentos rígido e flexível, somando vantagens de ambos, e descartando as desvantagens de cada um destes (INTERPAVI, 2010).

Esse tipo de pavimentação tem destacando-se, sobretudo, pela sua alta resistência mecânica e pela grande facilidade de execução e manutenção, não exigindo, inclusive, mão-de-obra especializada. Dentre as vantagens que justificam a sua adoção, a pavimentação intertravada também se enquadra perfeitamente dentro dos padrões estéticos atuais (INTERPAVI, 2010).

A pavimentação intertravada surgiu na Europa do pós-guerra, com pavimentos de concreto. No Brasil foi introduzida em meados de 1970. As muitas opções de formatos, padrões, cores e matizes, disponíveis para permitir diversas possibilidades estéticas, asseguram ao pavimento intertravado êxito em praças, parques, jardins, calçadas, estacionamentos, vias urbanas, pátios, depósitos, galpões industriais, estradas, acostamentos, entre outros (Fioriti, 2007).

4.3.1.1 – Peças pré-moldadas de concreto (PPC)

As peças pré-moldadas de concreto (PPC) são pavimentos intertravados utilizados para o revestimento de ruas e estradas, e as principais vantagens são: a rápida execução, a utilização imediata e um custo final menor quando comparado a outras alternativas (IBRACON, 2011). O intertravamento é a capacidade que os blocos adquirem para resistir aos movimentos de deslocamento individual, seja ele vertical, horizontal, de rotação ou de giro em relação a suas peças vizinhas (Fioriti, 2007).

A manutenção da pavimentação com o PPC ao contrário de outros tipos de pavimento não demanda equipamentos dispendiosos e pode ser realizada com uma pequena equipe e ferramentas manuais (IBRACON, 2011).

O PPC tem como característica elevada resistência à compressão, abrasão e agentes agressivos. Além disso, quando comparado, por exemplo, com a pavimentação asfáltica possui maior reflexão da luz artificial, apresentando superfície mais fria e contribui para redução da iluminação pública (Hood, 2006).

Conforme Piorotti (1985), a vida útil do pavimento intertravado de concreto pode ser de até 25 anos, desde que se tenham projetos apropriados para a sub-base, além de blocos de concreto de boa qualidade e que estes estejam muito bem assentados.

4.3.1.2- Adoquim Cerâmico

O pavimento intertravado cerâmico, adoquim apresentado na Figura 4.1, é um produto não decorado cujas principais características são, entre outras, sua coloração natural e aspecto rústico (MALPESA, 2006).



Figura 4.1: Pavimento cerâmico, adoquim, extrudado de formato retangular. Dimensões: 200 x 100 x 50 mm. Peso, 2,25 kg, (MALPESA, 2011).

O adoquim é pequeno e de fácil manejo, com formas geométricas desenvolvidas não só para obter facilidade de instalação, mas também para uma correta distribuição de cargas impostas pelos diversos tipos de tráfego (CONORSA, 2010). Suas geometrias permitem uma diversidade de combinações, proporcionando um ambiente com uma estética harmoniosa (CONORSA, 2010). Os adoquins permitem a pavimentação de estradas para todos os tipos de tráfego, calçadas, zonas de pedestres, pátios e jardins, dentre outros (CONORSA, 2010).

A Figura 4.2 apresenta a aplicação do adoquim.



Figura 4.2: Exemplos de aplicações de pavimentos cerâmicos extrudados – adoquim (MALPESA, 2010).

Esse tipo de produto é fabricado a partir de uma mistura de argilas naturais que proporcionam plasticidade e coloração desejada com materiais não plásticos, normalmente o chamote, oriundos de matérias cerâmicas queimados. Essa mistura pode facilitar a etapa de secagem e conferir padrão estético desejado (Sánchez *et al.*, 1990)

O processo de fabricação tradicional, similar ao da cerâmica vermelha, consiste na moagem por via seca das matérias-primas, conformação por extrusão seguida de uma etapa de secagem das peças, que na maioria das indústrias ocorre ao ar livre. Posteriormente, o adoquim passa pela etapa de queima em fornos contínuos ou descontínuos, cuja duração costuma ser em torno de 24 horas (Beltrán *et al.*, 1995).

O adoquim apresenta algumas vantagens sobre outros tipos de pavimentação, como por exemplo, a pavimentação asfáltica ou com PPC. Uma dessas vantagens é a coloração natural que dispensa o uso de tintas, sua colocação não depende de equipamentos de alto custo e apresenta um tempo de vida útil em torno de 30 anos (MALPESA, 2011). Além disso, durante os processos de restauração, cerca de 90 a 95% das peças são reutilizadas implicando e menor custo de manutenção e conservação (MALPESA, 2011)

4.4 – Legislação e Aplicações Tecnológicas

No Brasil ainda não existe uma legislação que estabeleça os padrões tecnológicos para produção do adoquim cerâmico. Entretanto com a crescente demanda de inovação tecnológica na indústria cerâmica e também com a expansão do produto no mercado, há uma necessidade de criação de normas voltadas para a fabricação deste produto.

Em países como a Espanha, Colômbia e os Estados Unidos a produção do adoquim cerâmico é mais consolidada que no Brasil. Nesses países existem normas como a UNE-NE (Espanha), NTC (Colômbia) e ASTM (Estados Unidos) que visam determinar as especificações tecnológicas para a produção desse tipo de produto.

Todas as normas citadas tendem a seguir o mesmo modelo porém, é importante ressaltar que as condições ambientais e climáticas de cada país são diferentes. O Brasil por ser um país tropical não apresenta variações climáticas tão expressivas como alguns desses países, então algumas normas não se aplicam a produção do adoquim no país. Por esse motivo e também por esse produto apresentar-se como uma alternativa para a pavimentação intertravada, é interessante a elaboração de uma norma técnica brasileira que especifique as características técnicas aceitáveis para sua produção.

A Tabela 4.2 apresenta as características técnicas de acordo com norma da UNE-NE-1344/2002 para a produção do adoquim cerâmico na Espanha. Para a absorção de água e densidade aparente a norma regulamentadora é a DIN 18503/2003. Segundo essa norma a absorção de água não deve ultrapassar 6% e a densidade aparente deve apresentar uma média mínima de 2 kg/dm^3 e valor único mínimo de $1,9 \text{ kg/dm}^3$.

Tabela 4.2: Características técnicas para produção do adoquim cerâmico extrudado e prensado estabelecidas 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

Nos Estados Unidos e na Colômbia as normas da ASTM 1272/2006 e a NTC 5282/2002, respectivamente, estabelecem os requisitos para utilização do adoquim cerâmico para pavimentação de vias com tráfego veicular pesado, calçadas comerciais e aplicações industriais. Já a ASTM C 902/2006 e a NTC 3829/2002 estabelecem o emprego do adoquim cerâmico em locais de tráfego veicular leve, tráfego com baixa, média e alta circulação de pedestres.

A Tabela 4.3 apresenta as especificações tecnológicas da ASTM e NTC para o adoquim cerâmico.

Tabela 4.3: Especificações técnicas para adoquins cerâmicos de acordo com as normas americanas (ASTM) e Colombianas (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	60,7	0,11	1,7
C 902/	SX	8	55,2	-	-
C 902	MX	14	207	-	-
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.

Os tipos R e F significam, respectivamente sistemas de implantação rígidos e flexíveis. SX significa que os pavimentos são indicados para a aplicação em ambientes exteriores submetidos a situações ambientais adversas como congelamento e descongelamento. MX significa que o pavimento é indicado para uso exterior porém, em ambientes não expostos a temperaturas frias, e NX significa que o pavimento é indicado para uso interior.

No que se refere à legislação brasileira, pode-se citar a norma da ABNT 97810/1987 que regulamenta as especificações técnicas para a produção do das peças pré-moldadas de concreto (PPC). A Tabela 4.4 apresenta esses requisitos.

Tabela 4.4: Especificações técnicas para a produção de PPC segundo a ABNT 97810/1987.

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 leves
	2	$\geq 50,0$ Veículos especiais ou cargas que produzem acentuados efeitos de abrasão

O PPC é um produto que já tem uma produção expressiva no Brasil e é o concorrente direto do adoquim cerâmico no mercado. Sendo assim, torna-se necessária a comparação das especificações técnicas entre eles com a finalidade de eliminar as dúvidas a respeito da qualidade do adoquim. Nesse trabalho a norma utilizada como base para a produção do adoquim cerâmico foi a ABNT 97810/1987.

4.5 – Resíduos

A geração de resíduos industriais e urbanos é um dos maiores problemas que a sociedade moderna enfrenta.

Assim, os resíduos industriais se definem como quaisquer materiais sólidos, pastosos ou líquidos, resultantes dos processos industriais de fabricação, transformação, utilização, consumo ou limpeza, cujo produtor ou consumidor destina-o ao abandono (Souza, 2007).

A reciclagem de resíduos industriais vem sendo intensificada em todo o mundo. Na América do Norte e na Europa, a reciclagem é vista, pela iniciativa privada, como um mercado altamente rentável. Na Europa, por exemplo, a Itália, líder em produção, técnicas de fabricação e inovação tecnológica, não só a questão da reciclagem se destaca no setor econômico, como também a questão da prevenção e redução da poluição (Palmonari & Timellini, 2002).

No Brasil com as novas leis de proteção ao ambiente, bem como crescente e progressiva implantação de novas e exigentes diretrizes na gestão de resíduos para as indústrias, na perspectiva de um desenvolvimento sustentável, faz-se necessário desenvolver métodos alternativos e eficazes em substituição ao simples descarte desses em aterros sanitários (Souza, 2007).

4.5.1 - Resíduos sólidos

De acordo com a norma ABNT 10004:2004, resíduo é qualquer material no estado sólido e semi-sólido, que resulta de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Também estão incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, bem como aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. Além disso, determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT 10004:2004).

4.5.2 - Classificação dos resíduos

Os resíduos sólidos são divididos em duas classes de acordo com a norma técnica da ABNT NBR 10004/2004: Classe I – perigosos e Classe II A não perigosos, não inertes e Classe II B não perigosos, inertes.

- **Classe I:** Perigosos

Os resíduos perigosos são aqueles cujo manuseio inadequado pode causar sérios danos à saúde pública e/ou ao ambiente, em virtude de serem inflamáveis, reativos, corrosivos, tóxicos ou patogênicos

- **Classe II:** Não perigosos

- **Classe II A:** não inertes

Os resíduos classificados como Classe II A são aqueles que são biodegradáveis, combustíveis e solúveis em água.

- **Classe II B:** inertes

São classificados como resíduos inertes aqueles que não apresentam atividade, não reagem e são insolúveis em água.

Caso o resíduo não esteja enquadrado em nenhuma das características anteriores, devem ser realizados testes laboratoriais, para avaliar se os mesmos apresentam concentrações de substâncias, que conferem periculosidade ao resíduo.

Para a realização dos ensaios devem ser consultadas as seguintes normas:

- a) **ABNT 10005/2004:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos: estabelece critérios para a realização de ensaios de lixiviação, que consiste na extração de substâncias contidas nos resíduos industriais por meio de percolação.
- b) **ABNT 10006/2004:** Procedimento para extração de extrato solubilizado de resíduos sólidos: estabelece critérios para a realização do ensaio de solubilização, visando solubilizar uma amostra do resíduo, no período de sete dias e avaliar a concentração dos elementos contidos no extrato.
- c) **ABNT 10007/2004:** Amostragem dos resíduos sólidos: estabelece os critérios de amostragem e coleta dos resíduos.

A Figura 4.3 apresenta a metodologia (ABNT/NBR 10004:2004) empregada para a classificação dos resíduos sólidos.

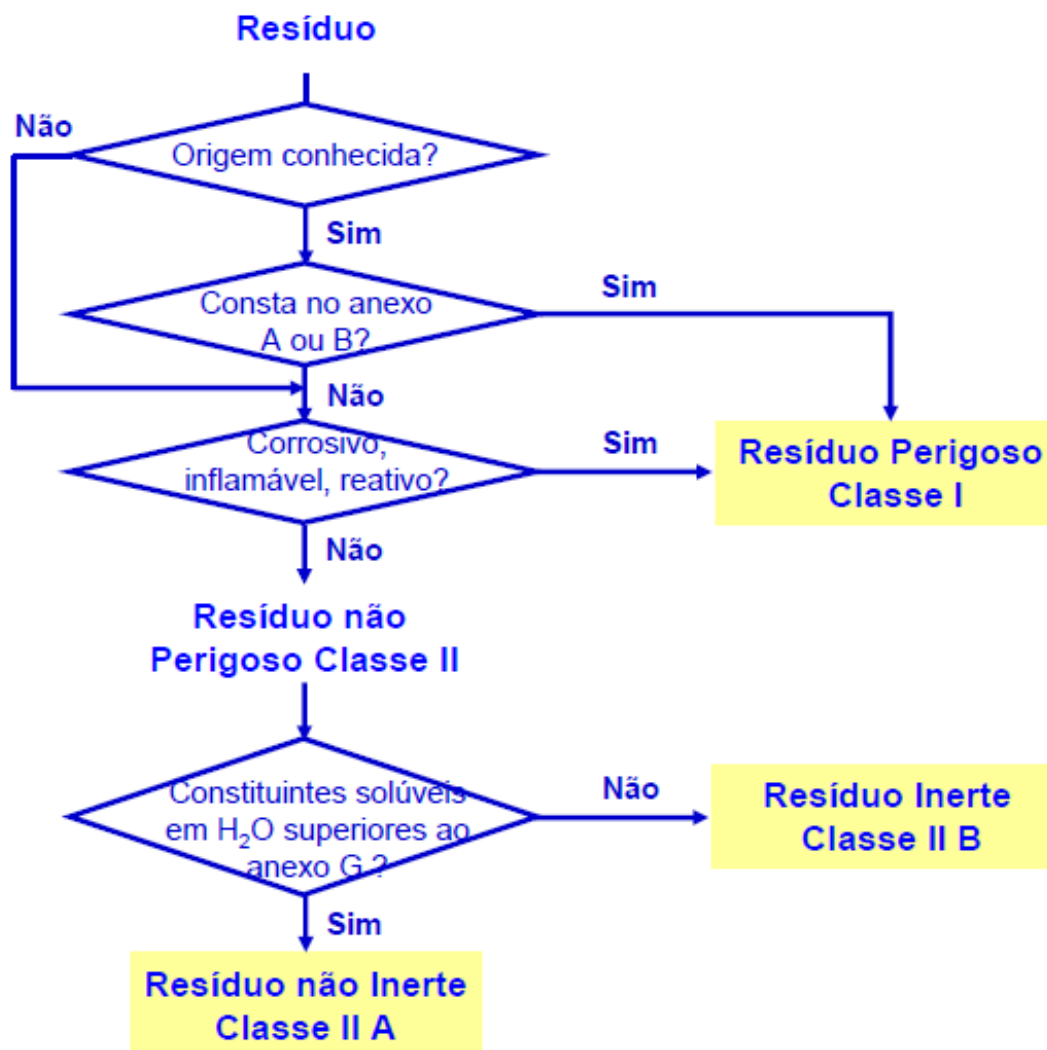


Figura 4.3: Metodologia empregada para a classificação dos resíduos sólidos (ABNT/NBR 10004:2004).

4.6 - Relevância da incorporação de resíduos na indústria de cerâmica vermelha

Os processos industriais geram resíduos que possuem diversas características.

Dondi e colaboradores (1997) estudando a reciclagem de resíduos industriais e urbanos na produção de tijolos, verificaram que devido à composição variada das massas argilosas e de sua plasticidade tornou-se possível a incorporação de diversos tipos de resíduos, com o objetivo de reduzir os rejeitos provenientes de diversificadas atividades.

Através das características dos resíduos oriundos destas atividades, os autores propuseram a seguinte classificação quanto à incorporação às massas cerâmicas:

- Resíduos redutores de plasticidade e plastificantes;
- Resíduos fundentes;
- Resíduos combustíveis;
- Cinzas volantes

Os resíduos redutores de plasticidade e plastificantes são assim denominados pois são materiais que quando adicionados às massas cerâmicas, provocam a redução de sua plasticidade geral (Dondi *et al.*, 1997). Além disso, possuem uma composição silicática (Dondi *et al.*, 1997). A quantidade dos resíduos incorporados as massas cerâmicas podem variar bastante, provocando mudanças nas propriedades mecânicas, retração e absorção de água (Sabrah & Ebied, 1987).

Os resíduos fundentes são aqueles que diminuem o ponto de fusão das massas cerâmicas, podendo representar um ganho energético de combustível para a queima dessas massas (Montano *et al.*, 2001) e também diminuem a porosidade do material. Linhas da esmaltação de revestimentos cerâmicos e rejeitos da indústria mecânica e metalúrgica, tendo uma composição sílica-alumina maior que 50% e com porcentagens variáveis de metais pesados, alcalinos e alcalinos-terrosos, são exemplos desses resíduos (Dondi *et al.*, 1997).

Resíduos combustíveis normalmente possuem uma elevada quantidade de matéria orgânica que, quando queimados, provocam reações exotérmicas com liberação de calor favorecendo uma economia de combustível de até 40%. Além disso, conferem redução da retração e resistência mecânica e aumento da porosidade em agregados leves (Dondi *et al.*, 1997).

As cinzas volantes são resíduos provenientes da queima de produtos com elevado teor de carbono, produzindo matéria inorgânica que não tem propriedades combustíveis (Dondi *et al.* 1997). Como exemplos pode-se citar a incineração de lixo urbano que tem como objetivo: gerar energia e reduzir o volume e a massas desses resíduos, visando a economia de espaço e promover a desinfecção do aterro com a queima da matéria orgânica (Barbieri *et al.*, 2000).

Vieira e Monteiro (2009) ao estudarem diversos tipos de rejeitos industriais apresentaram uma revisão atualizada sobre a incorporação de diferentes tipos de resíduos sólidos em cerâmica vermelha.

De acordo com o estudo, os autores propuseram a seguinte classificação:

- Resíduos combustíveis;
- Resíduos fundentes;
- Resíduos que afetam as propriedades cerâmicas.

Os resíduos combustíveis são aqueles que apresentam alto poder calorífico devido à elevada concentração matéria orgânica. Essa categoria inclui resíduos da indústria de papel, lama de alto forno e resíduos derivados da extração e refino de petróleo (Vieira & Monteiro, 2009).

Os resíduos fundentes são assim denominados, pois apresentam uma quantidade relativamente alta de metais alcalinos e alcalinos terrosos (K_2O e Na_2O) que em reação com a sílica e a alumina promovem a formação de fase líquida aumentando a densificação (Vieira & Monteiro, 2009). Nessa categoria os autores incluem resíduo de serragem de rochas ornamentais, vidro e cinzas.

Vieira e Monteiro (2009) caracterizam os resíduos que afetam as propriedades cerâmicas como aqueles que interferem na resistência mecânica, absorção de água e retração linear. Os autores classificam como resíduos que

afetam as propriedades cerâmicas o chamote, resíduos de mineração, lodo de estação de tratamento de água e cinzas (Vieira & Monteiro, 2009).

O chamote, objeto de estudo desse trabalho, segundo Vieira e Monteiro (2009), pode ser classificado como resíduo que interfere nas propriedades cerâmicas. Segundo Dondi *et al.* (1997) o chamote pode ser classificado como redutor de plasticidade ou plastificante. Esse resíduo ao ser incorporado a massa cerâmica pode diminuir a quantidade de água adicionada a massa e assim reduzir a retração de secagem melhorando a qualidade do produto final.

A produção dos resíduos torna-se preocupante em dois aspectos básicos. O primeiro, social, traduz-se no fato de algumas indústrias lançarem estes resíduos nos recursos hídricos ou dispô-los, ilegalmente, em aterros ou em locais inapropriados. O segundo, inerente ao setor industrial, manifesta-se o comprometimento de espaços úteis, pois esses resíduos são acumulados, na maioria dos casos, nos pátios das próprias fábricas (Silva, 2000).

Dessa forma, os estudos sobre a incorporação de resíduos em matrizes de cerâmica vermelha têm se tornado cada vez mais freqüentes e alvo interesse científico, visto que algumas vantagens são observadas. Além disso, a incorporação de resíduos em cerâmica vermelha pode minimizar os prováveis impactos causados ao ambiente se forem descartados indiscriminadamente no meio.

4.7 - Chamote

O termo chamote se refere ao material cerâmico descartado após a etapa de queima e submetido a um tritamento em moinho de bolas ou de martelos para ser eventualmente reutilizado no próprio processo produtivo como um material não plástico (Vieira *et al.*, 2009).

Esse resíduo por vezes é disposto nas margens de rodovias, áreas de mata, ou mesmo são armazenados no pátio das próprias empresas. Nas indústrias de cerâmica vermelha do município de Campos dos Goytacazes estima-

se que a produção de chamote se aproxime de 900 toneladas/mês (Vieira *et al.*, 2004).

Essa quantidade de resíduo gerada é mais que suficiente para que as indústrias da região que fabricam produtos de elevado valor agregado possam incorporar teores de até 10% em peso de chamote na composição de massa (Vieira *et al.*, 2004).

O chamote comporta-se como um material inerte até a sua temperatura de obtenção, a partir daí começa a reagir com a massa argilosa, base do corpo cerâmico (Vieira *et al.*, 2009). A composição química do chamote depende da argila que o originou. Chamote oriundo de argila caulinitica, por exemplo, apresenta geralmente teores relativamente elevados de Al_2O_3 e baixos teores de óxidos fundentes (Vieira *et al.*, 2004). A composição química de diversos tipos de chamote estudada por alguns autores está representada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Composição química do chamote estudado por diversos autores.

Composição química (% em peso)						
	Gouveia (2008)	Castro (2008)	Melo (2006)	Demir e Orhan (2003)	Vieira <i>et al.</i> (2004)	Melo <i>et al.</i> (2006)
SiO₂	64,06	61,54	52,79	55,91	55,98	52,79
Al₂O₃	17,62	21,00	26,57	16,68	25,36	26,57
Fe₂O₃	10,83	8,52	7,55	8,29	9,57	7,55
TiO₂	1,67	1,48	0,51	-	1,32	0,51
K₂O	1,23	4,12	3,65	2,44	2,24	3,65
Na₂O	0,17	0,52	3,00	1,09	0,64	3,00
CaO	0,61	0,92	1,70	7,20	0,37	1,70
MgO	0,77	0,61	2,94	2,32	0,97	2,94
MnO	0,13	0,02	0,16	-	-	0,16
Outros	-	0,68	0,59	0,96	-	0,59
PF	2,89	0,60	0,54	2,28	3,30	3,30

Vieira e colaboradores (2004) estudaram o efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha. Inicialmente o chamote foi submetido a ensaios de caracterização química, física e mineralógica. Em seguida os autores incorporaram até 20% em peso de chamote oriundo de blocos de vedação queimados a 600°C na massa argilosa. Nesse estudo os autores analisaram as seguintes propriedades tecnológicas: retração linear de secagem e queima, absorção de água e tensão de ruptura à flexão. A microestrutura das composições foi avaliada através de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados obtidos foram:

- O chamote apresenta teores relativamente elevados de Al_2O_3 e baixos de óxidos alcalinos fundentes, K_2O e Na_2O . Esses valores são característicos de argilas caulínicas, argilas essas que originaram o chamote. Além disso, observa-se um elevado teor de óxido de ferro, Fe_2O_3 , que confere uma cor avermelhada ao chamote. O baixo teor de perda ao fogo está associado à eliminação parcial de hidroxila da gibsitá, $\text{Al}(\text{OH})_3$ e da caulinita, $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, fases mineralógicas típicas das argilas locais.
- O chamote apresenta como fase cristalina quartzo, mica muscovita e calunita.
- A granulometria do chamote revelou que o tamanho de partícula médio é de 60 μm , com predominância de partículas com diâmetro variando de 60 a 200 μm .

O diagrama de Winkler, apresentado na Figura 4.4, mostra a localização das matérias-primas e as composições estudadas. Por meio dele os autores observaram que:

- A composição que continha argila pura, **0CH**, localiza-se na área dois, apropriada para a fabricação de telhas. O chamote localiza-se na parte inferior do diagrama apresentando tamanho de partículas superior a 20 μm associadas ao quartzo. A adição de até 20% de chamote à argila, **20CH**, não altera a região de posicionamento indicando que a adição de

chamote pouco altera a trabalhabilidade da massa e ainda se matêm na região apropriada para produção de telhas.

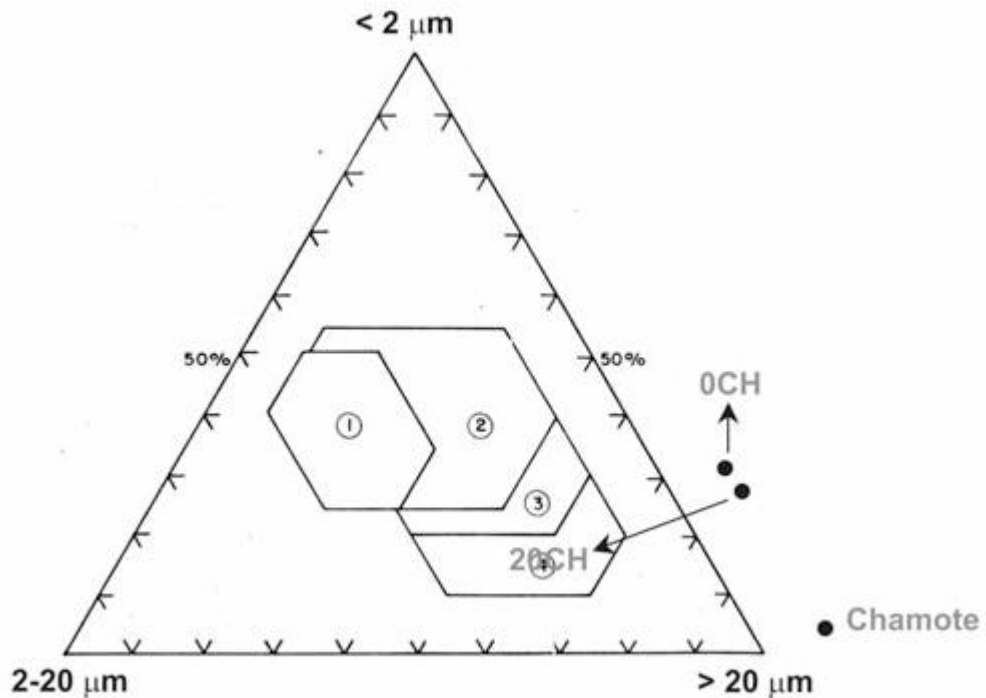


Figura 4.4: Diagrama de Winkler com a localização das matérias-primas e da massa com adição de até 20% em peso de chamote, (Vieira *et al.*, 2004).

Com relação aos parâmetros pré-queima:

- A incorporação de chamote aumentou a densidade a úmido das composições. Esse aumento pode estar associado a densidade do chamote, $2,7 \text{ g/cm}^3$, que é superior a da água. Além disso, a granulometria mais grosseira do chamote pode ter contribuído para melhorar o grau de empacotamento das partículas.
- A incorporação de chamote reduziu a retração linear de secagem, pois houve uma diminuição na quantidade de água de conformação adicionada às composições.
- Os autores observaram também que com o incremento de chamote à massa argilosa houve uma diminuição dos valores de água adicionados.

Isso se deve provavelmente a menor plasticidade do chamote em relação à argila. Além disso, observaram que o chamote diminui a quantidade de água intersticial, devido ao melhor empacotamento das partículas, e a água de plasticidade devido a menor fração argila.

A Figura 4.5 apresenta a curva de Bigot para as composições estudadas.

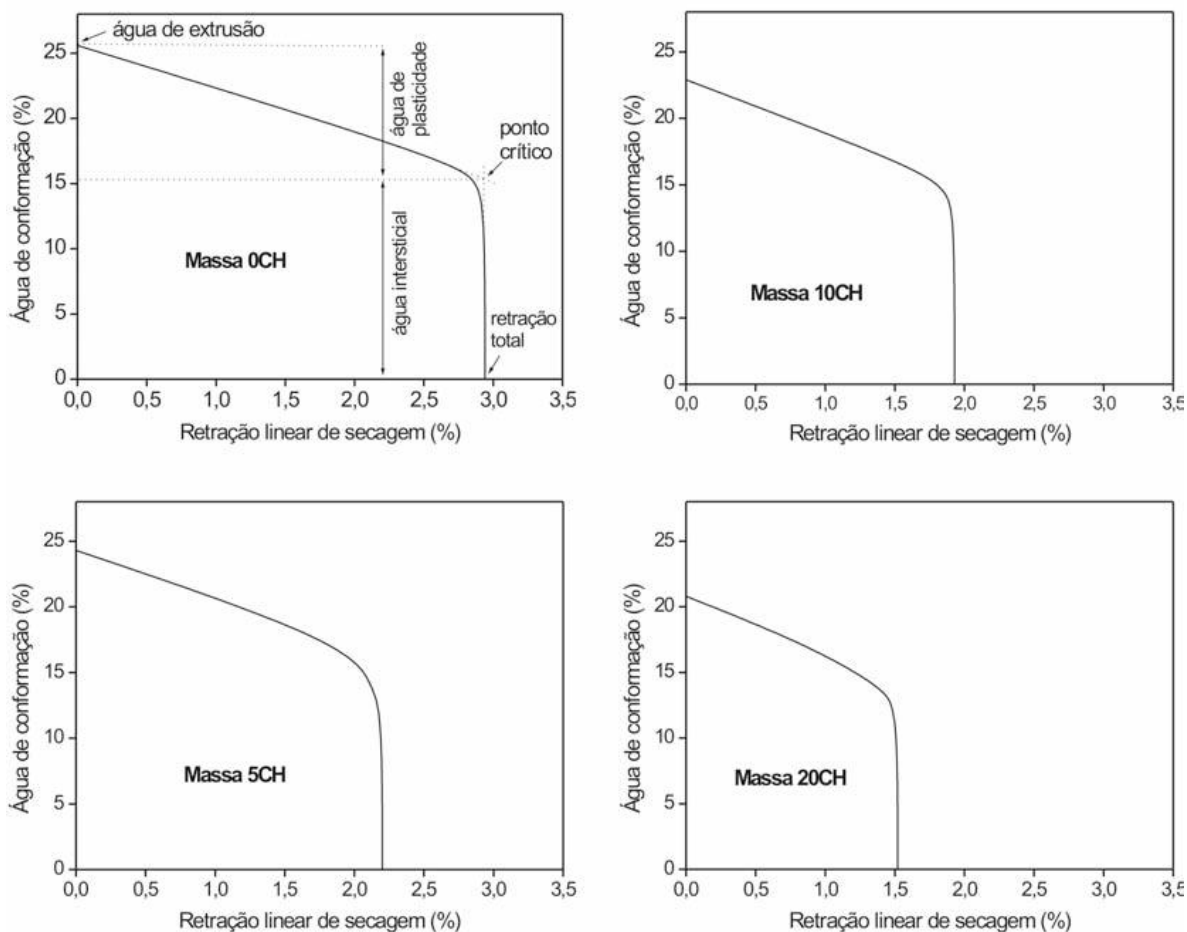


Figura 4.5: Curva de Bigot para as composições analisadas, (Vieira *et al.*, 2004).

Com relação aos parâmetros de queima:

- Dentro de um erro estatístico, a adição de chamote à massa argilosa não alterou significativamente as propriedades de queima (absorção de água, e tensão de ruptura a flexão). Com relação à retração linear observou-se que na composição com 20% em peso de chamote houve

uma tendência de aumento desse parâmetro. Os autores atribuíram esse comportamento as prováveis reações de sinterização que podem ter ocorrido nas amostras.

A Figura 4.6 apresenta as propriedades de queima em função do teor de chamote das composições estudadas.

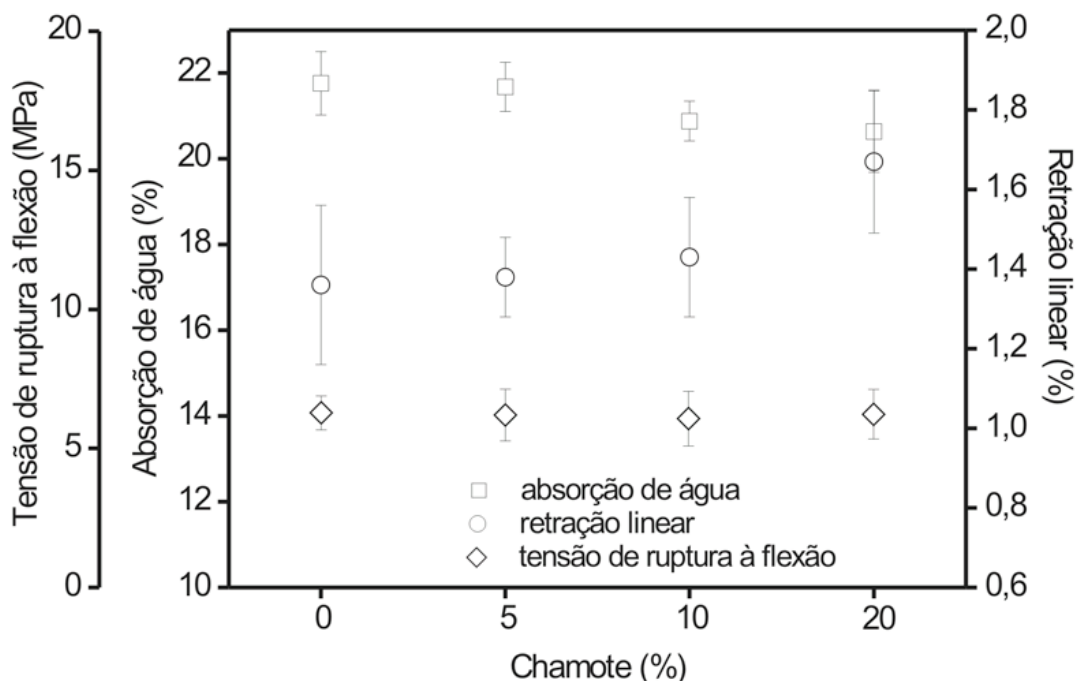


Figura 4.6: Propriedade de queima em função do teor de chamote das composições analisadas, (Vieira *et al.*, 2004).

Com relação à análise microestrutural:

- A análise por MEV revelou que o chamote é um agregado poroso com partículas pseudo-hexagonais, Figura 4.7. Os autores associaram estas partículas ao argilomineral caulinita.
- Tanto a composição com 0% de chamote quanto a composição com 20% de chamote apresentou uma textura rugosa e significativa porosidade. Os autores associaram a porosidade aos prováveis vazios oriundos do empacotamento de partículas, eliminação de gases e vapor

de água, bem como fissuras entre uma matriz amorfa de alumino-silicato e partículas de quartzo de diversos tamanhos.

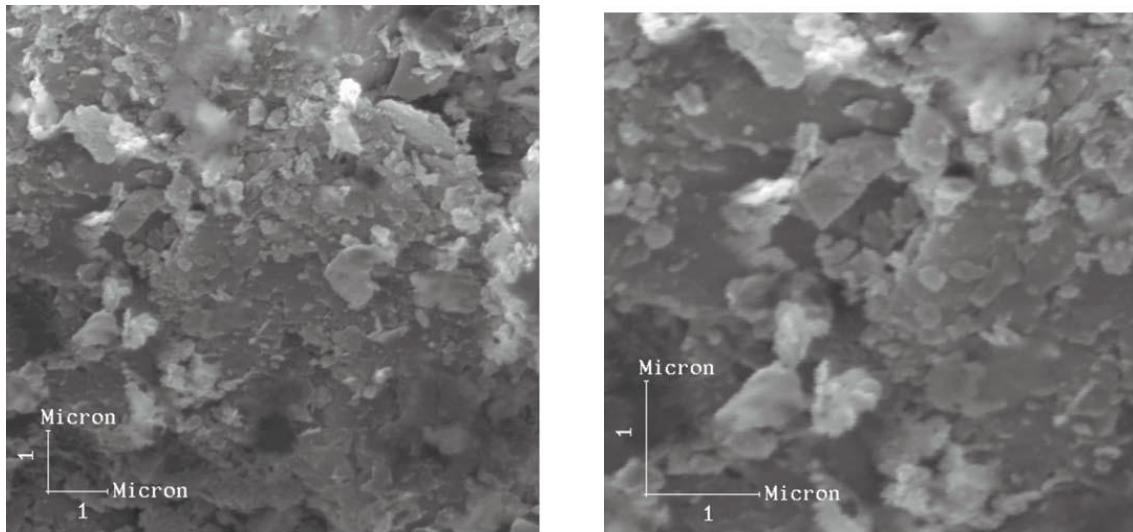


Figura 4.7: Micrografia obtida por MEV do chamote, (Vieira *et al.*, 2004).

Os autores concluíram que a incorporação de até 20% em peso de chamote possibilita uma melhoria nos parâmetros pré-queima. Além disso, a pouca variação na porosidade resulta da transformação que o chamote sofre durante a queima sob temperaturas acima da qual foi obtido. E ainda, a utilização de chamote oriundos de bloco de vedação pode melhorar o processamento de telhas sem comprometer a qualidade final dos produtos.

Ripoli Filho (1997) ao realizar um estudo sobre “A Utilização do Rejeito Industrial Cerâmico - Chamote - como Fator de Qualidade na Fabricação de Elementos Cerâmicos: um Estudo Experimental”, avaliou a viabilidade da adição de chamote à massa argilosa para a fabricação de elementos cerâmicos.

Nesse estudo o autor utilizou sete tipos de amostras oriundas das olarias próximas a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e avaliou as seguintes variáveis: teor de umidade de moldagem, proporção das misturas, argila-base e temperatura de queima. As principais características físicas e mecânicas observadas foram: retração linear de queima, absorção de água, porosidade,

massa específica aparente e sucção inicial. A partir dessas análises o autor concluiu que:

- A adição de chamote à massa argilosa pode ser benéfica para a fabricação de elementos cerâmicos, desde que essa adição seja nas proporções corretas.
- As tensões de ruptura e absorção de água estão de acordo com as normas brasileiras.
- O uso do chamote reduziu a retração linear de secagem nas peças. Esse fator contribui para que as peças tenham menor deformação e conseqüentemente menores defeitos no produto final.
- O chamote pode contribuir para controlar a retração reduzindo possíveis defeitos não só na etapa de secagem como também na etapa de queima.
- A incorporação de chamote a massa argilosa produz produtos de boa qualidade e conseqüentemente contribui para a redução da poluição do ambiente.

Vicenzi e Bergmann (2009) estudaram a “Adição de Chamota em uma Massa Cerâmica à Base de Argila Vermelha: Efeito na Secagem Pré-Queima”, com o objetivo de avaliar a interferência do chamote na etapa de secagem.

Os autores utilizaram uma massa argilosa proveniente de Gravataí-RS e adicionaram 2, 5 e 10% de chamote a massa.

A análise química da argila revelou elevados teores em peso de óxido de ferro que confere a cor avermelhada, elevada perda ao fogo que pode estar associada a perda de água dos argilominerais e a combustão da matéria orgânica e, baixos teores de óxidos fundentes. Esse mesmo padrão também foi observado por Vieira *et al.* (2004) estudando as argilas de Campos dos Goytacazes - RJ.

A composição mineralógica da massa revelou a presença de ilita, caulinita, quartzo e hematita.

Na etapa de secagem os autores observaram que com o aumento da quantidade de chamote há um incremento na perda de massa após secagem ao ar.

A Figura 4.8 apresenta a perda de massa após secagem ao ar das massas em função granulometria do tamanho médio de partículas do chamote.

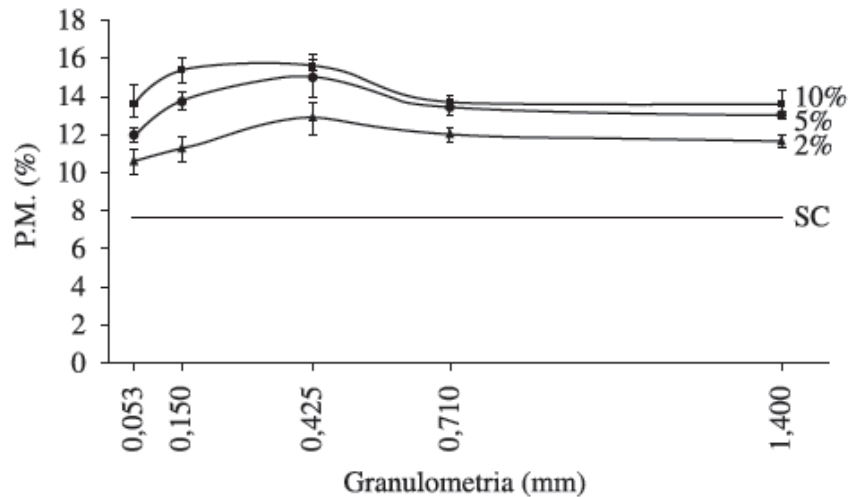


Figura 4.8: Perda de massa após secagem ao ar das massas com e sem chamote em função da granulometria do tamanho médio de partículas do chamote, (Vicenzi & Bergmann, 2009).

Após secagem em estufa observa-se que a perda de massa em função da perda de água é proporcional a quantidade de chamote adicionado. Maior quantidade de chamote representa menor teor de água retida na massa cerâmica durante seu processamento.

A Figura 4.9 apresenta a perda de massa após secagem em estufa das massas em função da granulometria do tamanho médio de partículas do chamote.

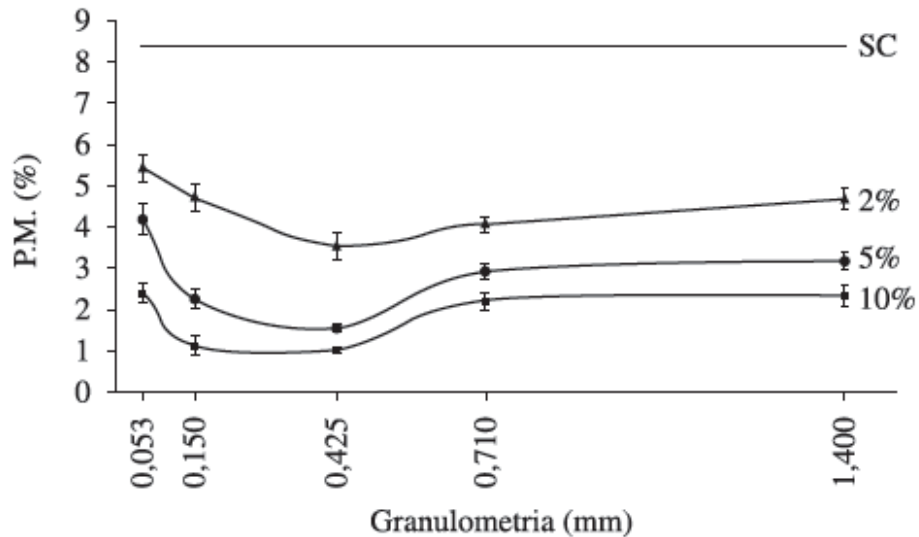


Figura 4.9: Perda de massa após secagem em estufa das massas com e sem chamote em função da granulometria do tamanho médio de partículas do chamote, (Vicenzi & Bergmann, 2009).

Vicenzi e Bergmann (2009) atribuíram a tendência de perda de massa tanto em secagem ao ar quanto em estufa, ao tamanho de partícula de chamote. Os autores observaram que a composição que continha chamote com menor granulometria a perda de massa era menor. Isso se deve provavelmente a baixa eficiência que esse tamanho de partícula tem para formar caminhos livres para a extração de água. Além disso, a adição de chamote reduz a retração linear dos corpos de prova e, quanto maior o tamanho das partículas menor a retração linear.

Com relação à resistência mecânica, os autores observaram que quanto maior o tamanho da partícula bem como sua proporção na massa, há uma diminuição na resistência mecânica comparada com a massa sem adição de chamote .

A Figura 4.10 apresenta a resistência mecânica em função da granulometria das formulações estudadas.

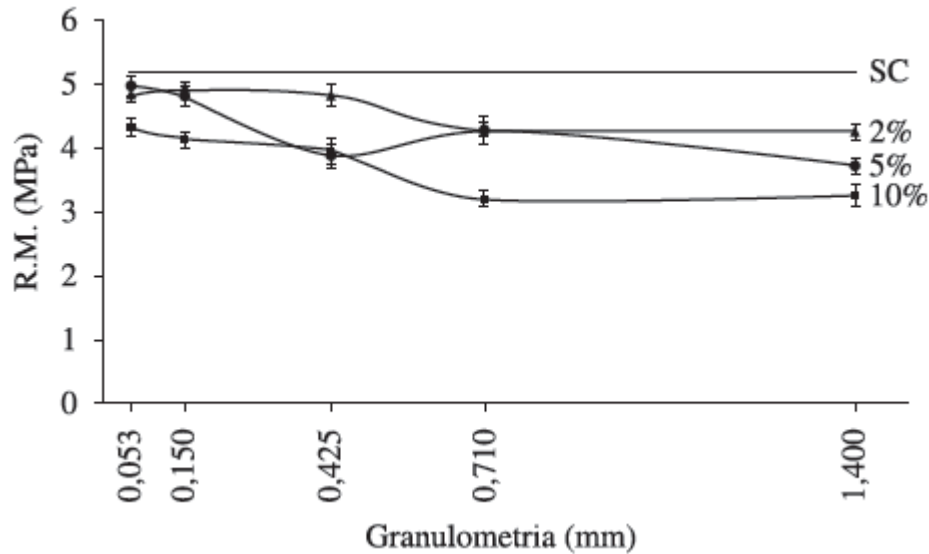


Figura 4.10: Resistência mecânica após secagem total das formulações com e sem chamote em função da granulometria do tamanho médio de partícula do chamote, (Vicenzi & Bergmann, 2009).

Assim, os autores concluíram que:

- A plasticidade da massa varia de acordo com a quantidade e a granulometria de chamote adicionado.
- A adição de chamote faz com que menos água tenha que ser removida da massa diminuindo a retração linear.
- A adição de chamote em teores elevados e de granulometria grosseira ocasiona trincas diminuindo a resistência mecânica.

Campelo *et al.* (2006) realizaram pesquisas com adição de chamote nas proporções de 3 e 5% em massa para fabricação de telhas.

As temperaturas de queima dos corpos de prova foram de 850 e 950° C. Foram feitos ensaios de módulo de ruptura à flexão em três pontos, absorção de água e retração linear.

A análise química da matéria-prima utilizada revelou a presença de quartzo, caulinita, esmectita, illita, muscovita e hematita.

Com relação à retração linear, os autores observaram que, para a massa argilosa sem adição de chamote, houve um aumento na retração em função do aumento da temperatura de queima. Os autores observaram também que adição de 3 e 5% em peso de chamote às massas contribuiu para o controle dimensional das peças.

A Tabela 4.6 apresenta os valores em porcentagem da retração linear das amostras nas diferentes temperaturas de queima.

Tabela 4.6: Retração linear das amostras estudadas (Campelo *et al.* 2006).

Temperatura (°C)	Retração Linear (%)		
	Argila Padrão	3% de Resíduo	5% de Resíduo
850	0,4	0,08	0,01
950	1,3	0,9	0,9
1050	4,8	-	-
1150	8,5	-	-

Com relação à absorção de água, Campelo *et al.* (2006) observaram que, nas massas que continham chamote, houve um aumento na absorção de água nas temperaturas de 850 e 950° C.

A Tabela 4.7 apresenta os valores de absorção de água nas diferentes temperaturas de queima das composições estudadas.

Tabela 4.7: Absorção de água das amostras estudadas (Campelo *et al.* 2006).

Temperatura (°C)	Absorção de Água (%)		
	Argila Padrão	3% de Resíduo	5% de Resíduo
850	15,2	15,8	16,0
950	13,6	13,8	15,0
1050	8,8	-	-
1150	2,8	-	-

Nas temperaturas de 850° e 950° C observou-se uma diminuição do modulo de ruptura a flexão.

A Tabela 4.8 apresenta os valores do modulo de ruptura a flexão nas diferentes temperaturas de queima das composições estudadas.

Tabela 4.8: Módulo de ruptura a flexão das amostras estudadas (Campelo *et al.* 2006).

Temperatura (°C)	Módulo de Ruptura à Flexão em Três Pontos (MPa)		
	Argila Padrão	3% de Resíduo	5% de Resíduo
850	3,7	3,1	2,5
950	4,9	4,2	4,1
1050	10,7	-	-
1150	33,4	-	-

Após os ensaios os autores concluíram que:

- A adição de chamote ajudou no controle dimensional das peças pois tanto na adição de 3% quanto na adição de 5% em massa observou-se menor retração linear das peças.

- A adição de 3% e 5% de chamote a massa, tanto na temperatura de 850°C quanto na temperatura de 950°C, provocou um aumento na absorção de água pelos corpos de prova.
- Além disso, a adição de chamote a massa nas duas proporções estudadas e também nas temperaturas de queima avaliadas, provocou uma diminuição no módulo de ruptura a flexão.

Os resultados observados por Campelo *et al.* (2006) no que tange a resistência mecânica são diferentes dos observados por Vieira *et al.* (2004), uma vez que para Campelo *et al.* (2006) a adição de chamote nos teores de 3 e 5% diminuiu a resistência mecânica e para Vieira *et al.* (2004), dentro de um erro estatístico, a adição de até 20% de chamote a massa não alterou a resistência mecânica. Essa diferença pode estar associada à granulometria das partículas. Geralmente partículas maiores são propagadoras de trincas o que pode diminuir a resistência mecânica das peças.

Vieira *et al.* (2009) objetivaram estudar o efeito da temperatura de queima nas propriedades de uma cerâmica constituída por argila caulínica. Nesse estudo os autores incorporaram até 20% em peso de chamote à massa e queimaram os corpos de prova em forno de laboratório nas temperaturas de 500 a 1100 °C.

O chamote utilizado foi oriundo de blocos de vedação queimados entre 500° e 600° C e foram preparadas quatro composições : A – sem chamote, A5C – 5% de chamote, A10C – 10% de chamote e A20C – 20% de chamote em peso.

O ensaio de absorção de água revelou, dentro de um erro estatístico, um pequeno aumento na absorção de água com o aumento da temperatura até 900°C. A 1100°C a absorção de água diminuiu abruptamente que está ligado ao processo de vitrificação.

A Figura 4.11 representa o gráfico de absorção de água das composições estudadas em função das temperaturas de queima.

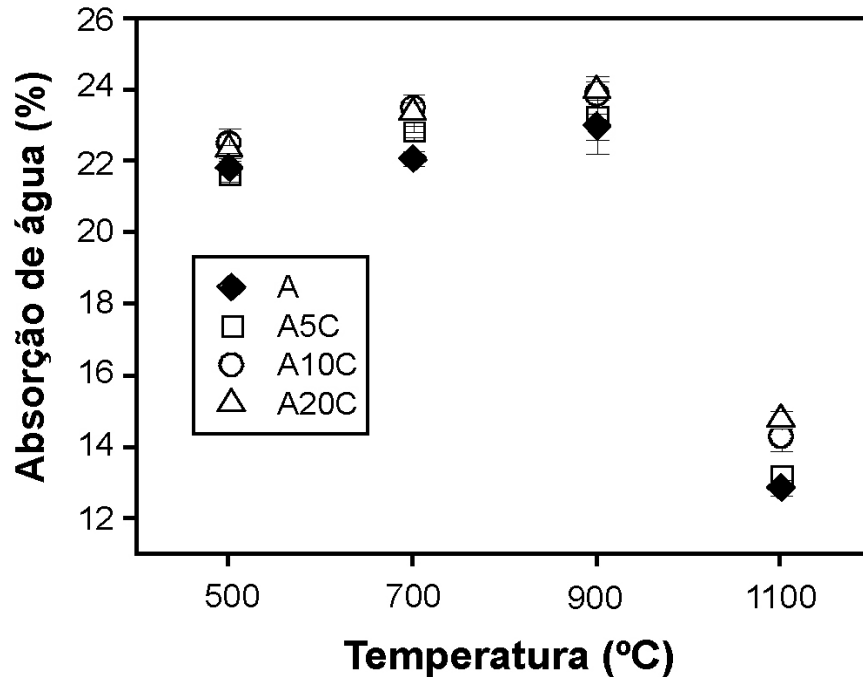


Figura 4.11: Absorção de água das composições em função da temperatura de queima, (Vieira *et al.* 2009).

Entre 500 e 900°C observou-se um pequeno aumento na retração diametral; a partir de 1100°C o aumento da retração foi abrupto. Esse comportamento também pode ser atribuído ao processo de vitrificação que possibilita a redução da porosidade aproximando as partículas.

A Figura 4.12 apresenta a compressão diametral das composições estudadas em função das temperaturas de queima.

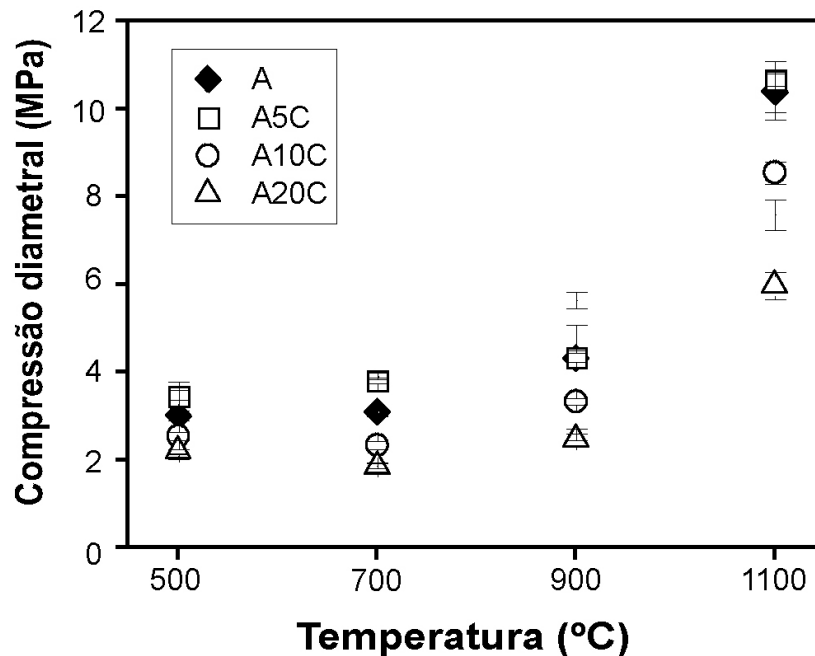


Figura 4.12: Compressão diametral das composições em função das temperaturas de queima, (Vieira *et al.* 2009).

Os autores concluíram que:

- A adição de chamote reduziu discretamente a densidade aparente a seco.
- A 1100 °C ocorreu um brusco aumento da retração, da compressão diametral e redução da absorção de água das composições em função do processo de vitrificação.
- Incorporações de chamote acima de 5% são prejudiciais à resistência mecânica da argila.

Gouveia (2008) estudou o efeito da incorporação de chamote em massa cerâmica para a produção de blocos de vedação para o Distrito Federal. Nesse estudo utilizou-se uma argila caulinitica. O chamote utilizado foi obtido de blocos

cerâmicos queimados à 800°C e as proporções adicionadas a massas foram de 0, 5, 10, 15 e 20% em peso.

A composição química da argila utilizada revelou a presença dos seguintes minerais: quartzo, caulinita, ilita, hematita, pirofilíneo e microclíneo. Já a composição química do chamote revelou a presença de quartzo, hematita, rutilo, e diásporo.

A Figura 4.13 representa a curva de gresificação das composições. Observou-se que a absorção de água aumentou com o incremento de chamote às formulações, e conseqüentemente, aumentou também a porosidade aparente.

Além disso, observou-se que com o aumento da temperatura de queima houve um aumento na retração em todas as composições estudadas. Esse comportamento pode ser atribuído as reações de sinterização provocando mudanças físicas e redução do volume dos corpos de prova pela perda de água.

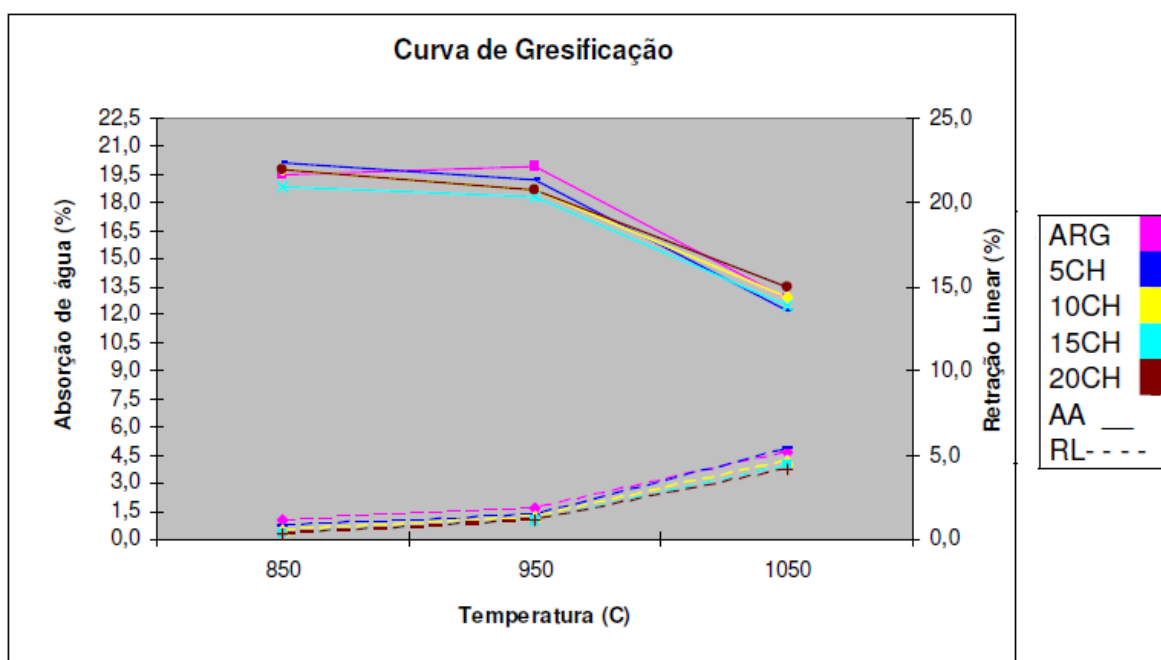


Figura 4.13: Curva de gresificação para os corpos cerâmicos com e sem adição de chamote, (Gouveia, 2008).

Com relação à resistência a flexão o estudo revelou que para corpos cerâmicos sem chamote e com até 5% de chamote, a resistência mecânica pouco

se alterou. Na composição com 10% de chamote houve um aumento na resistência, porém nas composições com 15% e 20% de chamote a resistência diminuiu em relação às outras composições.

A Figura 4.14 apresenta módulos de tensão de ruptura a flexão em função da temperatura de queima para os corpos cerâmicos estudados.

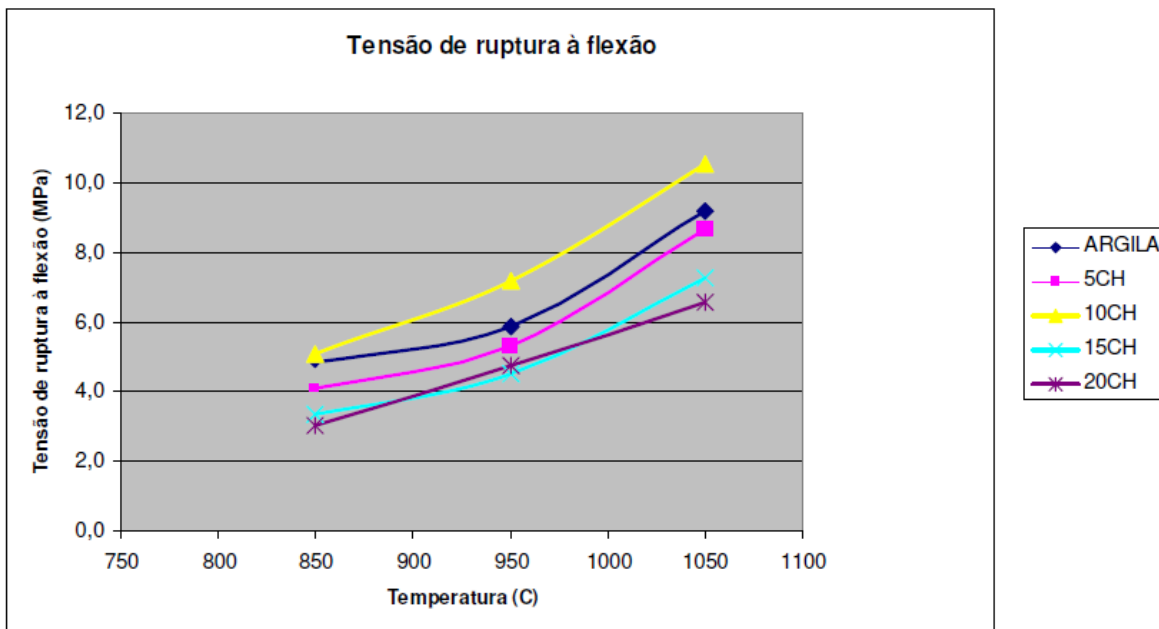


Figura 4.14: Tensão de ruptura a flexão em função da temperatura de queima para os corpos cerâmicos com e sem adição chamote, (Gouveia, 2008).

Com o estudo, o autor pode concluir que:

- A elevada plasticidade da argila utilizada pôde ser minimizada com a incorporação de até 10% de chamote. Os limites de plasticidade para as outras composições ficaram próximos ao da argila utilizada.
- A adição de chamote com granulometria extremamente fina poderia contribuir para o grau de empacotamento da composição.
- A adição de chamote reduziu a retração linear o que pode ser benéfico para a peça pois diminui a ocorrência de trincas por retração.
- A resistência mecânica dos corpos de prova aumentou em função da temperatura de queima. Porém, todas as composições com adição de

chamote apresentaram valores inferiores ao da massa padrão, para todas as temperaturas com exceção da massa com adição de 10% de chamote que superou os valores da resistência da massa padrão.

- A absorção de água e a porosidade aparente aumentaram com o teor de adição de chamote.
- A composição com 10% em peso de chamote foi a que apresentou resultados mais satisfatórios, uma vez que atendeu a todos os parâmetros físico-químicos e propriedades tecnológicas estudadas.
- As matérias-primas utilizadas no estudo são adequadas para a produção de peças cerâmicas.

Demir e Orhan (2003), em um estudo sobre o reaproveitamento de tijolos na linha de produção na Turquia, avaliaram a interferência da adição de diferentes granulometrias e composição de chamote a massa argilosa. As adições foram de 0% a 30% de resíduo na massa argilosa e as temperaturas de queima foram de 900°, 1000° e 1100°C.

Após o estudo os autores concluíram que:

- A adição de chamote com partículas mais grosseiras e também o aumento no percentual em massa adicionado a massa diminuiu a plasticidade da mistura.
- O incremento de chamote a massa diminuiu a retração linear de secagem o que pode melhorar a qualidade do produto final.
- Com o aumento da temperatura, pôde-se observar um aumento na resistência mecânica devido a formação de fase líquida.
- À medida que aumentou a porcentagem em massa de resíduo adicionado a massa cerâmica, houve uma redução na resistência mecânica.
- A absorção de água diminuiu com o aumento da temperatura, porém observou-se um aumento nesse fator quando se aumentou a quantidade de resíduo adicionada à massa.
- A utilização do chamote em massa cerâmica contribuiu para um descarte adequado desse resíduo diminuindo a poluição ambiental.

Beltrán *et al.* (1995) estudaram uma massa argilosa com adição de chamote para produção de pavimento extrudado. Os autores adicionaram à massa até 30% de chamote de diferente granulometria e, além disso, avaliaram os parâmetros pré-queima.

Com relação à variação da água de conformação adicionada à massa em função do diâmetro médio das partículas de chamote, os autores observaram que com o aumento do tamanho médio de partícula do chamote há uma redução na quantidade de água de conformação.

Quanto retração de secagem em função do diâmetro médio de partícula do chamote, os autores observaram que a medida em que aumentou-se do diâmetro médio de partícula do chamote, houve uma diminuição na retração de secagem. Esse comportamento pode estar associado a redução da água de conformação adicionada (Beltran *et al.*, 1995).

Por outro lado, os autores observaram que com o aumento da porcentagem de argila houve um aumento na retração de secagem. Os autores atribuíram esse comportamento ao incremento na porcentagem da fração argila na massa. Segundo Beltrán *et al.* (1995) maior concentração de argila na massa requer maior quantidade de água de conformação adicionada para melhorar a trabalhabilidade.

Com os resultados obtidos os autores puderam concluir que:

- O aumento na porcentagem de chamote adicionado a massa assim como o tamanho das partículas diminui a quantidade de água de conformação diminuindo a retração de secagem.
- A proporção ótima a ser adicionada do chamote à argila depende do tipo de material que se pretende produzir.

Vieira e Monteiro (2007) estudaram o efeito da adição de chamote nas propriedades e microestrutura de uma massa de cerâmica vermelha para produção de tijolos. Nesse estudo os autores incorporaram até 20% em peso de chamote a massa, e os corpos de prova foram queimados a 700°C.

Os autores concluíram que:

- A adição de até 20% em peso de chamote não afetou significativamente a plasticidade da massa podendo ser utilizada no processo produtivo.

- Adições acima de 5% em peso de chamote diminuíram o empacotamento das partículas. Entretanto observou-se uma redução na resistência mecânica somente na composição com 20% de chamote.
- Para não comprometer a qualidade final do produto, os autores recomendam que sejam feitas adições de até 5% de chamote a massa.

A utilização de chamote em cerâmica vermelha pode ter reflexos positivos sobre todo o processo produtivo. O chamote por apresentar uma granulometria mais grosseira do que a argila pode melhorar o grau de empacotamento da cerâmica. Além disso, devido à morfologia das partículas, contribui significativamente para facilitar a etapa de secagem, pois aumenta a permeabilidade da cerâmica. Entretanto, o teor de sua adição e a sua granulometria são fatores determinantes para a otimização do processo (Beltrán, 1996). Durante a queima, até temperaturas não superiores ao seu processamento, o chamote irá se comportar como material inerte. Já a utilização de chamote em temperaturas de queima 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 uma redução da porosidade do produto final.

Os trabalhos, em geral, revelaram que a adição de chamote pode reduzir a quantidade de água adicionada a massa argilosa atuando como um redutor de plasticidade. Além disso, a adição de chamote facilitou a etapa de secagem e diminuiu a retração contribuindo para que as peças tenham menor deformação e melhor qualidade final. A adição em teores elevados e com granulometrias grosseiras pode ocasionar trincas diminuindo a resistência mecânica do produto final. E ainda, a incorporação do chamote à argila contribui para uma destinação correta desse resíduo no ambiente. Dessa forma, pode-se observar que a incorporação do chamote pode ser benéfica para a produção de cerâmica vermelha desde que seja feita em quantidade e granulometria adequadas.

Assim, o estudo sobre a incorporação de chamote e argillito em massa argilosa para a produção de adoquim cerâmico é importante pois esses materiais podem atuar no ajuste de plasticidade, além de contribuir para a formação de fase

líquida durante etapa de queima. E também, a utilização de chamote contribui para minimizar prováveis impactos ambientais causados pelas indústrias cerâmicas. Outro fator importante que deve ser considerado é que a incorporação de chamote em massa cerâmica para fabricação do adoquim é uma forma de dar um destino final ambientalmente correto para o resíduo e, diversificar a produção das indústrias cerâmicas da região de Campos dos Goytacazes que é voltada basicamente para produtos de baixo valor agregado.

5 - MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 – Materiais Utilizados

Neste trabalho foram utilizadas como matérias-primas: massa argilosa, resíduo industrial chamote, e argilito em pó proveniente de Itú - SP. A massa argilosa é composta por uma mistura em partes iguais de argila forte e argila fraca e foi cedida pela cerâmica Stilbe.

Para a obtenção do chamote foram utilizadas peças sinterizadas que foram submetidas à trituração em moinho de martelo. Assim como as argilas, o resíduo foi cedido pela cerâmica Stilbe. A Figura 5.1 (a) mostra as peças sinterizadas encaminhadas à trituração em moinho de martelo, Figura 5.1 (b).



a



b

Figura 5.1: (a) peças queimadas encaminhadas à trituração. (b) moinho de martelos.

O argilito foi trazido da cidade de Itú – SP e está apresentado na Figura 5.2.



Figura 5.2: Argilito no pátio da cerâmica.

Após a coleta, os materiais foram encaminhados ao Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV da Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF.

5.2 – Metodologias empregadas

O procedimento experimental envolveu:

- Beneficiamento das matérias-primas;
- Caracterização das matérias-primas;
- Conformação dos corpos de prova por compressão uniaxial em matriz metálica;
- Sinterização dos corpos de prova;
- Determinação das propriedades físicas e mecânicas da cerâmica;
- Análise microestrutural.

5.2.1 - Beneficiamento das Matérias-primas

Em laboratório os materiais foram colocados em estufa a 110°C por 24 horas e posteriormente foram desagregados manualmente com almofariz e pistilo. Após a desagregação, os materiais foram peneirados em peneira de 35 mesh (abertura 425 µm).

5.2.2 - Caracterização das Matérias-primas

A caracterização das matérias-primas consistiu na determinação da composição mineralógica, composição química e características físicas. A caracterização mineralógica foi realizada por meio de testes de difração de raios-X (DRX) e análises térmicas (ATD /TG/ DTG). A caracterização química foi realizada por fluorescência de raios-X (FRX). A caracterização física consistiu na determinação da distribuição de tamanho das partículas das matérias-primas. A caracterização morfológica das matérias-primas foi efetuada por microscopia ótica (OP) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

5.2.2.1 - Difração de raios-X (DRX)

A análise dos minerais presentes nas matérias-primas assim como na cerâmica sinterizada foi realizada por difração de raios-X. A análise das fases cristalinas foi feita em difratômetro XRD7000, marca SHIMADZU operando com radiação Cobre (Cu-K α) e varredura de 2 θ variando de 5 a 60° do LAMAV/UENF.

5.2.2.2 - Análises térmicas (ATD/TG/DTG)

A análise termogravimétrica foi feita em aparelho termoanalisador STA 409C, com taxa de aquecimento de 10°C. min⁻¹. A análise térmica diferencial foi realizada em BP engenharia, modelo BP 300.

5.2.2.3 - Composição química

A identificação dos componentes químicos presentes nas matérias-primas foi feita através de uma análise quantitativa em espectrofotômetro de fluorescência de raios-X em equipamento Philips, modelo PW2400.

5.2.2.4 - Distribuição de tamanho de partícula.

A distribuição de tamanho de partícula foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil da UENF (LECIV/UENF). O método utilizado foi sedimentação e peneiramento de acordo com a norma NBR 7181 (1984). No ensaio de sedimentação as matérias-primas foram passadas em peneira de 200 mesh e foi baseado na Lei de Stokes, em que a velocidade terminal de sedimentação depende do tamanho de partícula e viscosidade do fluido determinado. A determinação dessa velocidade foi definida por:

$$V = g d^2 \frac{(\rho - \rho_f)}{18\eta} \quad \text{equação 5.1}$$

Em que: V é a velocidade terminal; g é gravidade; d representa diâmetro esférico equivalente; ρ é massa específica do material; ρ_f representa massa específica do fluido; η é igual a viscosidade do meio fluido.

No método de peneiramento as amostras foram inicialmente passadas por um peneiramento mais grosseiro (até a peneira de 2 mm – 10 mesh) e posteriormente por um peneiramento mais fino (até a peneira de 0,075 mm – 200 mesh).

5.2.2.5 - Microscopia ótica (MO)

A morfologia das partículas das matérias-primas foi avaliada por microscopia ótica em microscópio ótico TECNIVAL modelo CGA e posteriormente fotografadas.

5.2.2.6 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia das partículas das matérias-primas foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Laboratório de Microscopia Eletrônica do programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Para tal análise foi utilizado 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.

5.2.3 - Preparação das Composições

A preparação das composições foi feita com incorporação de chamote nas quantidades de 0, 5 e 10% em massa juntamente com 50% em massa de argilito à massa argilosa, composta por argila forte e argila fraca. Foram preparadas 4 composições levando em consideração a plasticidade e fundência.

A Tabela 5.1 apresenta as composições em porcentagem das matérias-primas utilizadas.

Tabela 5.1: Composição em peso das matérias-primas utilizadas. MA - massa, argilosa, A - argilito; CH - chamote, FO - argila forte.

Composições	Matérias-primas (% em peso)			
	Argila Fraca	Argila Forte	Argilito	Chamote
M	50	50	-	-
M50A	25	25	50	-
45M50A5CH	22,5	22,5	50	5
40M50A10CH	20	20	50	10

A homogeneização das massas foi realizada em moinho de porcelana lisa e bolas, apresentado na Figura 5.3, durante 15 minutos e posteriormente as composições foram armazenadas em sacos plásticos.



Figura 5.3: Moinho de porcelana lisa e bolas utilizado para a homogeneização das massas.

5.2.4 - Plasticidade

O ensaio de plasticidade foi realizado no LECIV/UENF para todas as formulações citadas acima onde foi avaliada a plasticidade das argilas (forte e fraca) e argilito. A plasticidade foi determinada através da determinação dos limites de Atterberg de acordo com as normas da ABNT NBR-7180 (ABNT, 1984a) e ABNT NBR-6459 (ABNT, 1984b). O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado por:

$$IP = LL - LP \quad \text{equação 5.2}$$

Em que IP é índice de plasticidade, LL é limite de liquidez e LP é o limite de plasticidade. O LL é a quantidade máxima em peso de água que pode ser adicionada a massa e que permite que essa massa quando separada por um sulco se una novamente após 25 golpes no aparelho Casagrande. O LP é o teor mínimo de água que pode ser adicionado a massa e que permite que essa massa seja moldada em cilindros de 3 a 4mm de diâmetro e 15 cm de comprimento.

5.2.5 - Preparação dos Corpos de Prova

As massas preparadas foram umedecidas com spray de água, até 8%, de modo a possibilitar a conformação por prensagem dos 168 corpos de prova. Posteriormente, as massas foram passadas em moinho de bolas para sua homogeneização e novamente em peneira com abertura de 35 mesh.

Os corpos de prova foram feitos por prensagem uniaxial e moldados em matriz cilíndrica metálica com diâmetro igual a 20,28 mm. Os corpos de prova foram elaborados em duas faixas de massa específica que variou entre 1.95-2.09 g/cm³ e 2.15-2.28 g/cm³.

Posteriormente, os corpos de prova foram secos a temperatura ambiente por 24 horas e após, colocados em estufa a 110°C até alcançarem peso constante.

Os corpos de prova foram queimados em forno de laboratório tipo mufla da EDG, modelo 3P-S, nas temperaturas de 850°, 950° e 1050°C. Utilizou-se uma taxa de aquecimento constante de 2°C/min e mantidos na temperatura patamar por 30 minutos e resfriados por convecção natural desligando-se o forno.

5.2.6 - Determinação das Propriedades Físicas e Mecânicas

Após a sinterização, os corpos de prova das composições elaboradas, foram submetidos à determinação de propriedades físicas e mecânicas como massa aparente específica, absorção de água, retração diametral e compressão uniaxial de acordo com procedimentos técnicos (ASTM C 373-72).

5.2.6.1 - Ensaio físicos e mecânicos

5.2.6.1.1 - Massa específica aparente

A massa específica aparente das peças secas e queimadas foi determinada pelo método dimensional de acordo com a norma ASTM C 373-72 (1997). As medidas de altura e diâmetro foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital da Mitutoyo (resolução $\pm 0,01\text{mm}$). As massas foram determinadas através de balança digital Instrutherm Modelo Bd-600 (precisão 0,1g). Após a obtenção das medidas de massa e altura e diâmetro das peças, a massa específica aparente foi calculada utilizando a seguinte expressão:

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \quad \text{equação 5.3}$$

Em que ρ_{ap} é massa específica aparente (g/cm^3) do corpo de prova seco ou queimado; M é a massa (g) e V é o volume do corpo-de-prova (cm^3) seco ou queimado, respectivamente.

5.2.6.1.2 - Retração diametral de queima

As dimensões das peças secas e queimadas foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital marca MITUTOYO (resolução $\pm 0,01 \text{ mm}$). Posteriormente foi calculada a retração das peças queimadas (R) através da seguinte expressão:

$$R_{QD} (\%) = \frac{(D_s - D_q)}{D_s} \times 100 \quad \text{equação 5.4}$$

Em que: R_{QD} é a retração diametral de queima. D_s é o diâmetro do corpo de prova após secagem e D_q é o diâmetro do corpo de prova após queima.

5.2.6.1.3 - Absorção de água (AA)

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 posteriormente colocados em um recipiente com água fervente por duas horas e resfriados submersos em água. Em seguida, foi retirada a água superficial e os corpos de prova foram novamente pesados para que se pudesse obter o valor de absorção de água.

A absorção de água foi calculada utilizando a seguinte expressão:

$$AA(\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} 100 \quad \text{equação 5.5}$$

Em que: AA= Absorção de água, P_u = massa úmida (g) e P_s = massa seca (g).

5.2.6.1.4 - 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 à compressão é expressa por:

$$\sigma = \frac{F}{\pi \times R^2} \quad \text{equação 5.6}$$

Em que: σ é tensão de resistência à compressão; C = carga máxima obtida no ensaio em N; R = raio de corpo de prova em mm. Os resultados são comumente expressos em MPa, Pa, N/m², kgf/mm².

5.2.7 - Avaliação microestrutural

A avaliação microestrutural das cerâmicas queimadas foi realizada por MO e MEV após a seleção das amostras. A investigação das fases cristalinas formadas durante a sinterização foi realizada por difração de raios-X, através dos procedimentos já detalhados.

5.2.7.1 - Microscopia ótica (MO)

As peças destinadas à análise por MO foram previamente preparadas com lixa nº 1200 apropriada para superfícies molhadas. As amostras avaliadas foram as queimadas a 850 e 1050°C.

5.2.7.2 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As peças queimadas foram previamente preparadas com lixa nº 1200, apropriadas para superfícies molhadas. Após o preparo da superfície, as amostras foram secas e metalizadas com platina (Pt) ou ouro (Au) em metalizador SHIMADZU, modelo IC-50.

A análise por MEV foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica do programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Para tal análise foi utilizado um microscópio Jeol, Modelo FSM 6460 LV. As micrografias obtidas foram das peças sinterizadas a 850 e 1050°C de cada composição para cada densidade.

5.2.7.3 - Difração de raios-X

A difração de raios- X foi realizada para a determinação das fases presentes após a queima. A metodologia empregada foi descrita no item 5.2.2.1.

6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - Caracterização das matérias-primas

6.1.1 – Caracterização mineralógica

Difratometria de raios-X das matérias-primas

As Figura 6.1 e 6.2 apresentam o difratograma de raios-X da argila forte e da argila fraca, respectivamente. São observadas como fases cristalinas presentes caulinita, quartzo, mica muscovita, gibsita e minerais esmectícios. Os picos predominantes são referentes 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). A presença de gibsita evidencia que nem todo óxido de alumínio (Al_2O_3) está ligado ao argilomineral que compõe a argila forte. Os minerais esmectícios são minerais acessórios presentes nas argilas de Campos dos Goytacazes. Esse resultado evidencia que as argilas utilizadas para este trabalho são semelhantes.

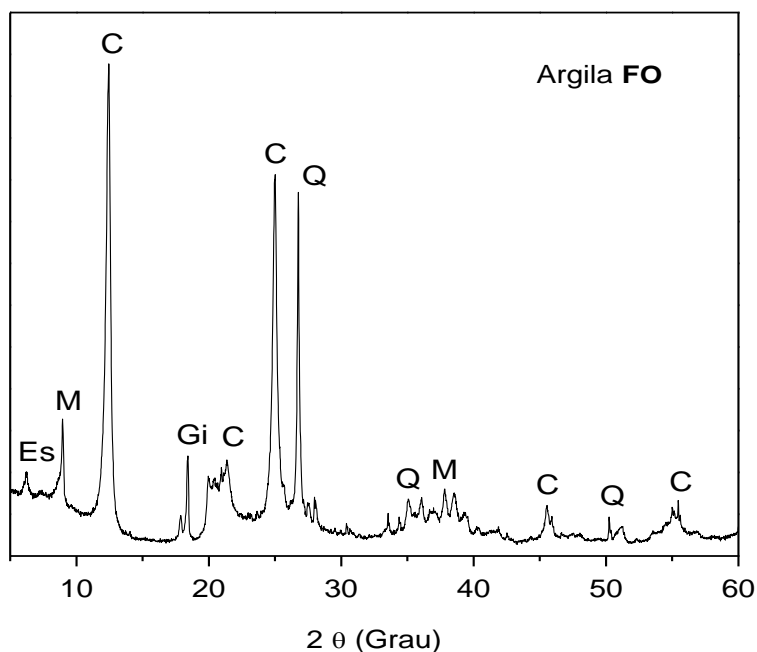


Figura 6.1: Difratograma de raios-X da argila FO. **C** = caulinita; **Q** = quartzo; **M** = mica muscovita; **Es** = Minerais esmectícios, **Gi** = Gibsita.

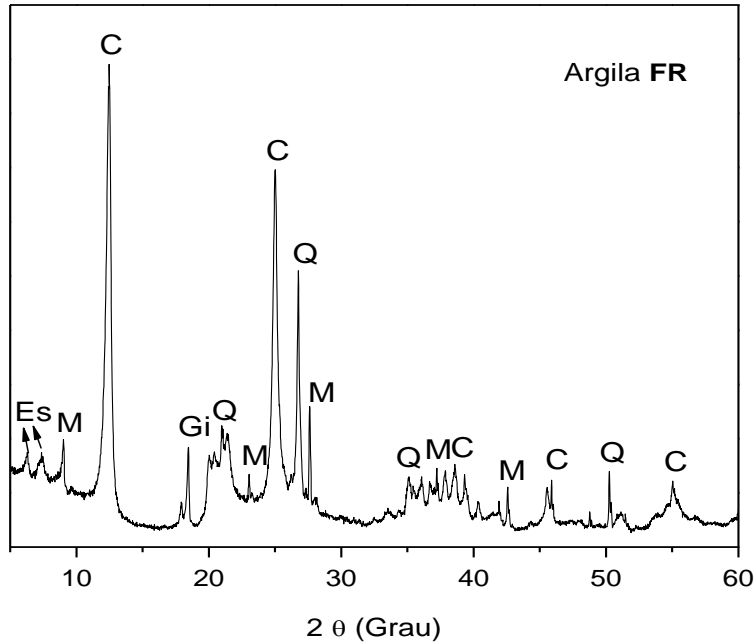


Figura 6.2: Difratoograma de raios-X da argila **FR**. **C** = caulinita; **Q** = quartzo; **M** = mica muscovita; **Es** = Minerais esmectícios.

Estudos realizados por Vieira *et al.* (2004) e Andrade *et al.* (2005) com argilas da região de Campos do Goytacazes revelaram que as fases cristalinas presentes também eram semelhantes às fases encontradas nas argilas utilizadas nesse estudo. No estudo realizado por esses autores, os picos mais intensos observados também foram os referentes à caulinita indicando que ela é o principal argilomineral que compõe as argilas. A caulinita é o argilomineral responsável pelo desenvolvimento da plasticidade da argila em mistura com a água (Souza, 2007).

As argilas tipicamente caulínicas, como as de Campos dos Goytacazes, apresentam como principal característica elevada refratariedade (Vieira *et al.*, 2004). Essa característica permite que temperaturas em torno de 1200 a 1350°C sejam consideradas normais para essas argilas, em aplicações específicas de materiais refratários e porcelanas (Abajo, 2000).

O quartzo constitui a principal impureza presente na argila atuando como matéria-prima não plástica e inerte durante a sinterização. A gibsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)

contribui para o aumento da refratariedade e perda de massa durante o processo de sinterização. A mica muscovita ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$) possui textura lamelar e pode atuar como fundente devido a presença de óxido alcalinos em sua estrutura (Ribeiro, 2010).

Na Figura 6.3 está apresentado o difratograma de raios-X do argilito. Observa-se que, assim como as argilas, caulinita, quartzo e mica muscovita, também estão presentes como fases cristalinas. Além desses dois minerais, é notada também a presença de mineral micáceo, microclina e feldspatos plagioclásios. A semelhança entre a composição mineralógica do argilito e das argilas permite que ele seja utilizado na composição das massas utilizadas neste trabalho.

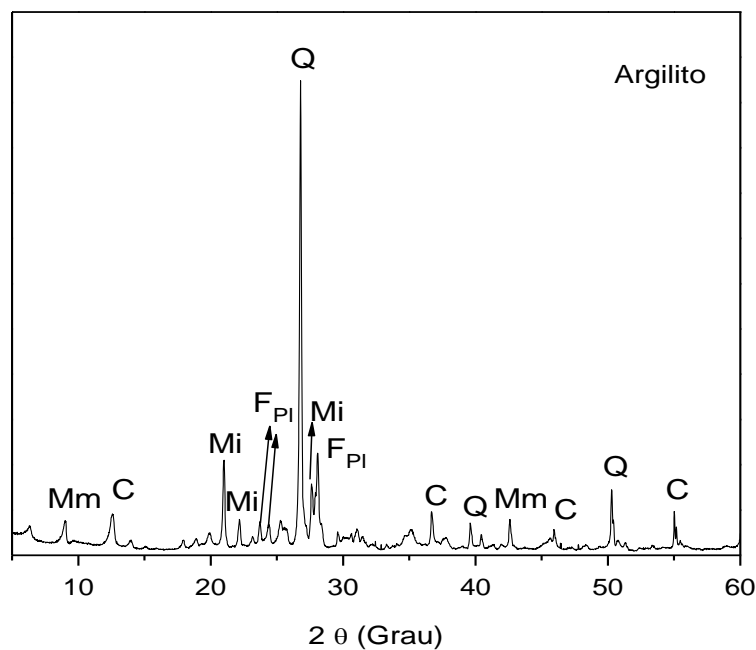


Figura 6.3: Difratogramas de raios-X do argilito. **C** = caulinita; **Q** = quartzo; **M** = mica muscovita; **Mm** = mineral micáceo; **Mi** = microclina; **F_{PI}** = feldspatos plagioclásios.

A presença da microclina e dos feldspato plagioclásios confere ao argilito a característica de material fundente. Esses minerais são fonte de óxidos como K_2O

e Na_2O , que contribuem para a formação de fase líquida durante a queima e favorece a redução da porosidade da cerâmica (Vieira & Emiliano, 2005). Essa característica favorece o uso do argilito na composição de massa argilosa, pois pode atuar como fonte de fundentes para as argilas e assim favorecer uma melhoria nas propriedades tecnológicas.

A difratometria de raios-X do chamote está apresentada na Figura 6.4. Caulinita, quartzo, mica muscovita e hematita são as fases cristalinas observadas. A presença da caulinita é consequência das temperaturas relativamente baixas (abaixo de 600°C) utilizadas no processo de sinterização das peças que originaram o chamote. O quartzo e a mica muscovita são fases consideradas residuais, ou seja, provenientes da matéria-prima no seu estado natural. A hematita é proveniente da desidratação dos hidróxidos de ferro, que podem estar presentes, eventualmente, nas argilas de Campos dos Goytacazes (Vieira & Monteiro, 2005).

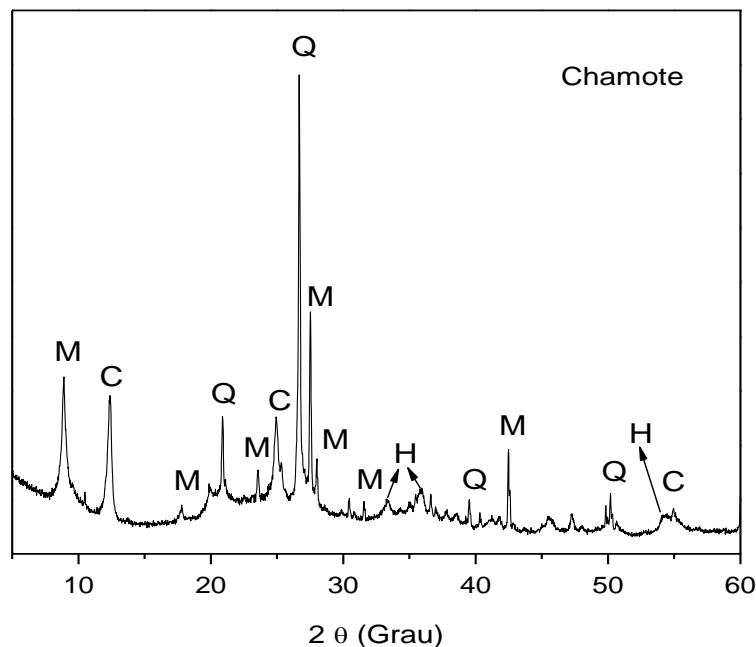


Figura 6.4: Difratogramas de raios-X do chamote. **C** = caulinita; **Q** = quartzo; **M** = mica muscovita; **H** = Hematita.

Vicenzi e Bergmann (2009) quando estudaram a influência da adição chamote em uma massa argilosa nas etapas de pré-queima identificaram as mesmas fases encontradas no chamote utilizado nesse trabalho. Além dessas fases, os autores também encontraram ilita. Tal característica indica que as argilas que originaram os resíduos são semelhantes, apesar de serem de regiões distintas.

Análise termogravimétrica das matérias-primas

A análise termogravimétrica possibilita o estudo do comportamento das matérias-primas quando são submetidas ao aquecimento, e também, possibilita a complementação da caracterização mineralógica desses materiais por DRX.

A Figura 6.5 e 6.6 apresenta a análise gravimétrica (TG/DTG) e análise térmica diferencial (ATD), respectivamente, das argilas **FO** e **FR**. Nota-se que nas temperaturas iniciais há uma perda de massa igual a 3,3% para a argila **FO** e para a argila **FR** há uma perda igual a 2%. Essa perda de massa inicial está atribuída a perda da água de umidade e absorvida. Posteriormente, entre 250 e 330°C há um pico endotérmico com perda de massa equivalente a 5,2 e 2,1% para as argilas **FO** e **FR** respectivamente. Essa perda de massa é atribuída à decomposição dos hidróxidos como, por exemplo, a gibsita identificada no DRX. A 587,7°C nota-se outro pico endotérmico de perda de massa igual a 10,1% para a argila **FO**, e a 585,8°C também se pode perceber outro pico endotérmico com perda de massa de 5,1% para a argila **FR**. Essa elevada perda de massa está associada à desidroxilação da caulinita. Finalmente observa-se um pequeno pico exotérmico, a 921,9°C na argila **FO** e a 921,2°C na argila **FR**, referente à decomposição da metacaulinita. A metacaulinita por volta de 950°C se decompõe formando o espinélio alumínio-silício (Brindley & Nakarira, 1959), e tem início a nucleação da mulita (Santos, 1989).

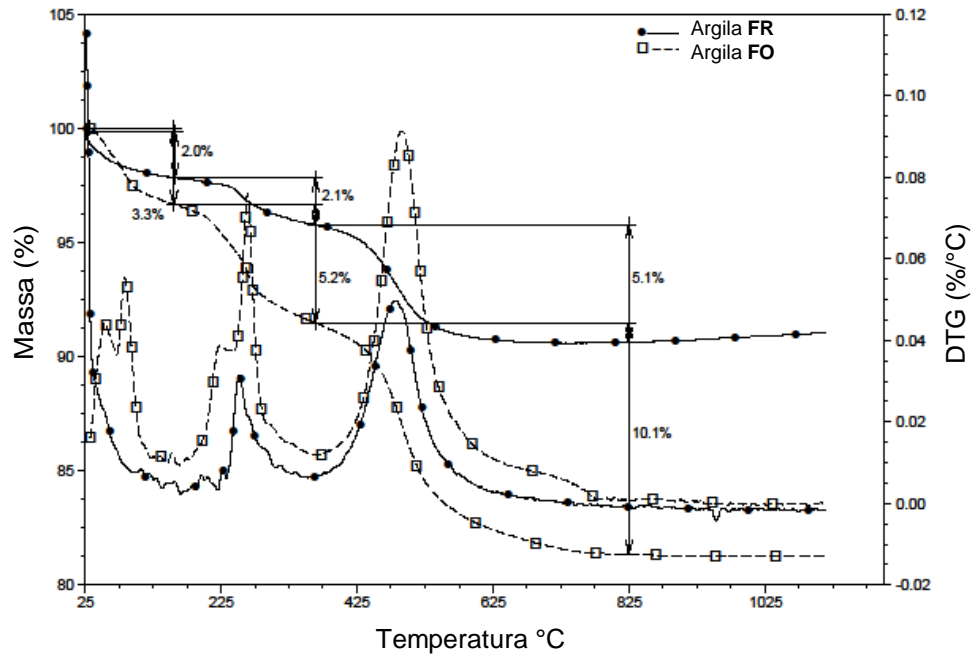


Figura 6.5: Curvas de TG/DTG das argilas.

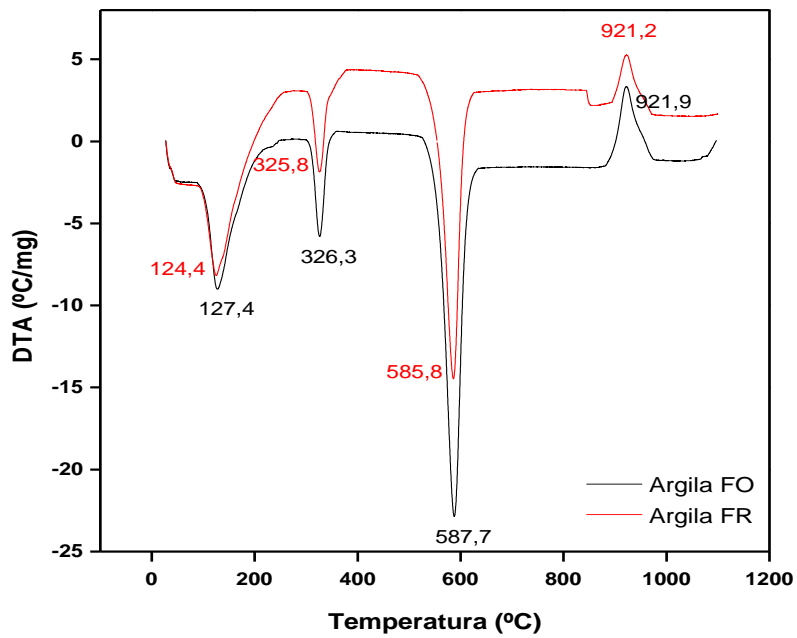


Figura 6.6: Curvas de ATD das argilas.

Na Figura 6.7 e 6.8 esta apresentada a TG/DTG e ATD do argilito respectivamente. Inicialmente há uma reação endotérmica a 140°C com perda de massa igual 3,2% referente à perda de umidade. A aproximadamente 175°C há uma pequena perda de massa de 0,4% referente à água higroscópica, seguida de nova perda de massa de 0,3%, a aproximadamente 275°C, devido à eliminação de água dos hidróxidos. A 590,1 °C observa-se pico endotérmico com perda de massa igual 2,3% que pode ser associado à desidroxilação da caulinita. A 917,4°C há um pico exotérmico que está associado à decomposição da metacaulinita (Vieira *et al.*, 2004).

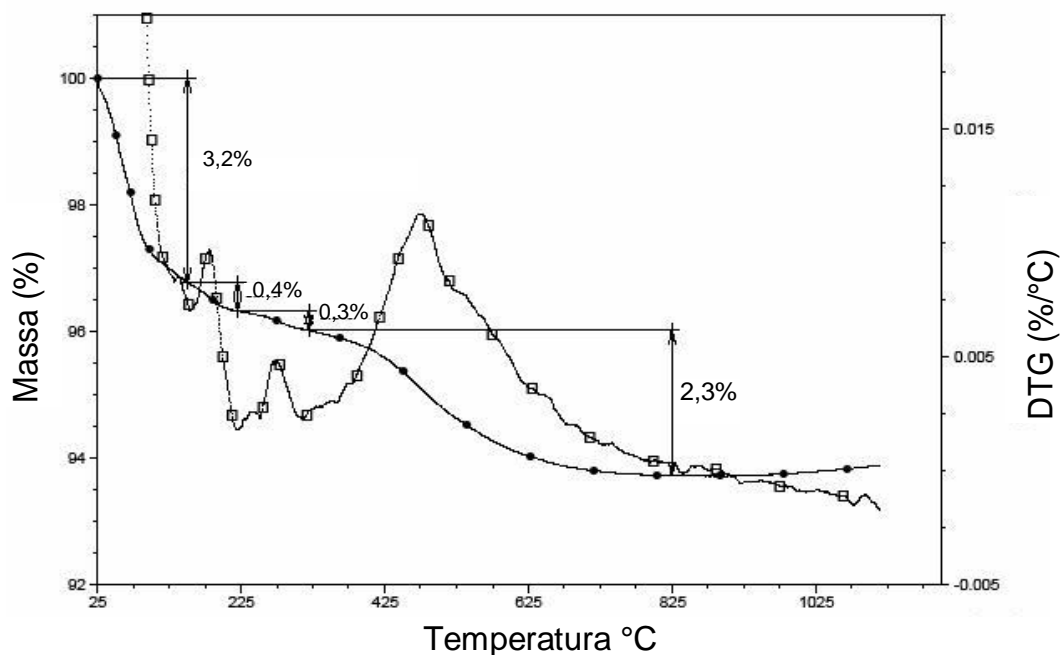


Figura 6.7: Curva de TG/DTG do argilito.

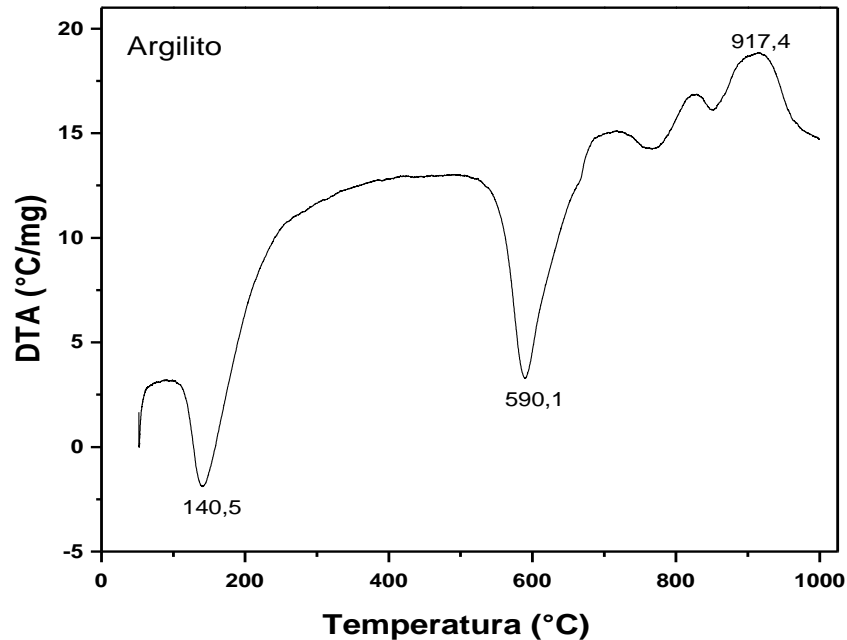


Figura 6.8: Curva de ATD do argilito.

As curvas de TG/DTG e ATD do chamote estão apresentadas na Figura 6.9 e 6.10 respectivamente. A análise termogravimétrica revela uma perda de massa total do chamote de 4,1% para queima até aproximadamente 1.000°C. Nota-se uma perda de massa de 1,6% até aproximadamente 350°C. Esta perda de massa é devido à eliminação de água de umidade e possivelmente re-hidratação de óxidos. Entre 400 e 600°C, aproximadamente, ocorre uma perda de massa de 2,3% associada à perda de água de constituição da caulinita remanescente da argila. Este resultado comprova que os blocos de vedação foram queimados em temperaturas inferiores a 600°C.

A curva ATD do chamote mostra dois picos endotérmicos e um pico exotérmico. Na temperatura de 126°C há um pico endotérmico associado provavelmente à perda de água de umidade. Em 586,4°C, observa-se um segundo pico endotérmico atribuído à eliminação de água de constituição da caulinita conforme discutido anteriormente. Finalmente, o pico exotérmico a aproximadamente 920,6°C está associado à decomposição da metacaulinita (Vieira *et al.*, 2004).

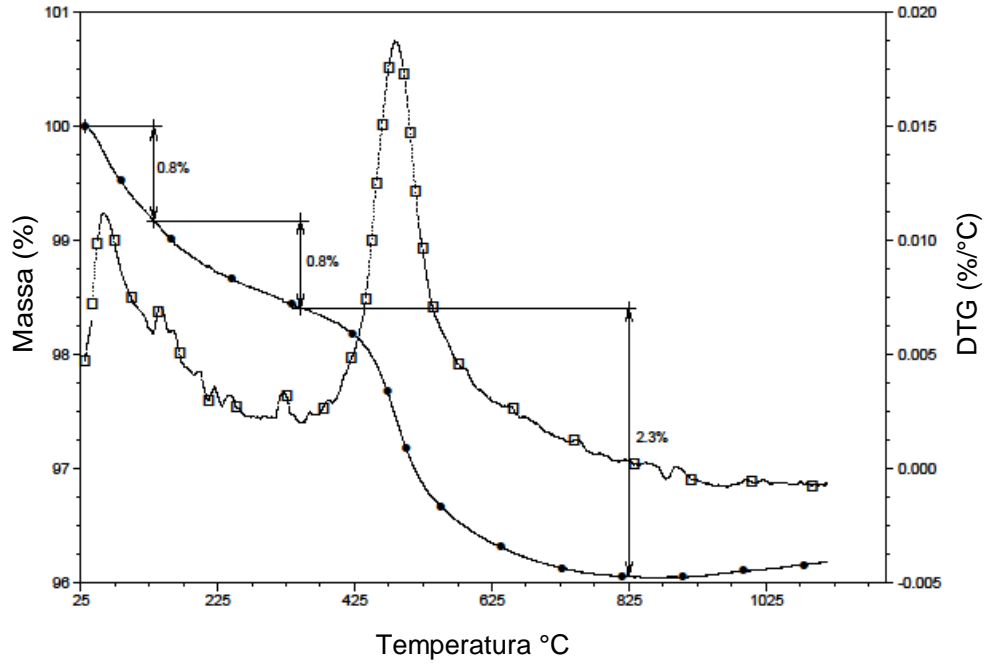


Figura 6.9: Curvas de TG/DTG do chamote.

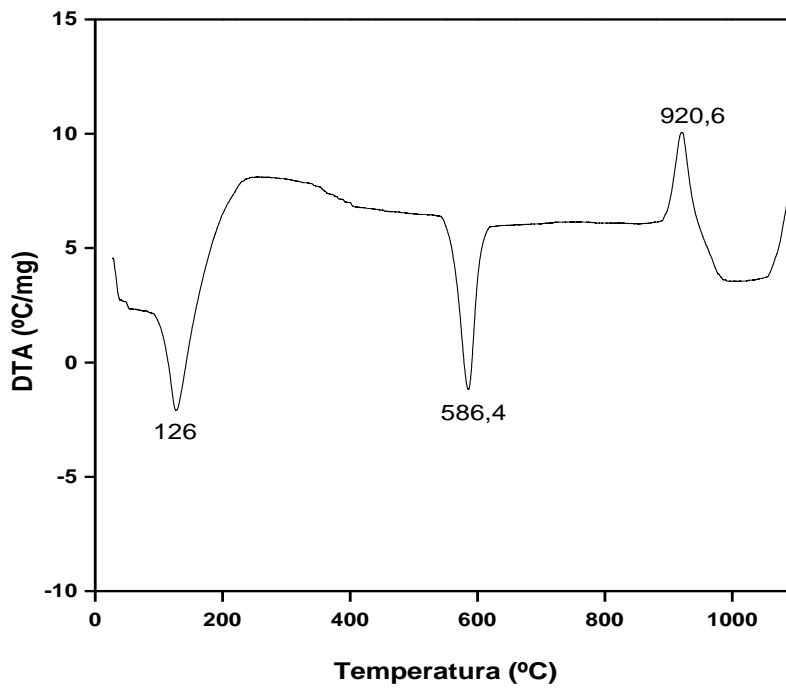


Figura 6.10: Curva de ATD do chamote.

6.1.2 - Caracterização química

Fluorescência de raios-X das matérias-primas

A composição química das matérias-primas estudadas está apresentada na Tabela 6.1. Pode-se observar que as argilas possuem composição química similar. Além disso, apresentam um elevado teor de alumina associado a um baixo teor de sílica em comparação com o argilito. Geralmente, argilas que apresentam elevado teor de alumina, como as de Campos dos Goytacazes, possuem como principal argilomineral a caulinita (Santos, 1989).

Algumas argilas apresentam teor de alumina superior ao da caulinita teórica que é de 39,8% provenientes também de boemita, gibsitita, diásporo e claquita (hidróxido de alumínio amorfo), sendo, portanto, altamente aluminosas e de interesse de material refratário (Santos, 1989). Apesar dos valores de alumina apresentado pelas argilas **FO** e **FR** serem inferiores a 39,8% a porcentagem ainda é considerada elevada e confere a essas argilas um caráter refratário (Santos, 1989).

As argilas **FO** e **FR** apresentam ainda um elevado teor de óxido de ferro que confere cor avermelhada quando submetidas a um tratamento térmico. No que se refere a óxidos fundentes, pode-se considerar que os valores apresentados por essas argilas são valores traços para CaO e K₂O e inexistente para Na₂O. Os baixos valores de óxidos fundentes podem estar associados, por exemplo, ao processo de intemperismo do feldspato que origina a caulinita (Santos, 1989). A escassez desses óxidos dificulta o processo de formação de fase líquida, necessária para uma melhor densificação das cerâmicas após a sinterização. A perda ao fogo (PF) deve-se a eliminação de água dos argilominerais, desidratação dos hidróxidos e oxidação da matéria orgânica. A elevada perda ao fogo das argilas estudadas se deve principalmente a eliminação de água de constituição da caulinita e desidratação da gibsitita.

O argilito por sua vez apresenta em sua composição química, baixos teores de alumina associado a elevados teores de sílica. Assim como as argilas, esse

material apresenta teores relativamente elevados de óxido de ferro que confere uma cor avermelhada à cerâmica. Com relação aos teores de óxidos fundentes, observa-se que o argilito apresenta maiores valores que as argilas, atuando assim como uma fonte de fundentes facilitando a formação de fases líquida durante a queima. No que se refere à perda ao fogo, o argilito apresenta menor teor desse parâmetro que as argilas. Tal característica, assim como maior teor de fundentes, é de fundamental importância para melhorar as propriedades do produto final, nesse caso o adocim cerâmico.

O chamote apresenta a sílica e a alumina como óxidos predominantes, associados, sobretudo, aos aluminossilicatos como o mineral argiloso e a mica muscovita. Nota-se que o material apresenta elevada porcentagem em peso de Fe_2O_3 o que confere a cor avermelhada aos blocos de vedação que originaram o chamote. Observa-se também baixos teores relativos de óxidos alcalinos fundentes como K_2O e Na_2O . Além disso, são observados baixos valores de perda ao fogo que pode estar associado a perda de hidroxila dos hidróxidos (gibssita $\text{Al}(\text{OH})_3$ e goetita $\text{Fe}(\text{OH})_3$) e da caulinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) fases mineralógicas características das argilas da região.

Tabela 6.1: Composição química das matérias-primas estudadas (% em peso).

Composição	Matérias-primas			
	Argila Forte	Argila fraca	Argilito Itú	Chamote
Al_2O_3	26,78	21,61	16,34	32,18
SiO_2	46,09	54,7	63,07	48,12
Fe_2O_3	10,05	9,92	5,84	9,83
MgO	0,71	0,86	2,29	0,85
Na_2O	-	-	0,82	-
P_2O_5	0,31	0,25	0,2	0,27
K_2O	1,66	2,47	4,02	1,78
CaO	0,34	0,57	0,48	0,41
TiO_2	1,59	1,35	0,79	1,47
MnO	-	0,17	-	0,17
P.F.	11,96	7,56	5,65	4,37

6.1.3 - Caracterização física

Distribuição de tamanho de partículas das matérias-primas

A Figura 6.11 apresenta a curva de distribuição de tamanho de partículas das argilas **FO** e **FR**. De acordo com a classificação da International Society of Soil Science a “fração argila” está associada com partículas de tamanhos inferiores a 0,002 mm. Nota-se que o teor de “fração argila” na argila **FO** é igual a 50,01% e para a argila **FR** é igual a 32,5%. O elevado teor de “fração argila” na argila **FO** confere maior plasticidade quando comparada com a argila **FR**. A fração “silte” compreende partículas com tamanho entre 0,002 e 0,02 mm e o percentual dessa fração na argila **FO** é igual a 38,32% e para a argila **FR** é igual a 27,5%. A fração “areia” compreende partículas com tamanho superiores a 0,02 mm e o percentual dessa fração na argila **FO** é igual a 11,37% e para a argila **FR** é igual a 40%.

A argila **FO** apresenta maior porcentagem de partículas no intervalo menor que 0,002 mm e como os argilominerais, responsáveis pelo aporte de plasticidade, estão associados a este intervalo, a maior plasticidade dessa argila pode ser justificada quando comparada a argila **FR** (Abajo, 2000; Santos, 1989).

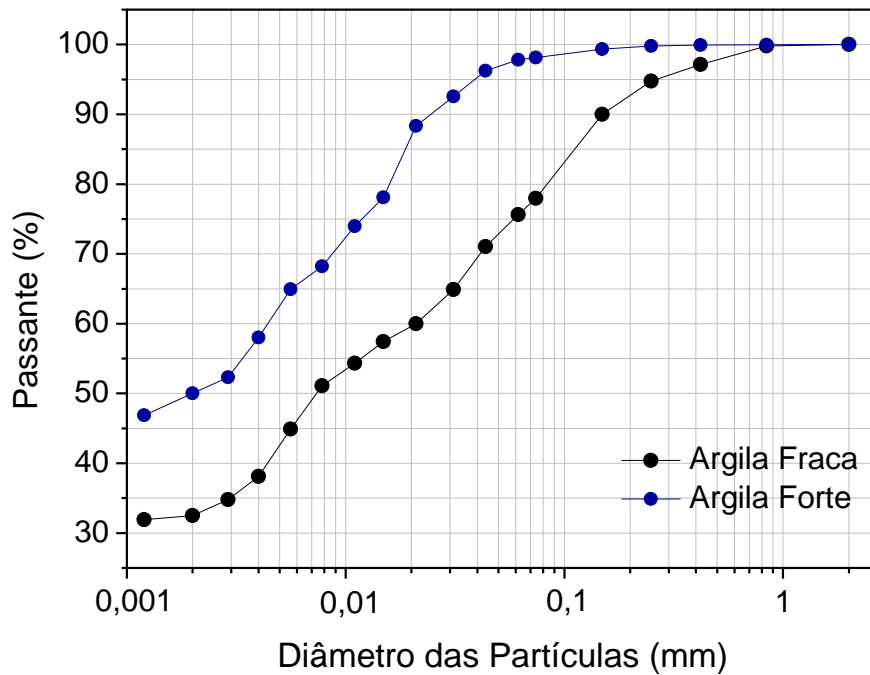


Figura 6.11: Curva de distribuição de tamanho de partículas das argilas **FO** e **FR**.

A Figura 6.12 apresenta as curvas de distribuição de tamanho de partícula do argilito e do chamote. Pode-se observar que o argilito apresenta uma granulometria mais grosseira que as argilas. O teor de “fração argila” desse material é igual a 14,97% conferindo a ele baixa plasticidade. O teor da fração “silte” é igual a 20,92% e a fração “areia” é de 64,12%. O chamote apresenta um percentual de fração “argila” abaixo de 5,4%. As frações “silte” e “areia” são de 9,6% e 85%, respectivamente. A granulometria do argilito e do chamote, mais grosseira que as argilas, pode facilitar o processo de secagem e melhorar o grau de empacotamento das cerâmicas.

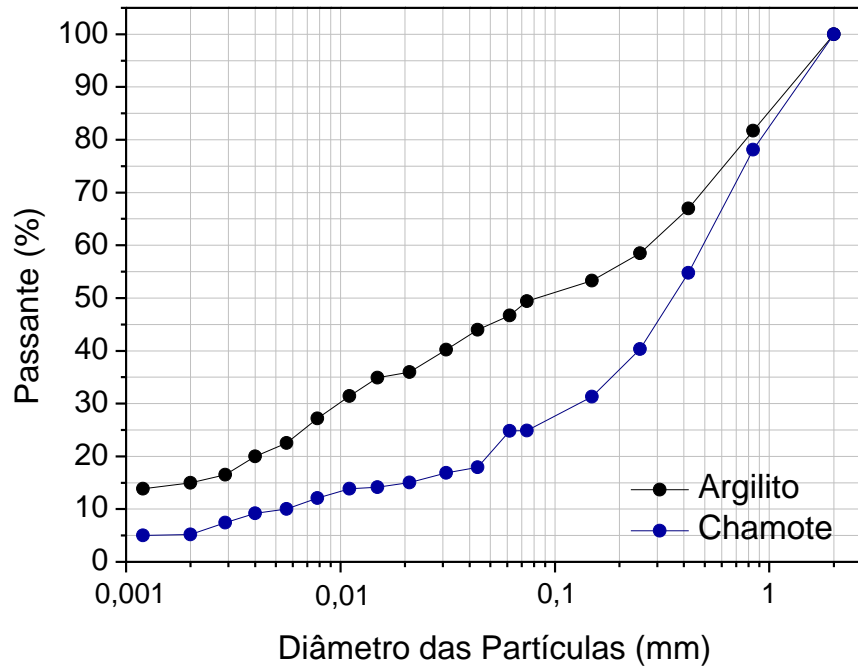


Figura 6.12: Curva de distribuição de tamanho de partículas do argilito e do chamote.

A Figura 6.13 mostra a localização dentro do Diagrama de Winkler das matérias-primas e das composições utilizadas nesse trabalho (Santos, 1989). Esse diagrama baseia-se na granulometria das argilas para delimitar regiões apropriadas para a produção de determinados produtos. A região **1** é apropriada para a produção de tijolos maciços. A região **2** é apropriada para produção de blocos de vedação; a região **3** para a fabricação de telhas e a região **4** para a produção de manilhas. Nota-se que a argila **FO** localiza-se região limítrofe pra a produção telhas e manilhas. Já a argila **FR** localiza-se na região apropriada para produção de telhas e o argilito na região indicada para a produção de tijolos maciços. O chamote localiza-se fora de todas as quatro regiões indicadas para produção dos materiais citados. Tal localização pode ser atribuída à elevada fração “areia” presente no chamote.

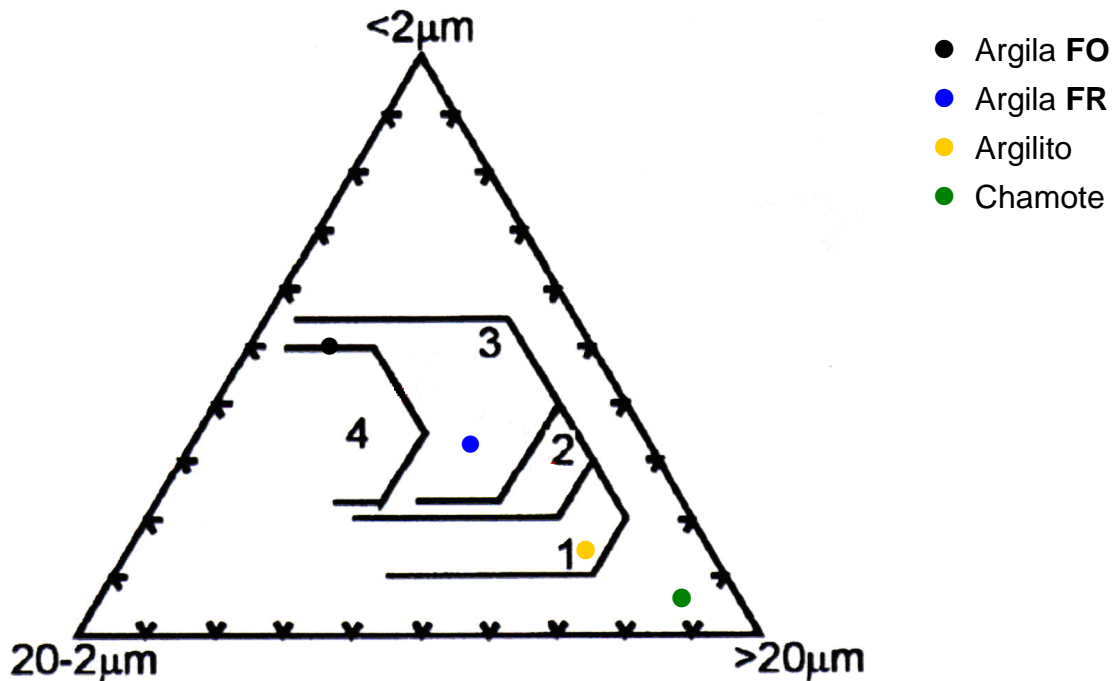


Figura 6.13: Diagrama de Winkler para a argila **FO**, argila **FR**, argilito e chamote.

6.1.4 – Caracterização morfológica

Microscopia ótica (MO)

A Figura 6.14 apresenta as micrografias obtidas por MO da argila **FO**. As micrografias (a) e (b) correspondem às partículas retidas em 230 mesh (0,063 mm). Já as micrografias (c) e (d) correspondem às partículas passantes na peneira de 230 mesh. É observada na argila **FO**, Figura 6.15 (a) e (b), a presença de mineral micáceo, circulado em preto, quartzo, indicado pela seta preta, e minerais ferromagnesianos, indicados pela seta branca. A presença dessas fases confirma os resultados apresentados no difratograma de raios-X da argila **FO**. Na Figura 6.15 (c) e (d) são observados aglomerados de partículas de menor tamanho e coloração amarelada. Essas partículas estão associadas, sobretudo, aos argilominerais. A coloração amarelada indica de óxidos de ferro que podem

fazer parte da estrutura cristalina da caulinita, argilomineral que compõe a argila **FO** (Freitas, 2009).

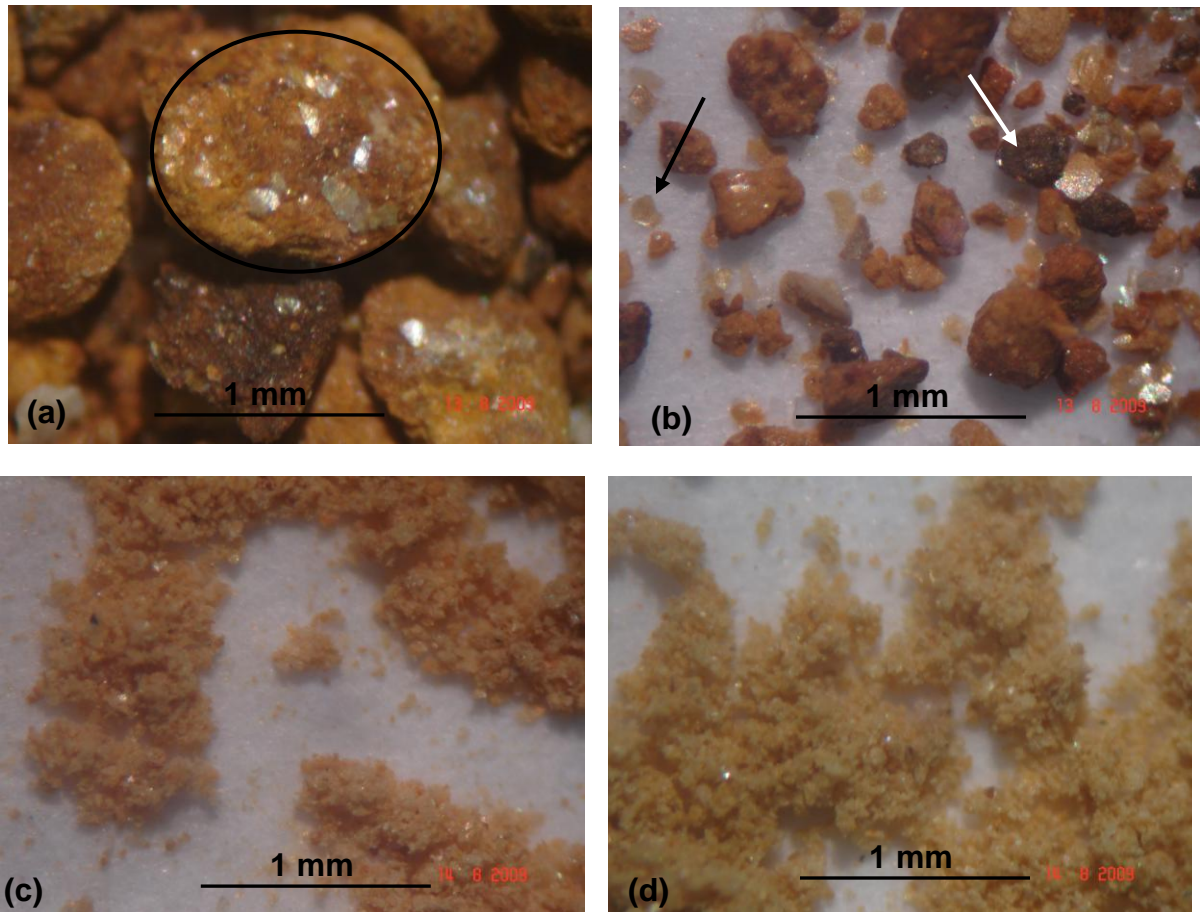


Figura 6.14: Micrografias obtidas por MO da argila **FO**. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.

As micrografias obtidas por MO da argila **FR** estão apresentadas na Figura 6.15. Assim como observado na argila **FO**, também são notadas fases como, mineral micáceo, quartzo e minerais ferromagnesianos na figura 6.16 (a) e (b). Na Figura 6.16 (c) e (d) também é observada a presença de aglomerados de argilominerais. Além disso, são notadas também, partículas de diferentes tamanhos que estão de acordo com a curva granulométrica apresentada na Figura 6.11.

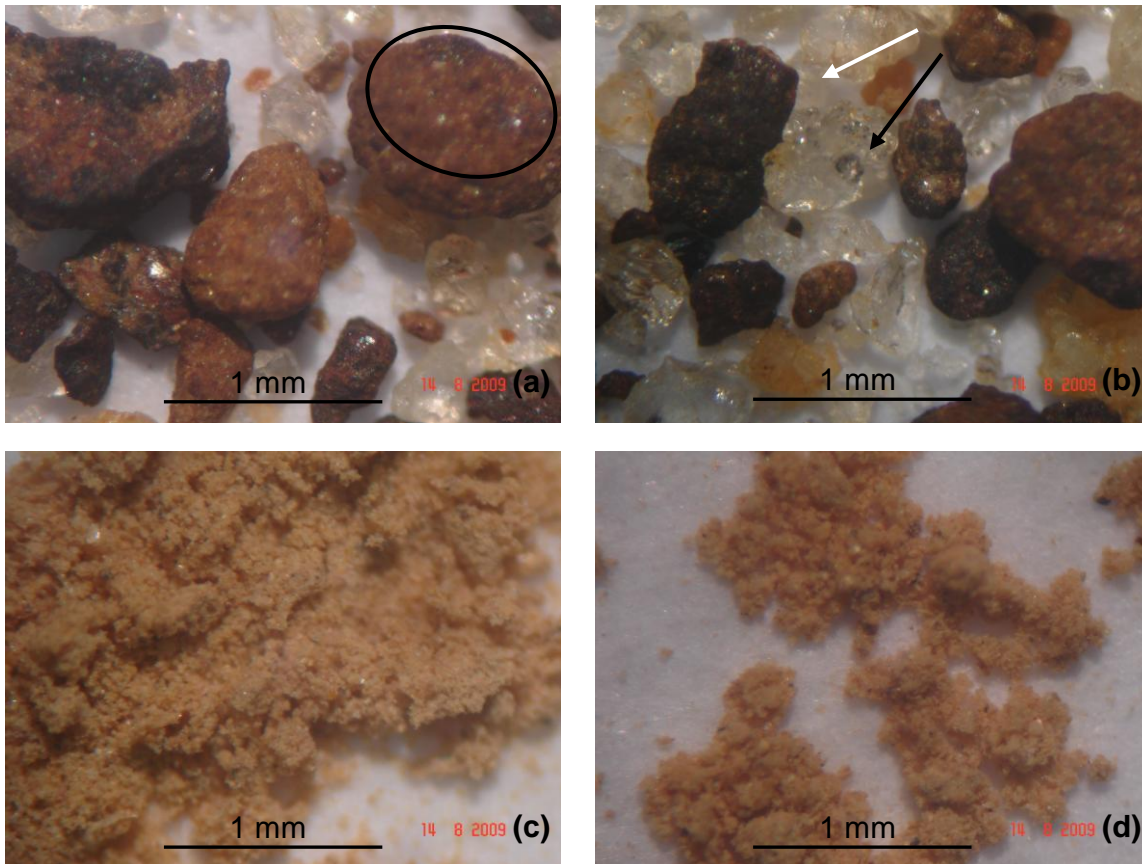


Figura 6.15: Micrografias obtidas por MO da argila **FR** . (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.

Na Figura 6.16 está apresentada a micrografia obtida por MO do argilito. São observadas partículas de diferentes tamanhos e de cor acinzentada, Figura 6.17 (a) e (b). Pode-se notar a presença de partículas de quartzo, indicadas pelas setas pretas, e também uma partícula avermelhada, indicada pela seta vermelha, associadas a minerais ferrosos como hidróxidos de ferro. É observada ainda, na Figura 6.17 (c) e (d), a presença de partículas de menor tamanho associadas ao argilomineral presente no argilito.

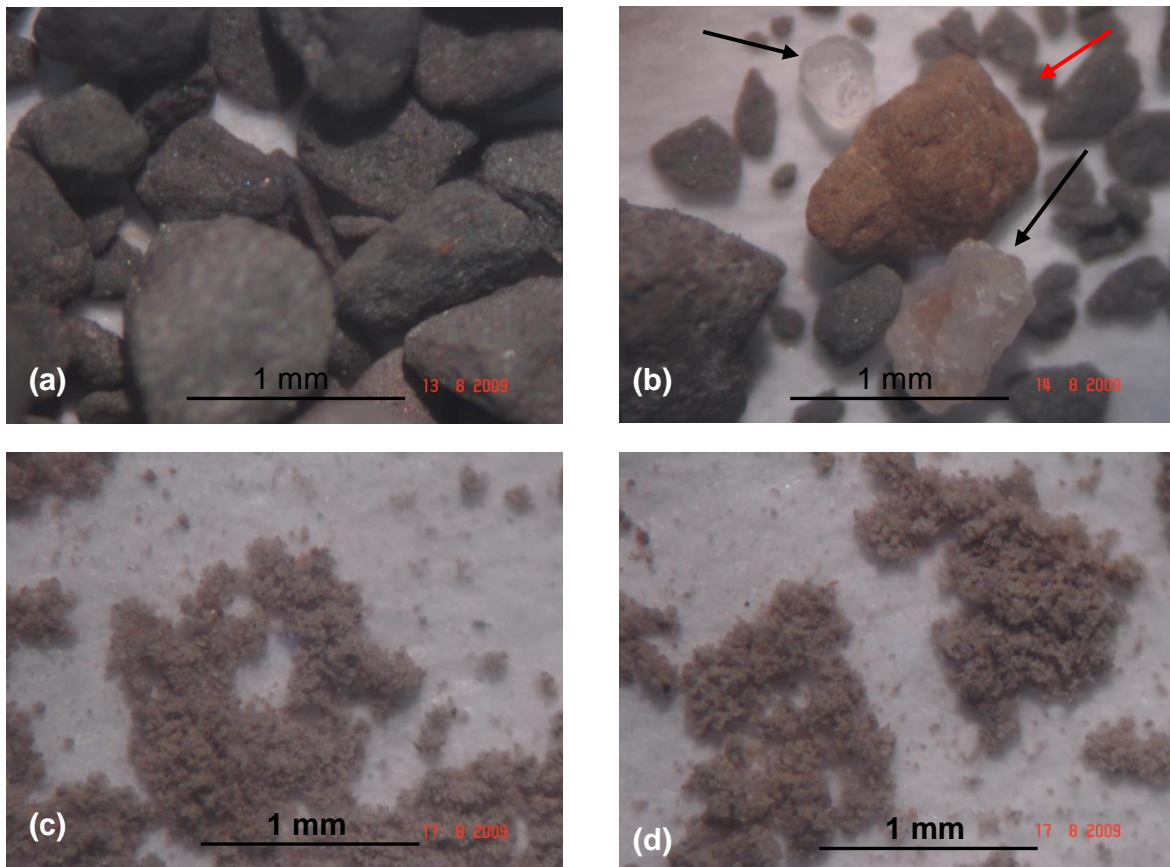


Figura 6.16: Micrografias obtidas por MO do argilito. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.

A análise morfológica por MO, apresentada na Figura 6.17, revela a presença de partículas avermelhadas resultado da trituração das peças que originaram o chamote. Além disso, pode-se notar a presença de quartzo, indicado por setas pretas, partículas com coloração mais escuras que podem estar associadas a minerais ferromagnesianos, provavelmente do grupo dos anfibólios e piroxênios indicados por setas brancas. E ainda, partículas de mineral micáceo, circundadas. As partículas de tamanho inferior a 0,063 mm possuem constituição similar às partículas mais grosseiras.

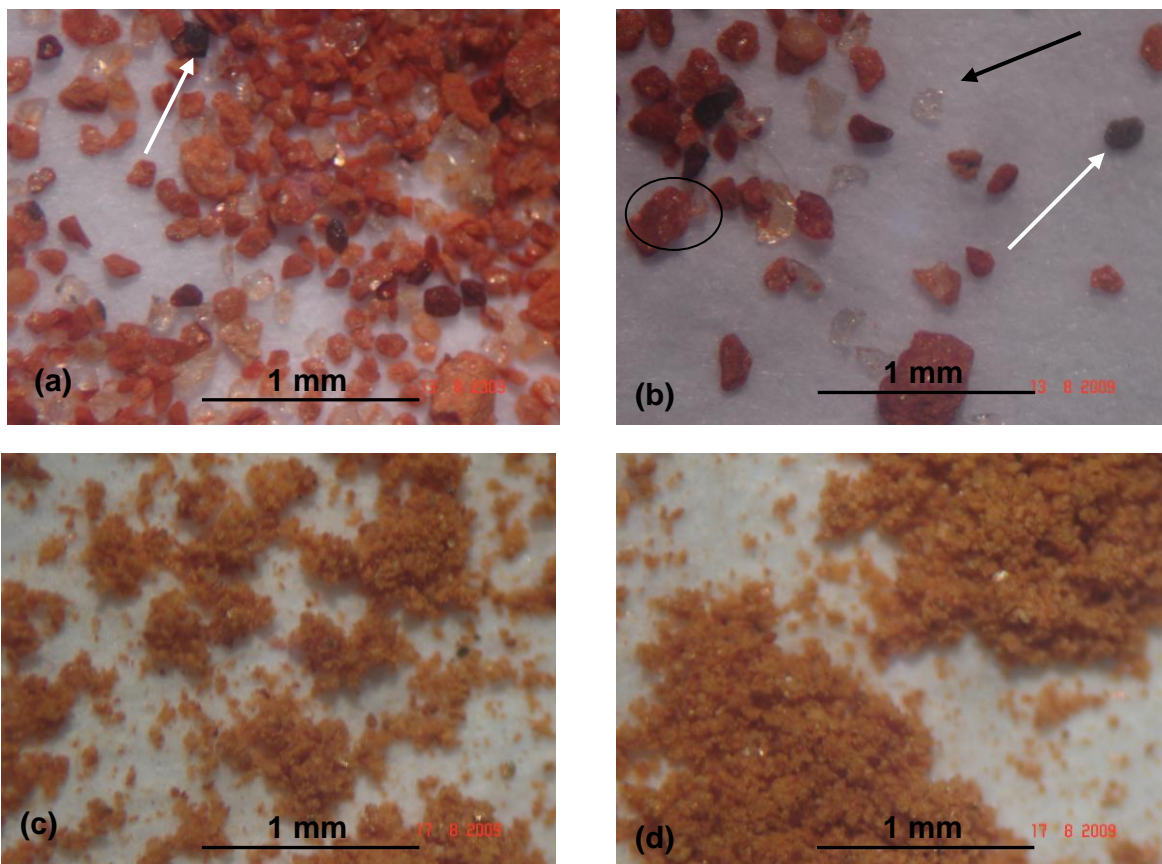
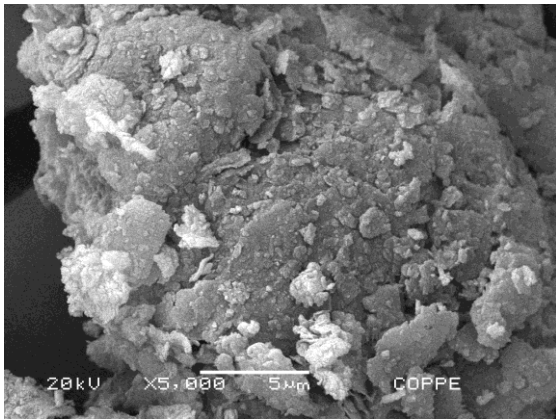


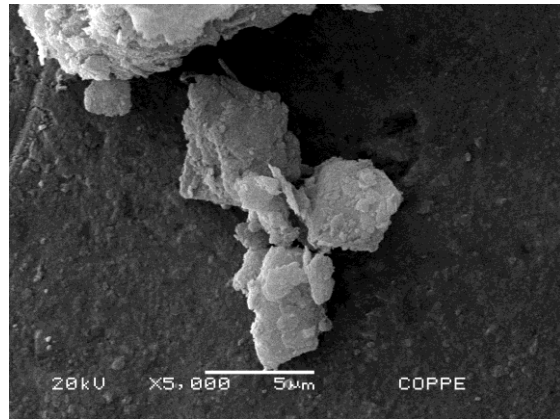
Figura 6.17: Micrografias obtidas por MO do chamote. (a) e (b) partículas retidas em 230 mesh; (c) e (d) partículas passantes em 230 mesh.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

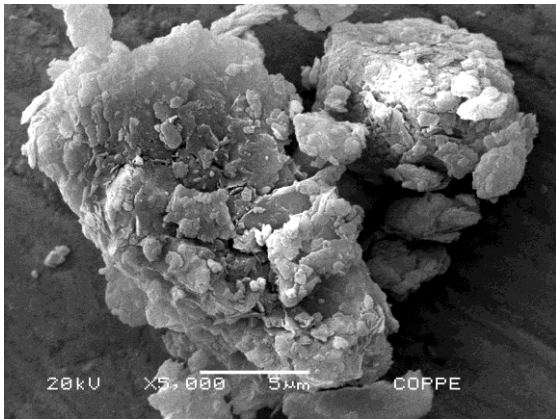
Na figura 6.18 estão apresentadas as micrografias obtidas por MEV das matérias-primas. Nota-se que a argila **FO**, a argila **FR** e o chamote, Figura 6.18 (a, b e d, respectivamente), apresentam pequenas partículas de morfologia pseudo-hexagonais associadas provavelmente a caulinita, argilomineral presente nas argilas e na argila que originou o chamote (Vieira *et al.*, 2004). O argilito, Figura 6.18 (c) é constituído, sobretudo por um agregado poroso de partículas.



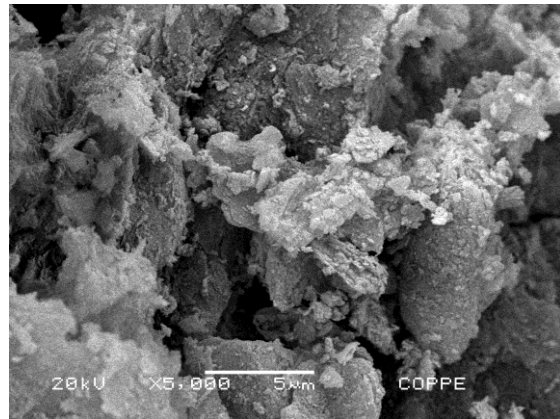
a



b



c



d

Figura 6.18: Micrografias obtidas por MEV da argila forte (a), argila fraca (b), argilito (c) e chamote (d).

6.2 - Propriedades físicas e mecânicas

6.2.1 - Plasticidade

A localização das argilas **FO** e **FR**, do argilito e das composições em função do teor de argilito e chamote adicionado à massa argilosa está apresentada na Figura 6.19. Esse gráfico foi elaborado a partir dos limites de Atterberg que indicam regiões de extrusão ótima e aceitável (Marsigli, 1997). O limite de plasticidade (LP) indica a quantidade mínima de água que deve ser adicionada à massa cerâmica para que essa massa seja conformada. O limite de liquidez (LL) indica a quantidade máxima de água que a massa cerâmica possa conter para que ainda possa ser moldada. O índice de plasticidade representa a diferença entre LL e LP indicando a faixa de consistência plástica.

Com a representação dos limites de Atterberg no gráfico é possível estudar o prognóstico de extrusão das matérias-primas e das composições. Pode-se observar que o argilito encontra-se abaixo da região aceitável e ótima para extrusão. Esse resultado indica que a sua incorporação à massa argilosa tende a diminuir a plasticidade das argilas atuando como um agente redutor de plasticidade. Já a argila **FO** situa-se acima da região aceitável e ótima para extrusão indicando que essa argila é de excessiva plasticidade. A argila **FR** localiza-se dentro da região aceitável de extrusão. Como o argilito e a argila **FR** apresentam granulometria mais grosseira que a argila **FO**, esses materiais quando usados em conjunto com a argila **FO** podem contribuir para diminuir a plasticidade dessa argila e assim ajudar a otimizar o processamento cerâmico.

A massa argilosa (**M**), composta por 50% em peso de argila **FO** e 50% em peso de argila **FR** situa-se no limite da região aceitável de extrusão. Essa localização permite inferir que a adição da argila **FR** contribuiu para diminuir a plasticidade da argila **FO**. A adição de 50% de argilito à massa argilosa (**M50A**) permitiu que essa composição fosse localizada dentro da região aceitável de extrusão indicando novamente que o argilito e a argila **FR** contribuíram para diminuição da plasticidade da argila **FO**.

A composição com 45% em peso de massa, 50% em peso de argilito e 5% em peso de chamote (**45M50A5CH**) ficou situada dentro da região ótima para extrusão. O chamote por ser um material não plástico (Dondi, 1997), mesmo apresentando pequena quantidade de caulinita em sua composição, contribuiu para a diminuição da plasticidade da massa. Esse resultado indica que, quando adicionado à massa, esse resíduo pode atuar como um controlador de plasticidade das argilas e ajudar a otimizar o processo de produção das cerâmicas na região de Campos dos Goytacazes.

A massa com 10% de chamote (**40M50A10CH**) ficou localizada no limite entre a região ótima e a região aceitável de extrusão. Tal localização sugere que a medida que se aumenta o teor de chamote há uma tendência de deslocamento das composições para a região aceitável de extrusão. Isso pode ser associado ao caráter não plástico do chamote que contribui para melhorar a trabalhabilidade das argilas. Assim, o uso do chamote na composição de massa pode contribuir para uma melhoria na etapa de conformação das peças cerâmicas com redução da quantidade de água de conformação adicionada e diminuição da retração de secagem, minimizando o eventual surgimento de trincas.

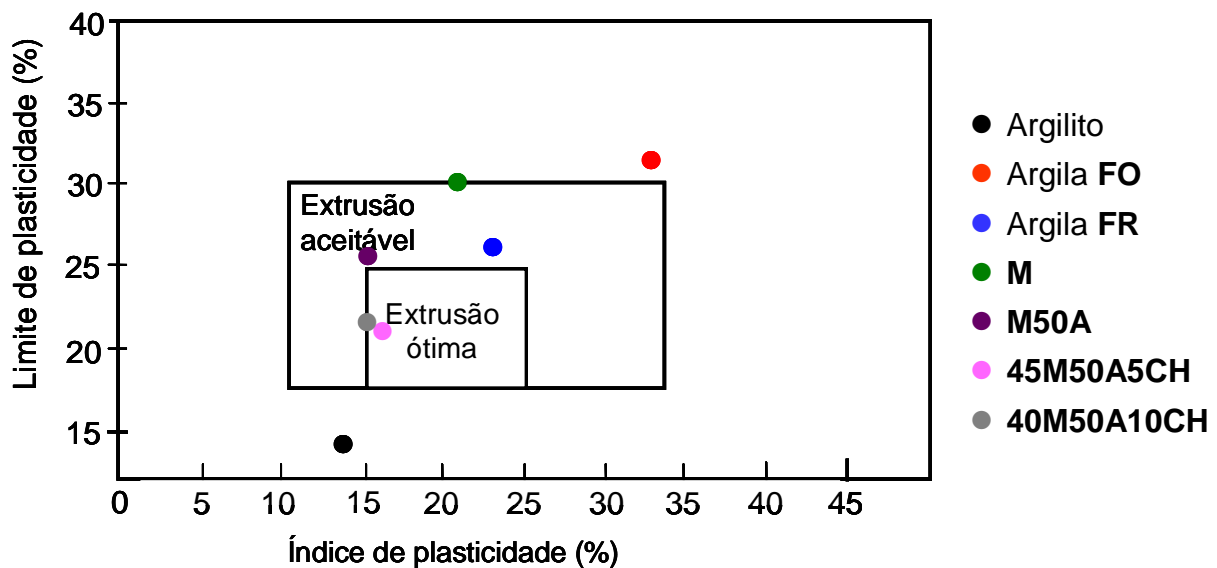


Figura 6.19: Prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg.

A Figura 6.20 apresenta a localização das matérias-primas e das composições investigadas no diagrama de Winkler. Nota-se que, apesar das matérias-primas situarem-se em diferentes regiões do diagrama, as composições apresentaram uma distribuição mais homogênea.

De acordo com esse diagrama, a composição **M** ficou situada na região 4, indicada para a fabricação de manilha. Já as composições **M50A** e **45M50A5CH** localizaram-se na região 3 apropriada para a produção de telhas. A composição **40M50A10CH** localizou-se na área limite entre a produção telhas e blocos de vedação. Como esse diagrama é baseado na granulometria das matérias-primas pode-se inferir que com o aumento da quantidade de material com granulometria mais grosseira, como o argilito e o chamote, a fabricação de produtos de maior valor agregado, como telhas, é favorecida.

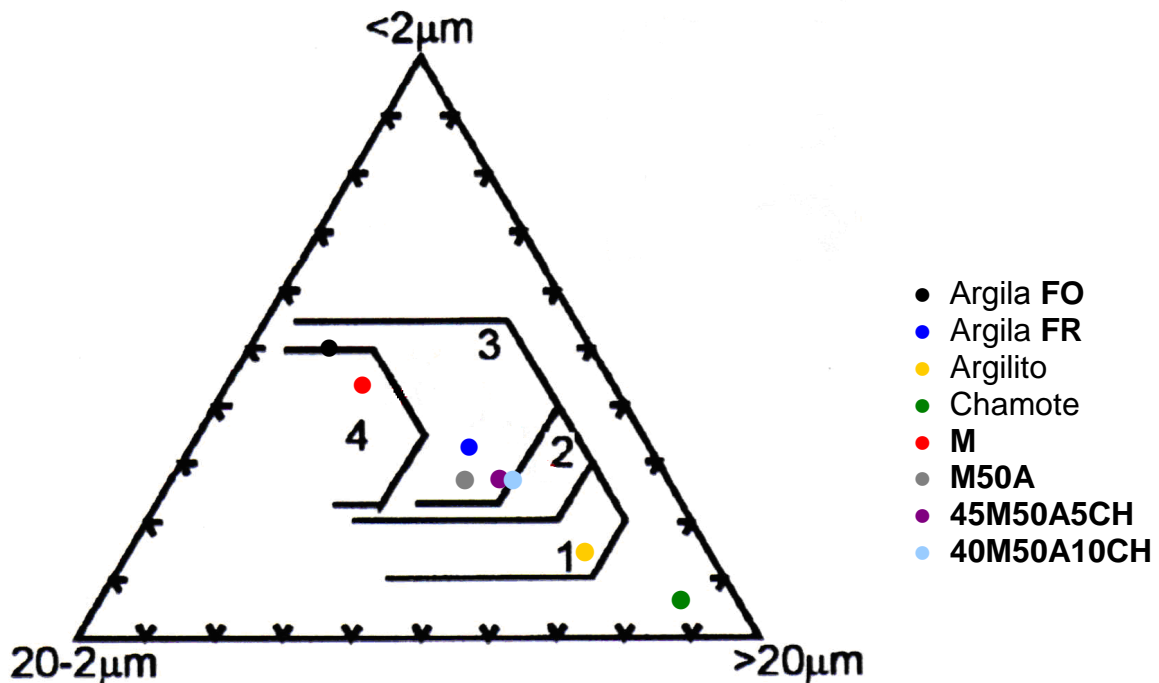


Figura 6.20: Diagrama de Winkler para a argila **FO**, argila **FR**, argilito, chamote e composições investigadas.

6.2.2 - Massa específica aparente das peças secas e queimadas (MEA).

A Tabela 6.2 apresenta os valores de massa específica aparente a seco dos corpos de prova. A faixa de variação **I** para a massa específica foi igual a 1,99 a 2,05 g/cm³, e para a massa específica **II** foi de 2,18 a 2,23. A adição de argilito e 10% em peso de chamote provocou um leve aumento na massa específica na faixa de variação **I** em relação a composição **M**, entretanto quando se adicionou 5% de chamote não foi observada praticamente nenhuma variação para esse parâmetro. Na faixa de variação **II**, nota-se que a adição de argilito provocou maior aumento na massa específica em relação a composição **M**, seguido da adição de 5% e 10% em peso de chamote, respectivamente.

O ligeiro aumento na massa específica indica que os corpos de prova da faixa de variação **II** apresentam um melhor empacotamento das partículas durante a etapa de conformação. Esse melhor empacotamento pode ser benéfico pois pode contribuir para uma melhor consolidação das partículas na etapa de queima melhorando as propriedades tecnológicas.

Tabela 6.2: Massa específica aparente dos corpos de prova a seco.

Massa Específica Aparente (g/cm ³)		
Composições	I	II
M	1,99 ± 0,03	2,18 ± 0,01
M50A	2,05 ± 0,02	2,23 ± 0,01
45M50A5CH	1,99 ± 0,02	2,21 ± 0,04
40M50A10CH	2,01 ± 0,02	2,20 ± 0,02

Na Tabela 6.3 está apresentada a massa específica aparente dos corpos de prova queimados a 850, 950 e 1050°C. Nota-se que com a queima, a massa específica diminuiu tanto para a faixa de variação **I** quanto para faixa de variação **II** em relação aos corpos de prova secos.

O aumento da temperatura provocou alterações significativas tanto na faixa de variação I quanto na faixa de variação II. Os maiores valores de massa específica foram observados na temperatura de 1050°C. Nessa temperatura, os processos de sinterização estão bem avançados, então há uma maior formação de fase líquida diminuindo a porosidade do material (Monteiro e Vieira, 2004).

Tabela 6.3: Massa específica aparente dos corpos de prova queimados a 850, 950 e 1050°C.

Composições	Massa Específica Aparente (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±0,04	1,98±0,02	2,05±0,02	2,20±0,03
M50A	1,96±0,03	1,97±0,04	2,16±0,03	2,08±0,04	2,10±0,03	2,30±0,08
45M50A5CH	1,88±0,02	1,91±0,03	2,23±0,02	2,03±0,02	2,06±0,02	2,31±0,02
40M50A10CH	1,91±0,02	1,96±0,01	2,26±0,01	2,05±0,02	2,08±0,01	2,39±0,03

6.2.3 – Absorção de Água

A Figura 6.21 apresenta o comportamento da absorção de água na faixa de variação I de massa específica das cerâmicas queimadas. Na temperatura de 850°C, observa-se, que com a adição de 50% em peso de argilito, houve uma queda da absorção de água em relação à massa argilosa. Esse comportamento pode ser atribuído à menor perda de massa do argilito e ao maior teor de fundentes em comparação com as argilas caulínicas (Pinheiro *et al.*, 2010). Quando se adicionou 5% de chamote a absorção aumentou, sem, entretanto, alcançar o valor correspondente ao da cerâmica de massa argilosa. Posteriormente, com a adição de 10% de chamote não foi observada variação significativa em relação a massa **M50A**. Já em relação a massa **M**, houve uma discreta redução desse parâmetro. A 850°C as reações de sinterização ainda estão em estágio inicial e as partículas de chamote começam se comportar como

argila. Com isso as transformações de fases, que começam a ocorrer nessa temperatura, podem causar um aumento de porosidade acarretando em aumento na absorção de água (Vieira *et al.*, 2009)

A 950°C, com a adição de argilito à massa, também foi observado que a absorção de água apresentou uma leve queda em relação à massa argilosa. Entretanto essa diminuição não foi tão significativa, dentro de um erro estatístico. Quando se adicionou 5% e 10% de chamote, dentro de um erro estatístico, não foi observada diferença significativa para este parâmetro em relação a composição **M50A** e a composição **M**. A similaridade nos valores de absorção à 950°C indica que nessa temperatura praticamente não ocorre variação significativa da porosidade aberta da cerâmica para diferentes composições.

Na temperatura de 1050°C, nota-se que com a adição de argilito houve uma redução de 5,2% da absorção de água em relação a massa argilosa. O argilito, por apresentar elevados teores de óxidos fundentes, auxilia na diminuição do ponto de fusão das cerâmicas contribuindo para formação de fase líquida e, conseqüentemente, diminui a porosidade aberta (Pinheiro, 2010). Quando se adicionou 5 e 10% de chamote, a absorção de água teve uma pequena queda que está associada aos processos de sinterização. A 1050°C argilas de Campos dos Goytacazes apresentam uma brusca redução de porosidade devido aos processos de vitrificação (Monteiro e Vieira, 2004).

Na Figura 6.22 está apresentada a absorção de água na faixa de variação **II** de massa específica das cerâmicas queimadas. Nota-se que os valores de absorção de água, para todas as temperaturas, foram menores que os observados na faixa de variação **I** de massa específica. Isso se deve as reações de difusão que possibilitou uma redução da porosidade (Vieira *et al.*, 2009).

A 850°C, com a adição de argilito à massa argilosa, há uma queda da absorção de água. Esse mesmo comportamento também foi observado para a faixa de variação **I** de massa específica. Essa queda pode ser atribuída ao maior teor de óxidos fundentes do argilito. Com a adição de chamote, nas duas quantidades, não foi observada variação significativa para essa propriedade,

dentro de um erro estatístico, em relação a composição **M50A**. Já em relação a composição **M** houve uma redução de quase 5% na absorção de água.

Na temperatura de 950°C, assim como na de 850°C, observa-se uma queda da absorção quando se adicionou o argilito. Porém quando se adicionou 5% de chamote observou-se um ligeiro aumento desse parâmetro. Esse aumento pode estar associado às transformações de fases sofridas pelo chamote durante a queima. A adição de 10% de chamote não alterou significativamente a absorção de água em relação a composição **M50A**, entretanto, em relação a composição **M**, houve uma queda de 5%.

Em 1050°C, foram observados os menores valores de absorção de água em todas as composições, sendo que a composição **40M50A10CH** apresentou menor valor sendo igual a 2,8%, uma redução de 10,5% em relação à massa argilosa. Esses valores mais baixos, obtidos para esse parâmetro, estão associados a formação de fases líquida que diminui a porosidade da cerâmica (Monteiro e Vieira, 2004).

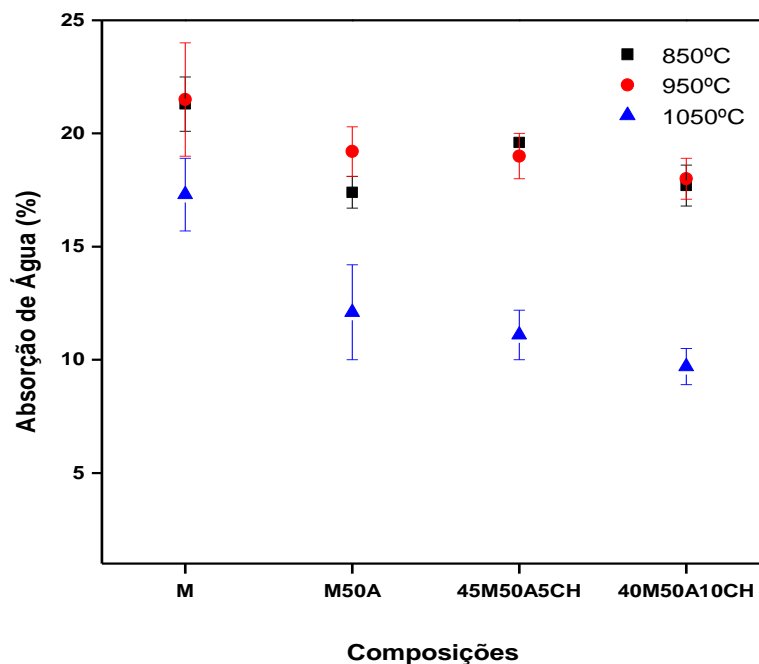


Figura 6.21: Absorção de água na faixa de variação I de massa específica das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C).

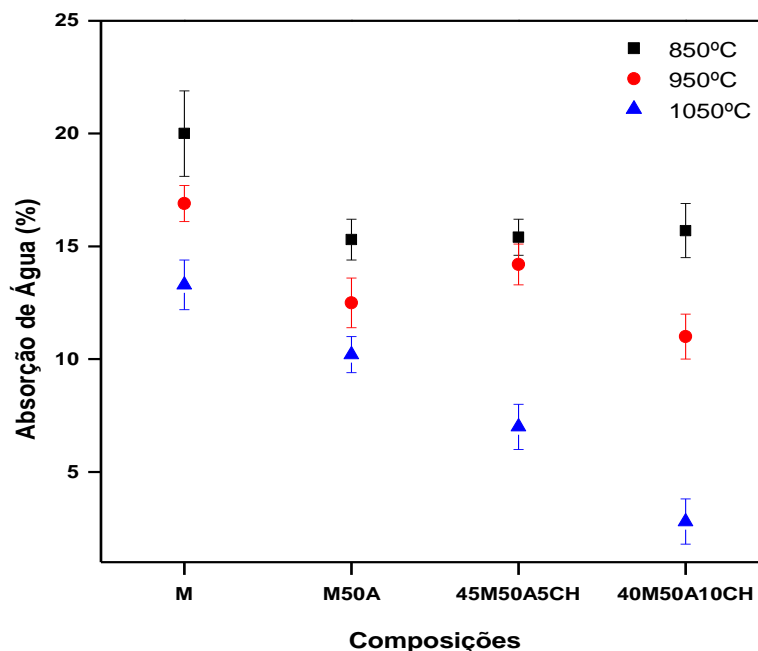


Figura 6.22: Absorção de água na faixa de variação II de massa específica das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C).

De maneira geral, tanto na faixa de variação I como na faixa de variação II de massa específica, os melhores resultados para absorção de água foram obtidos na temperatura de 1050°C. Tal resultado está associado às reações de sinterização que nesta temperatura estão em estágio avançado (Vieira *et al.*, 2009).

No Brasil ainda não existe legislação para produção de adoquim cerâmico assim, a norma utilizada nesse trabalho é a mesma para produção de PPC (ABNT 97810/1987) e essa norma não estabelece valores mínimos de absorção. Desse modo, todas as formulações e temperaturas estudadas poderiam ser indicadas para a produção do intertravado de cerâmica e seu uso para pavimentação de qualquer tipo de via. De acordo com as normas americanas, colombianas e espanholas para a produção de adoquim, os valores de absorção de água obtidos nesse estudo estariam fora dos valores requisitados.

6.2.4 – Retração Diametral de Queima

Na Figura 6.23 está apresentada a retração diametral de queima na faixa de variação I de massa específica das cerâmicas em função das temperaturas estudadas. A adição de argilito à massa provocou uma redução da retração, cerca de 0,4%, em relação à massa argilosa na temperatura de 850°C. Esse comportamento por estar relacionado ao início do processo de sinterização e também a substituição de parte do material argiloso por um material com menor perda ao fogo (Acchar, 2006). A adição de 5 e 10% de chamote não alterou significativamente a retração em relação à composição com 50% de argilito. Em relação a massa argilosa a adição de chamote contribuiu para reduzir a retração diametral.

Comportamento semelhante foi observado nas composições queimadas a 950°C. Entretanto a adição de argilito provocou uma redução na retração de 0,6% em relação à massa argilosa. Com relação à adição de chamote, nas duas quantidades avaliadas, também não foi observada variação significativa em relação a composição **M50A**. Entretanto, em relação a composição **M** houve uma diminuição da retração de aproximadamente 0,5%.

Finalmente a 1050°C, nota-se que a adição de argilito não provocou alteração significativa para este parâmetro. Quando se adicionou 5% de chamote pôde-se observar um aumento pronunciado na retração diametral em relação a composição **M50A** que pode estar associado a formação de fase líquida. Com a adição de 10% de chamote observou-se um aumento de cerca de 1,7% na retração diametral em relação a massa com 50% de argilito e uma redução desse parâmetro em relação a massa argilosa de 2%. Esse comportamento pode ser explicado pela granulometria mais grosseira do chamote que reduz a cinética de sinterização e, além disso, pela diminuição da quantidade de material argiloso e aumento da quantidade de chamote que é um material mais estável (Acchar, 2006).

Na Figura 6.23 observa-se ainda que as barras de erro para a composição **M** e **M50A** estão elevadas. Isso se deve provavelmente a defeitos dimensionais nas peças e variação da temperatura no interior do forno.

A Figura 6.24 apresenta retração diametral de queima na faixa de variação **II** de massa específica das cerâmicas em função das composições estudadas. A 850°C não foram observadas variações significativas para esse parâmetro à medida que se adicionou argilito e chamote. O maior grau de empacotamento a seco das partículas pode ser o responsável por essa variação pouco significativa.

A 950°C o comportamento de retração de queima foi similar ao observado na faixa de variação **I** de massa específica. A adição de argilito à massa argilosa também provocou uma diminuição da retração, entorno de 0,7%, assim como observado na Figura 6.23. A adição de chamote não provocou variações significativas na retração diametral de queima em relação a composição **M50A**. Entretanto, com relação a massa argilosa, a adição de chamote, nas duas proporções promoveu uma diminuição da retração. Isso se deve, provavelmente, a granulometria mais grosseira do chamote que dificulta os processos de sinterização (Vieira *et al.*, 2009).

Na temperatura de 1050°C, não foi observada uma variação significativa, dentro de um erro estatístico, na retração diametral de queima quando se adicionou 50% de argilito à massa. Quando se adicionou 5 e 10% chamote também não foi observada nenhuma variação significativa em relação a composição **M50A**. Porém, em relação a composição **M** nota-se que a medida que se adicionou chamote houve um discreto aumento na retração. Essa tendência pode estar associada as reações de sinterização do chamote (Vieira *et al.*, 2004).

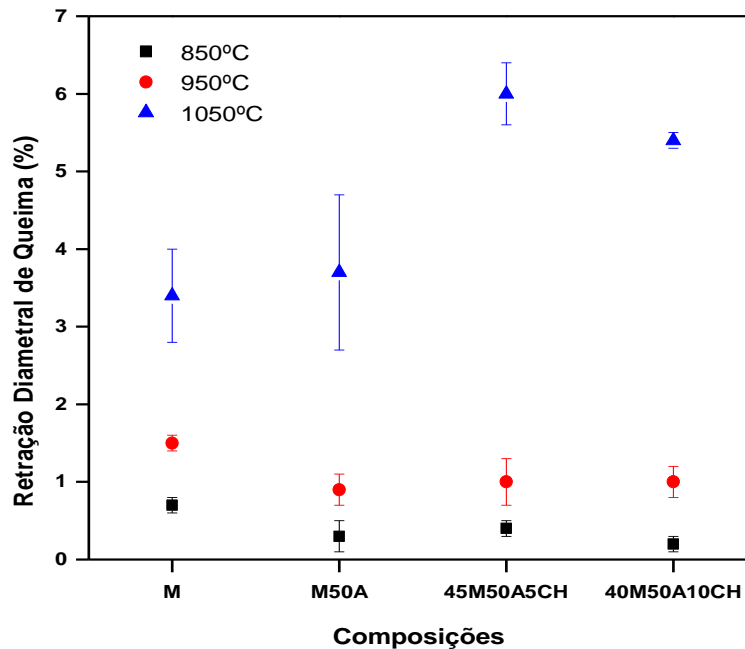


Figura 6.23: Retração diametral de queima das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C) na faixa de variação I de massa específica.

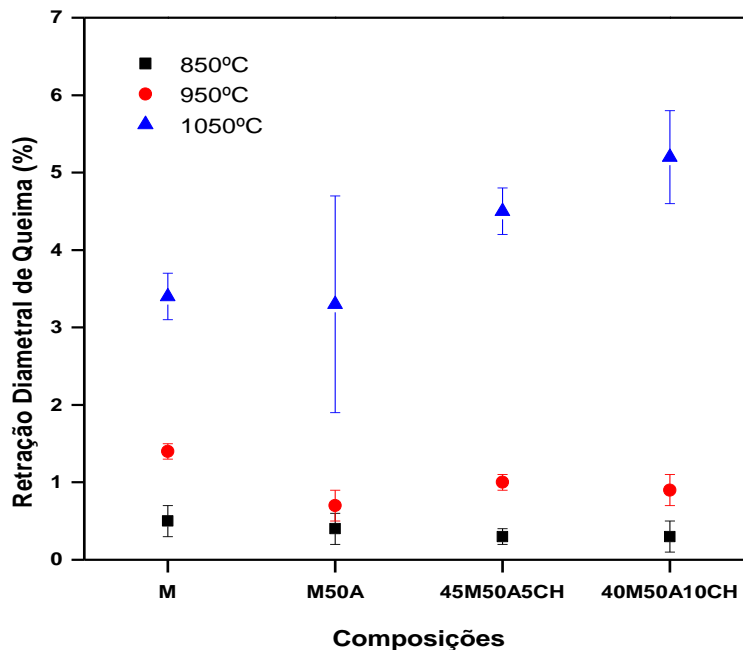


Figura 6.24: Retração diametral de queima das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C) na faixa de variação II de massa específica.

6.2.5 – Resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima na faixa de variação I de massa específica está apresentada na Figura 6.25. Nas as três temperaturas investigadas, a adição do argilito promoveu um aumento na resistência à compressão uniaxial em relação a 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, 2010).

Já com a adição de 5 e 10% de chamote, nas temperaturas de 850 e 950°C, observa-se uma redução da resistência em relação à massa com 50% de argilito e em relação a massa argilosa. Essa redução se deve provavelmente as partículas mais grosseiras do chamote que atuam como ponto de concentração de tensão (Vieira *et al.*, 2009). Além disso, esse comportamento pode ser associado à porosidade interna, porosidade intragranular e aglomerados de chamote que agem como grandes defeitos em combinação com a maior porosidade intergranular, e também ao processo de sinterização ineficiente (Vieira *et al.*, 2009).

A 1050°C nota-se que tanto a adição de argilito, quanto a adição de chamote, 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 – vitrificação (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). Assim, quanto mais lento for o ciclo de queima e maior for a temperatura utilizada, maior será a formação de fase líquida, resultando em um melhor produto acabado (Gouveia, 2008). Porém, vale ressaltar que tais medidas tornam a produção mais lenta e onerosa.

A resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima na faixa de variação II de massa específica está

apresentada na Figura 6.26. Todos os valores de resistência apresentados foram superiores a 50 MPa, esse mesmo padrão não foi observado na faixa de variação **I** de massa específica uma vez que os valores máximos de resistência não ultrapassaram 55 MPa. 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.

Na temperatura de 850°C, a adição de argilito provocou um discreto aumento da resistência em relação à massa argilosa. Com a adição de 5 e 10% de chamote observou-se uma redução da resistência indicando que, assim como na faixa de variação **I** de massa específica, o chamote atuou com concentrador de tensão diminuindo os valores desse parâmetro em relação à composição **M50A**. Em relação à composição **M**, a adição de chamote não provocou alterações significativas.

A 950°C tanto a adição de argilito quanto a adição de chamote, 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 70 MPa 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. A adição de chamote nas duas proporções à composição **M50A**, dentro de um erro estatístico, não alterou de maneira expressiva a resistência mecânica. A adição de chamote, nas duas quantidades, à massa argilosa provocou um aumento desse parâmetro. Esse comportamento pode estar associado ao processo de vitrificação que contribui para diminuir a porosidade do material e aumentar a resistência mecânica (Vicenzi, 1999).

Na Figura 6.26 pode-se observar ainda 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.

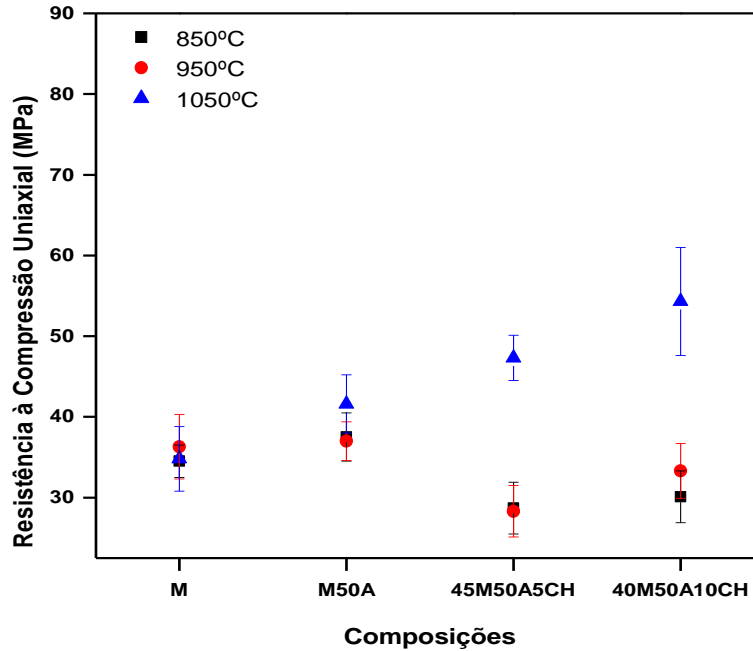


Figura 6.25: Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950, 1050°C) na faixa de variação I de massa específica.

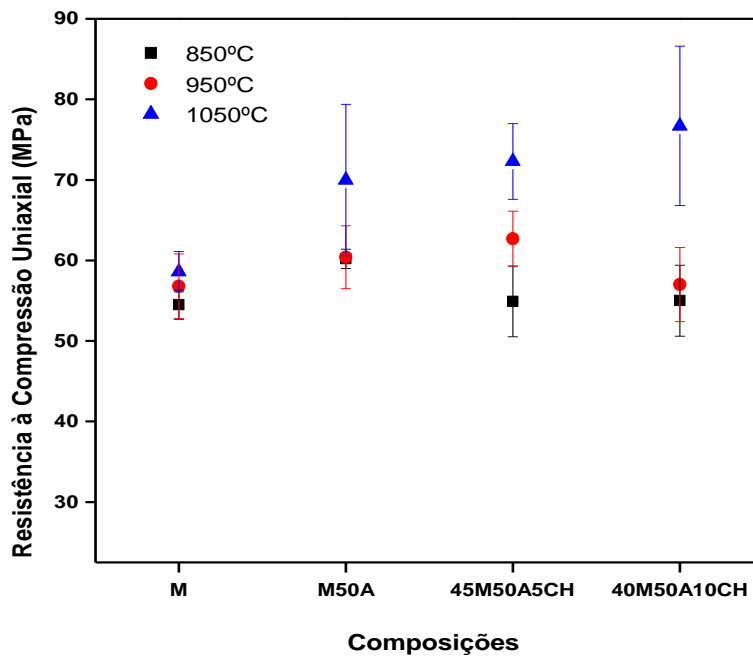


Figura 6.26: Resistência à compressão uniaxial das cerâmicas em função das temperaturas de queima (850, 950 e 1050°C) na faixa de variação II de massa específica.

Os valores obtidos de resistência à compressão na faixa de variação I de massa específica indicam que a formulação **M** queimada a 850°C, **45M50A5CH** e **40M50A10CH** 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 35 MPa de acordo com a ABNT 97810/1987. A formulação **M** queimada a 1050°C apresentou valor próximo a 35 MPa. Já a formulação **M** queimada a 950°C, **M50A** queimada nas três temperaturas, e as formulações **45M50A5CH** e **40M50A10CH** queimadas a 1050°C, seriam indicadas para a produção do intertravado de cerâmica para pavimentação de vias com tráfego de veículos comerciais, uma vez que os valores de resistência apresentados foram iguais ou superiores a 35 MPa.

Ainda segundo a norma da ABNT valores de resistência iguais ou superiores a 50 MPa 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.

De acordo com a ASTM C 902/2006, 20,7 MPa é o valor mínimo aceitável de resistência mecânica para a fabricação de adoquim utilizado em ambientes exteriores não submetidos a temperaturas frias e também em ambientes interiores. Para a NTC 3829/2002, 20,7 MPa também é o valor mínimo aceitável de resistência à compressão para adoquim usado em pavimentação de vias de tráfego de pedestres. 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 da formulação **M** assim como as formulações **M50A**, **45M50A5CH** e **40M50A10CH** queimadas em todas as temperaturas indicam que essas formulações, nas duas faixas de variação de massa específica e queimadas nas três temperaturas, poderiam ser utilizadas

para a produção de adoquim para a pavimentação de vias de tráfego de pedestres.

6.3 – Microestrutura das Cerâmicas Queimadas

6.3.1 – Microscopia ótica

As micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 850°C e 1050°C na faixa de variação I de massa específica está apresentada na Figura 6.27 e Figura 6.28, respectivamente. A Figura 6.29 e 6.30 apresenta as micrografias das cerâmicas queimadas a 850 e 1050°C na faixa de variação II de massa específica. De maneira geral, observa-se uma cor avermelhada em todas as cerâmicas devido à presença de óxidos de ferro presentes na argila e no argilito conforme indicado na composição química. Além disso, é observada a presença de quartzo (setas brancas), partículas pretas, provavelmente compostos de ferro (setas pretas), partículas avermelhadas, provavelmente hematita (circuladas em branco) oriundas possivelmente da desidratação do hidróxido de ferro (Vieira e Monteiro, 2002). E também, são observadas partículas de cor cinza (circuladas de preto) oriundas do argilito.

O quartzo e a hematita, assim como o chamote, podem atuar como partículas inertes e se tornarem pontos de concentração de tensão, ocasionando o aparecimento de trincas que podem comprometer a resistência do material (Vieira e Monteiro, 2004). Entretanto, de maneira geral, nessas micrografias, não foram observadas influências negativas dessas partículas sobre o material.

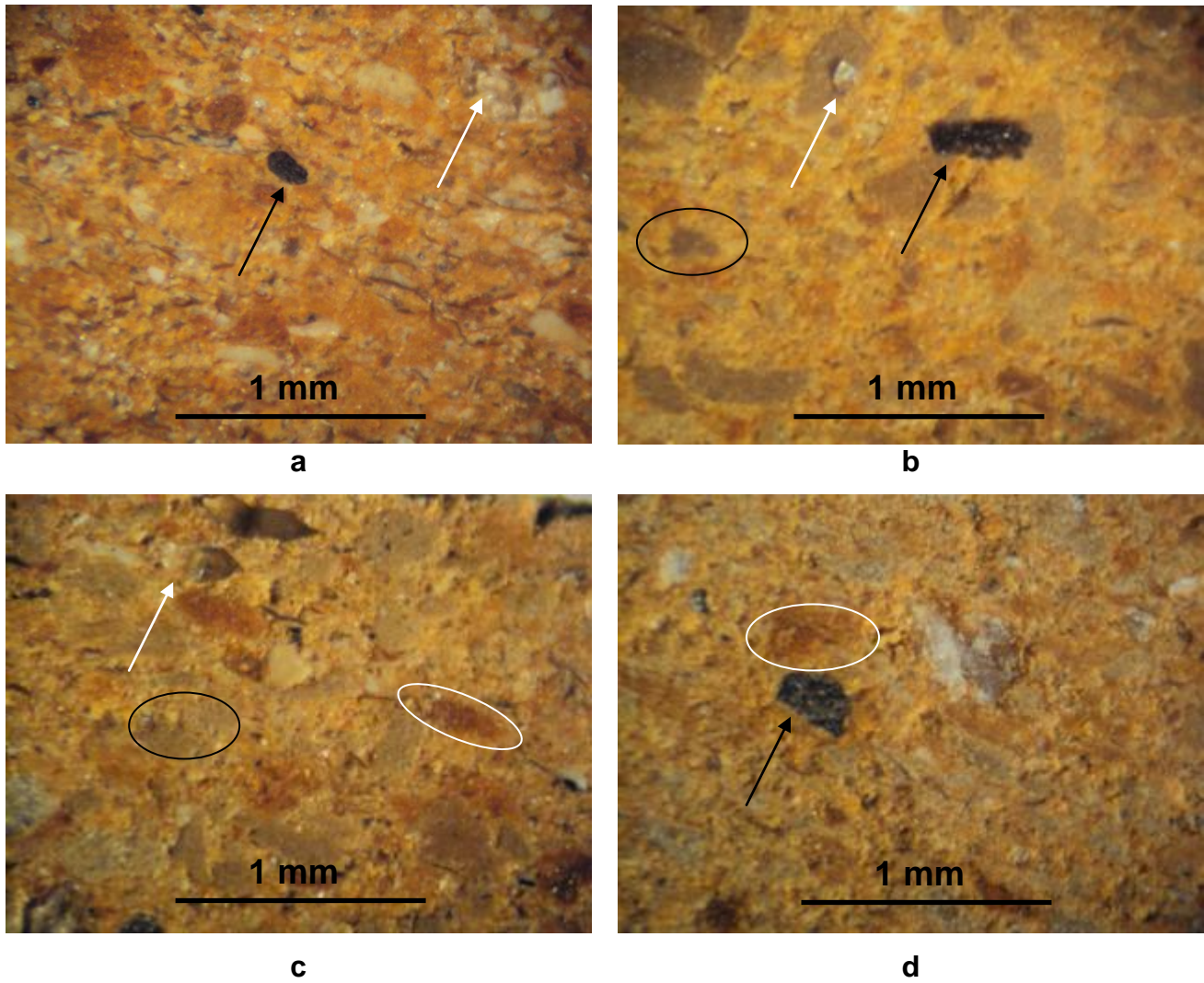


Figura 6.27: Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 850°C na faixa de variação I de massa específica. (a) **M**; (b) **M50A**; (c) **45M50A5CH**; (d) **40M50A10CH**. Aumento: 6,5 x.

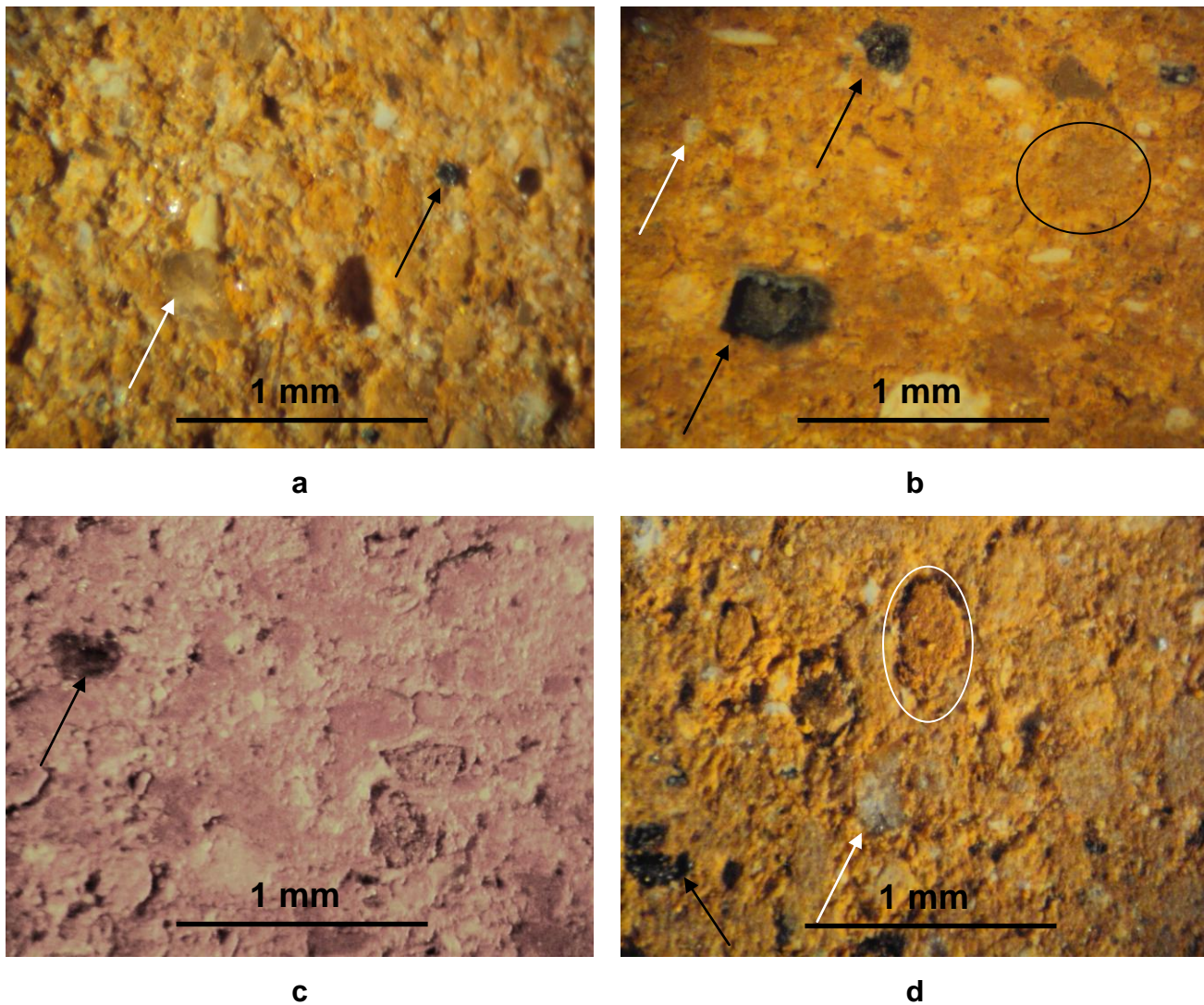


Figura 6.28: Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 1050°C na faixa de variação I de massa específica. (a) **M**; (b) **M50A**; (c) **45M50A5CH**; (d) **40M50A10CH**. Aumento: 6,5 x.

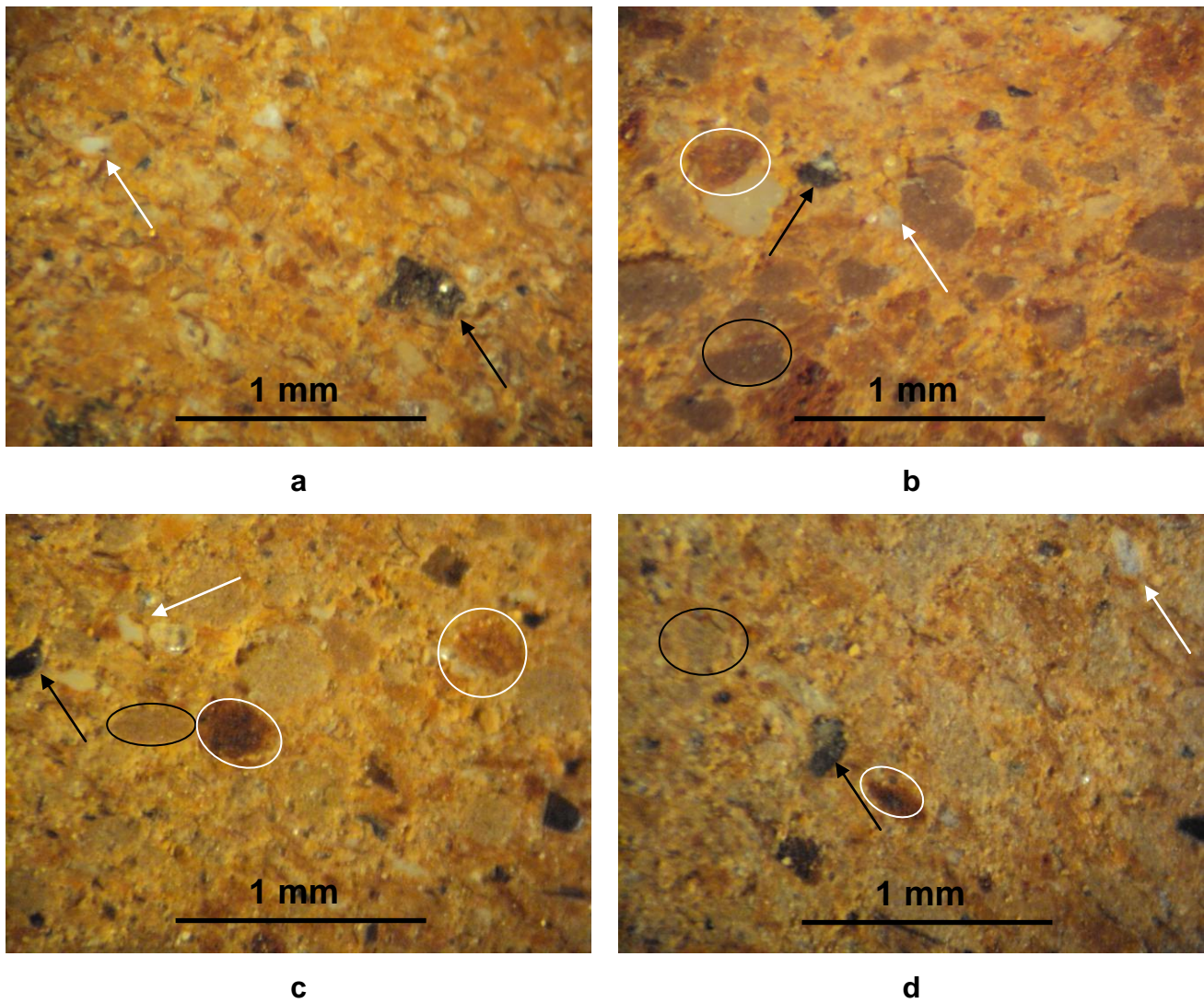


Figura 6.29: Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 850°C na faixa de variação II de massa específica. (a) **M**; (b) **M50A**; (c) **45M50A5CH**; (d) **40M50A10CH**. Aumento: 6,5 x.

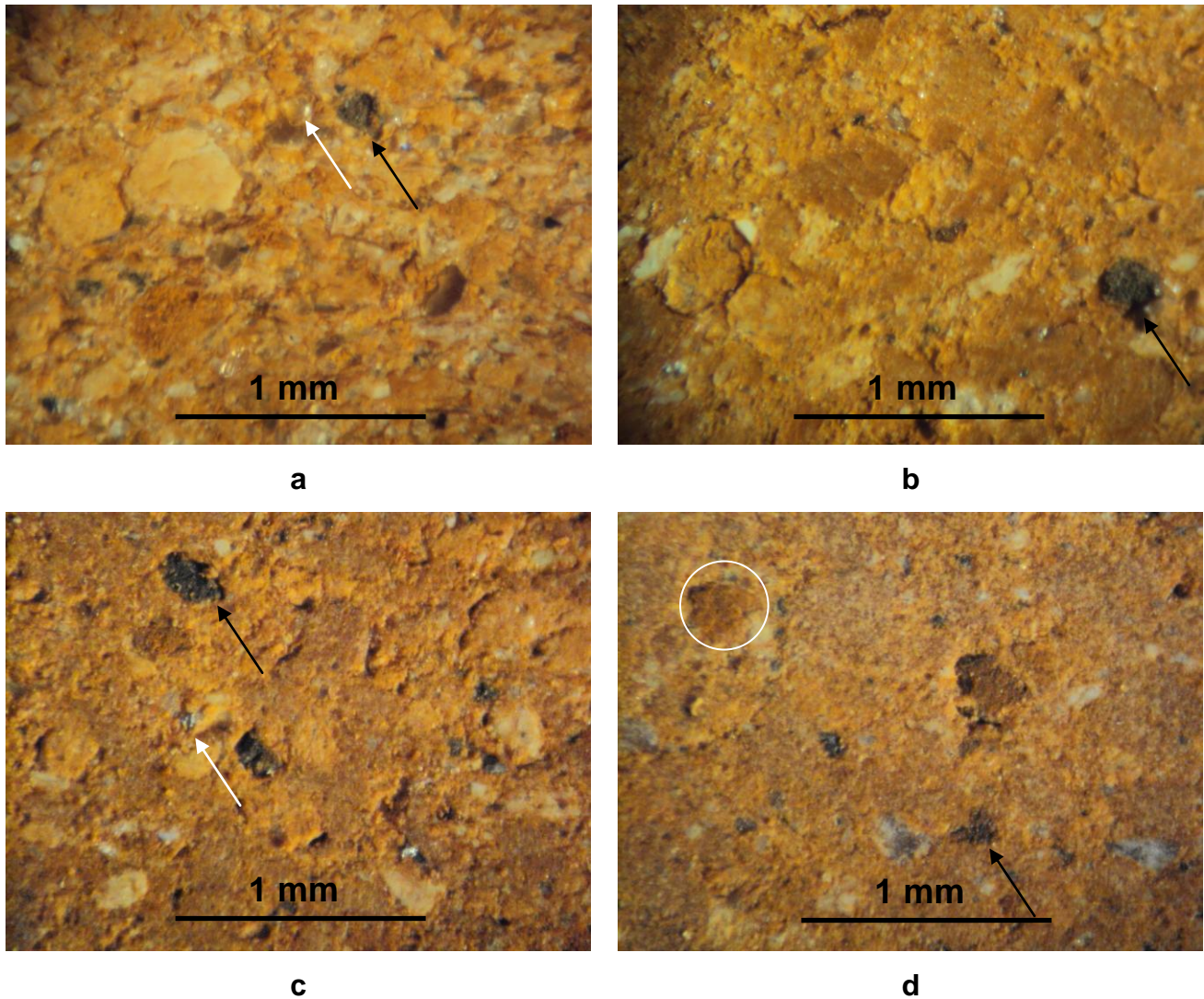


Figura 6.30: Micrografias de MO das cerâmicas queimadas a 1050°C na faixa de variação II de massa específica. (a) **M**; (b) **M50A**; (c) **45M50A5CH**; (d) **40M50A10CH**. Aumento: 6,5 x.

Devido às limitações da técnica de MO, as micrografias não revelaram grandes diferenças nas peças queimadas. Entretanto, como observado nas propriedades tecnológicas a variação da massa específica afetou significativamente a estrutura dos materiais.

6.3.2 – Microscopia Eletrônica de Varredura

As micrografias obtidas por MEV das composições **M**, **M50A** e **40M50A10CH** queimadas a 850°C na faixa de variação **I** de massa específica, bem como os espectros de EDS estão apresentadas nas Figuras 6.31, 6.32 e 6.33, respectivamente. De maneira geral, as três composições apresentam uma microestrutura semelhante com regiões de falhas com uma morfologia grosseira associada a partículas rugosas e poucas áreas lisas. Pode-se verificar também que todas as cerâmicas apresentam falhas inerentes à compactação e que ainda estão presentes devido à sinterização ineficiente.

As cerâmicas vermelhas queimadas em temperaturas inferiores a 970°C não apresentam uma consolidação estrutural eficiente apresentando regiões de porosidade e rugosidade (Vieira e Monteiro, 2007).

A análise por EDS do ponto 1 da Figura 6.34 mostra uma matriz, constituída, sobretudo, por uma fase amorfa de aluminossilicato com quartzo, hematita e mica muscovita como será apresentado mais adiante no difratograma de raios-x das amostras queimadas. O ponto 2 revela que a partícula mapeada provavelmente é quartzo devido à presença de Si e O. Pode-se observar ainda, falhas ao redor da partícula. Essas falhas podem contribuir para diminuir a resistência mecânica das cerâmicas. A presença de platina (Pt) se deve a metalização da amostra.

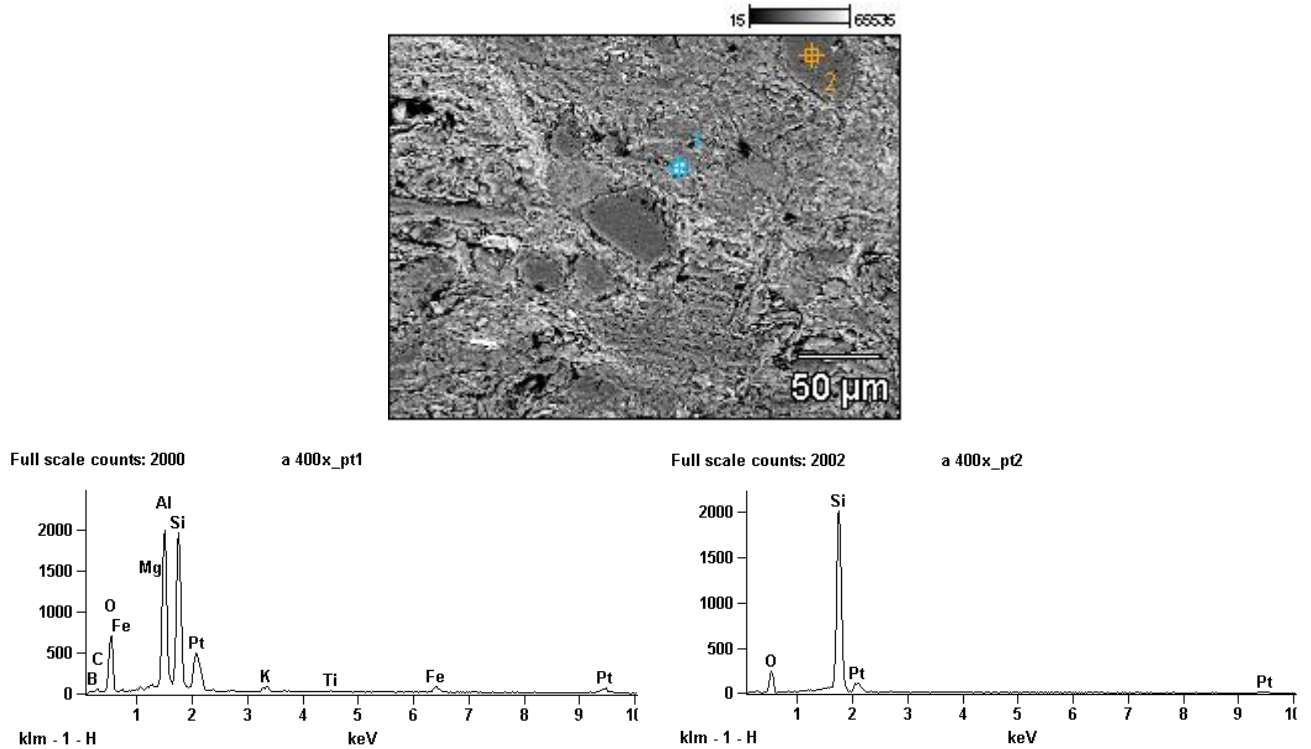


Figura 6.31: Micrografia de MEV da formulação **M** queimada a 850°C, na faixa de variação **I** de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

O mapeamento por EDS da composição **M50A**, apresentado na Figura 6.32, revela, assim como observado na Figura 6.31, a presença de uma matriz amorfa de aluminossilicato e compostos de ferro, provavelmente hematita, ponto 1, e partículas de quartzo dispersas na matriz, ponto 2. Ao redor da partícula de quartzo são observadas regiões de falhas e trincas. A presença dessas regiões não afetou a resistência à compressão pois a composição **M50A** apresentou valores de resistência mecânica maiores que a composição **M**.

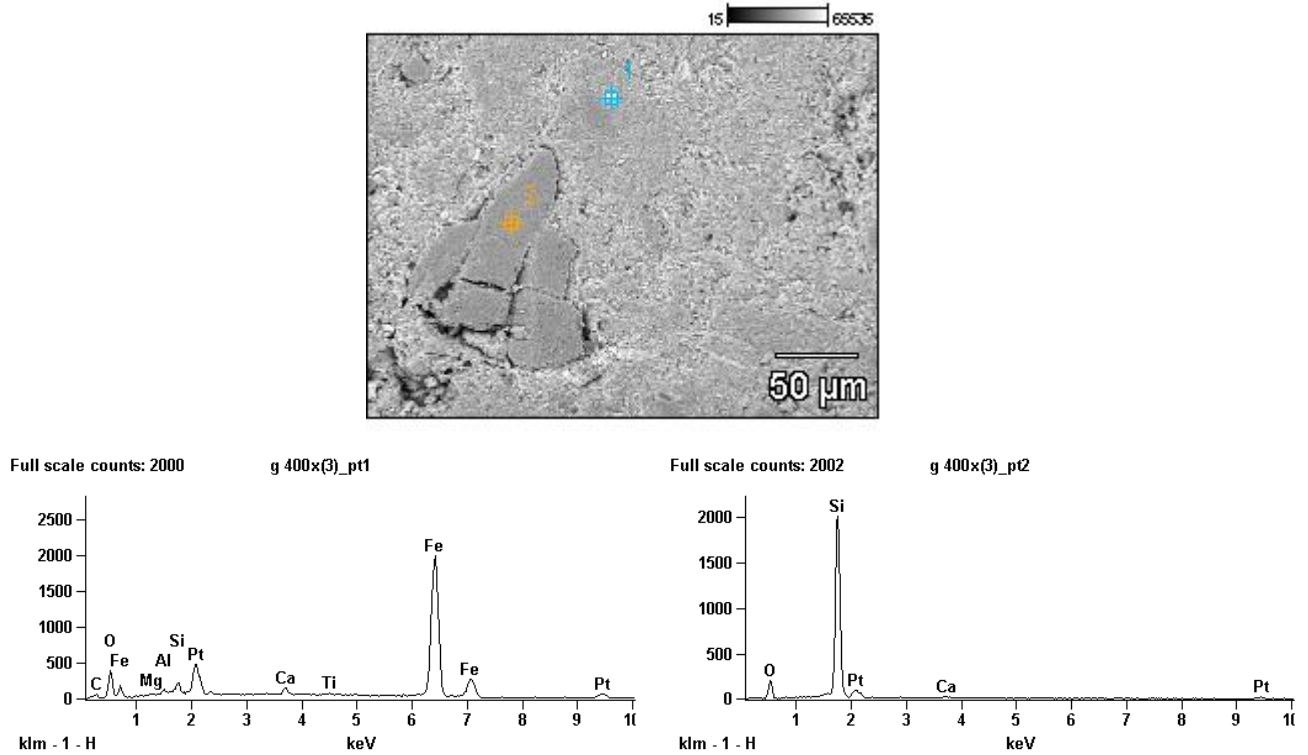


Figura 6.32: Micrografia de MEV da formulação **M50A** queimada a 850°C, na faixa de variação **I** de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

No mapeamento por EDS da composição **40M50A10CH** queimada a 850°C na faixa de variação **I** de massa específica, apresentada na Figura 6.33, também se pode observar a presença de compostos de ferro, ponto 1, e uma matriz amorfa de aluminossilicato, ponto 1 e 2. Além disso, é notável a presença de muitas trincas e poucas áreas lisas. Apesar da presença dessas trincas, a resistência mecânica não foi afetada de forma significativa em relação à composição **M**.

Tais resultados evidenciam que, apesar das composições serem diferentes, as matérias-primas apresentam constituição semelhante o pode minimizar o aparecimento de eventuais defeitos devido à diferença de coeficiente de dilatação térmica das fases.

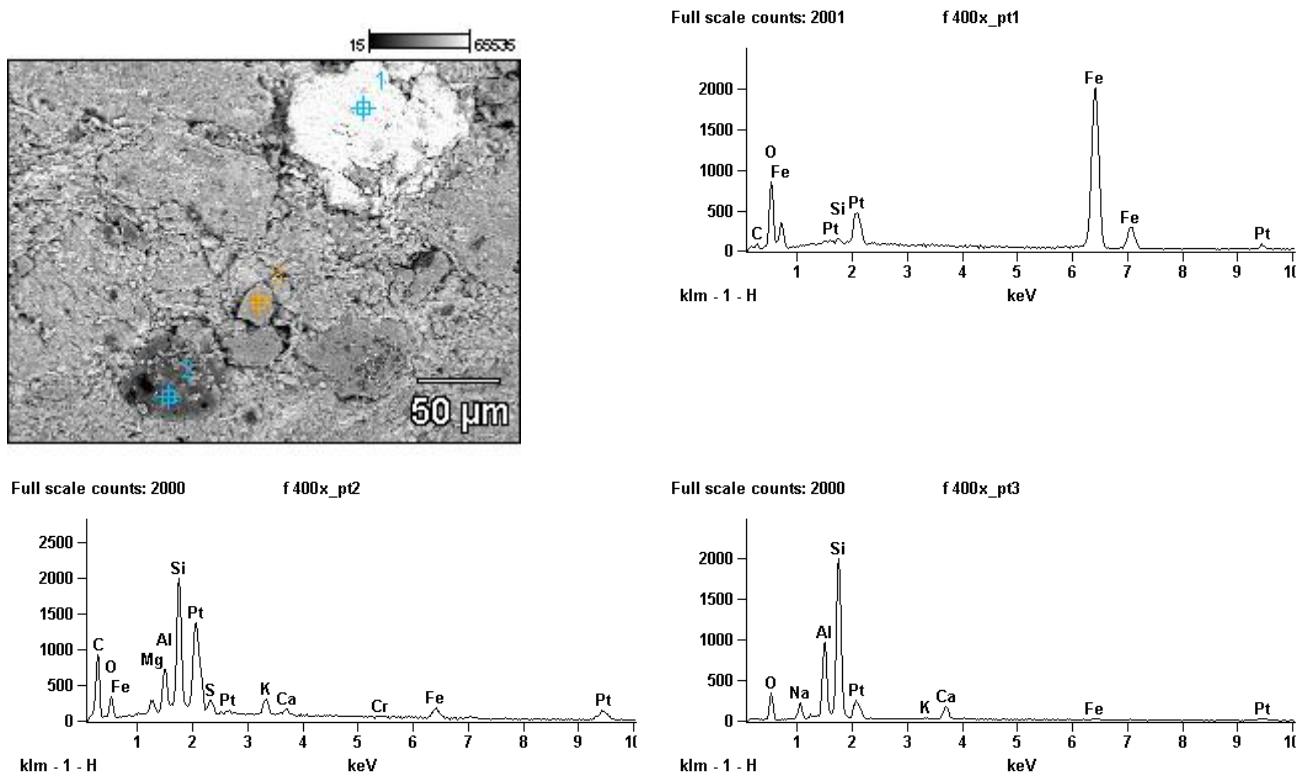


Figura 6.33: Micrografia de MEV da formulação **40M50A10CH** queimada a 850°C, na faixa de variação **I** de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

As micrografias obtidas por MEV das composições **M**, **M50A** e **40M50A10CH** queimadas a 1050°C na faixa de variação **I** de massa específica, bem como os espectros de EDS estão apresentadas nas Figuras 6.34, 6.35 e 6.36, respectivamente. Pode-se observar que de maneira geral, as micrografias apresentam morfologia semelhante e que apesar de serem observadas regiões de falha e porosidade, há uma predominância de áreas lisas. Esse predomínio de áreas lisas se deve a uma formação de fase fundida que preenche os poros diminuindo assim sua ocorrência (Vieira *et al.*, 2009).

A fase fundida funciona como um tipo de “cola”, aproximando as partículas e conferindo maior resistência mecânica ao material uma vez que essa fase penetra entre as partículas e acarreta maior aderência dessas partículas ao material (Boschi, 1980).

O mapeamento por EDS, Figura 6.34, relevou a presença de uma matriz amorfa de aluminossilicato, oriunda da caulinita, argilomineral presente nas argilas estudadas, ponto 1 e 2. Também são observadas regiões de falhas, entretanto há um predomínio de áreas lisas típicas de vitrificação (Vieira *et al.*, 2009). A presença de ouro (Au) se deve a metalização da amostra.

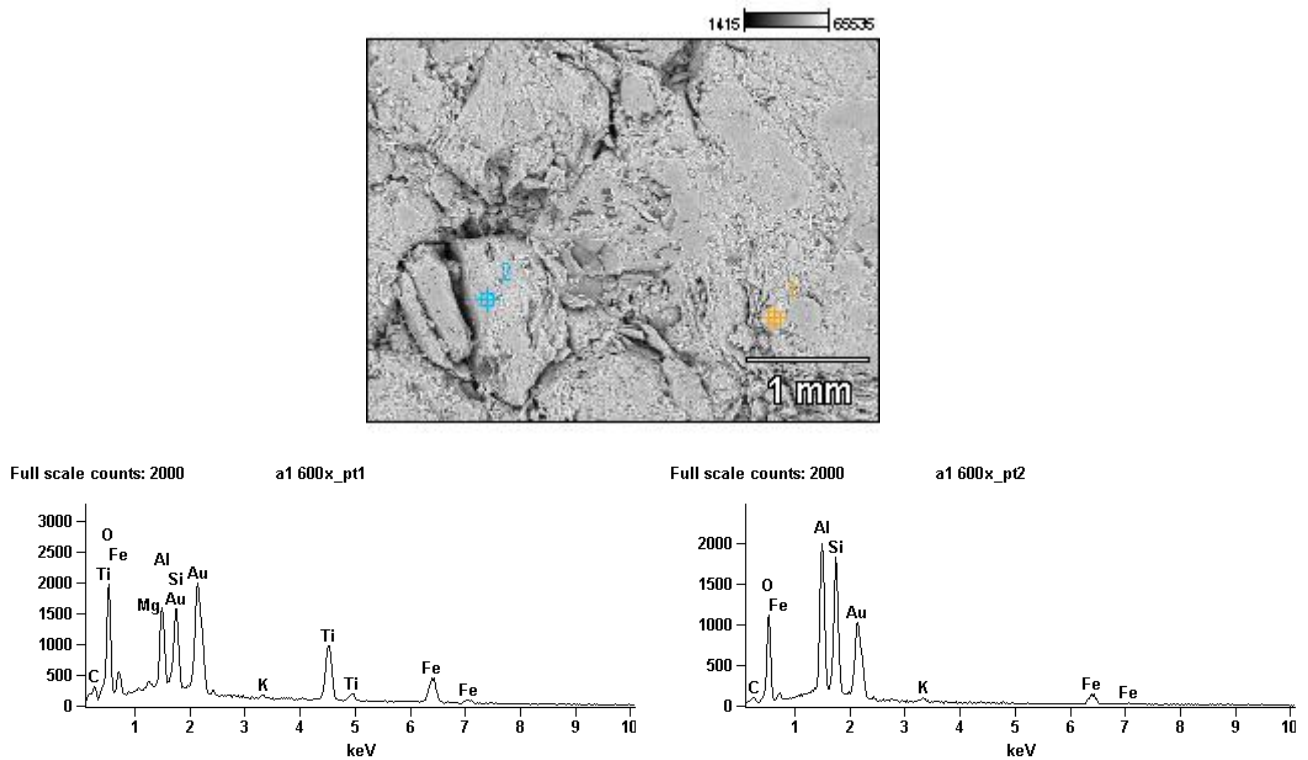


Figura 6.34: Micrografia de MEV da formulação **M** queimada a 1050°C, na faixa de variação **I** de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 600x.

No mapeamento por EDS das amostras **M50A** e **40M50A10CH**, Figura 6.35 e Figura 6.36 respectivamente, ponto1, pode-se observar partículas de quartzo e no ponto 2 uma matriz amorfa de aluminossilicato. Esse mesmo padrão também foi observado nas outras amostras, evidenciando a semelhança entre as matérias-primas.

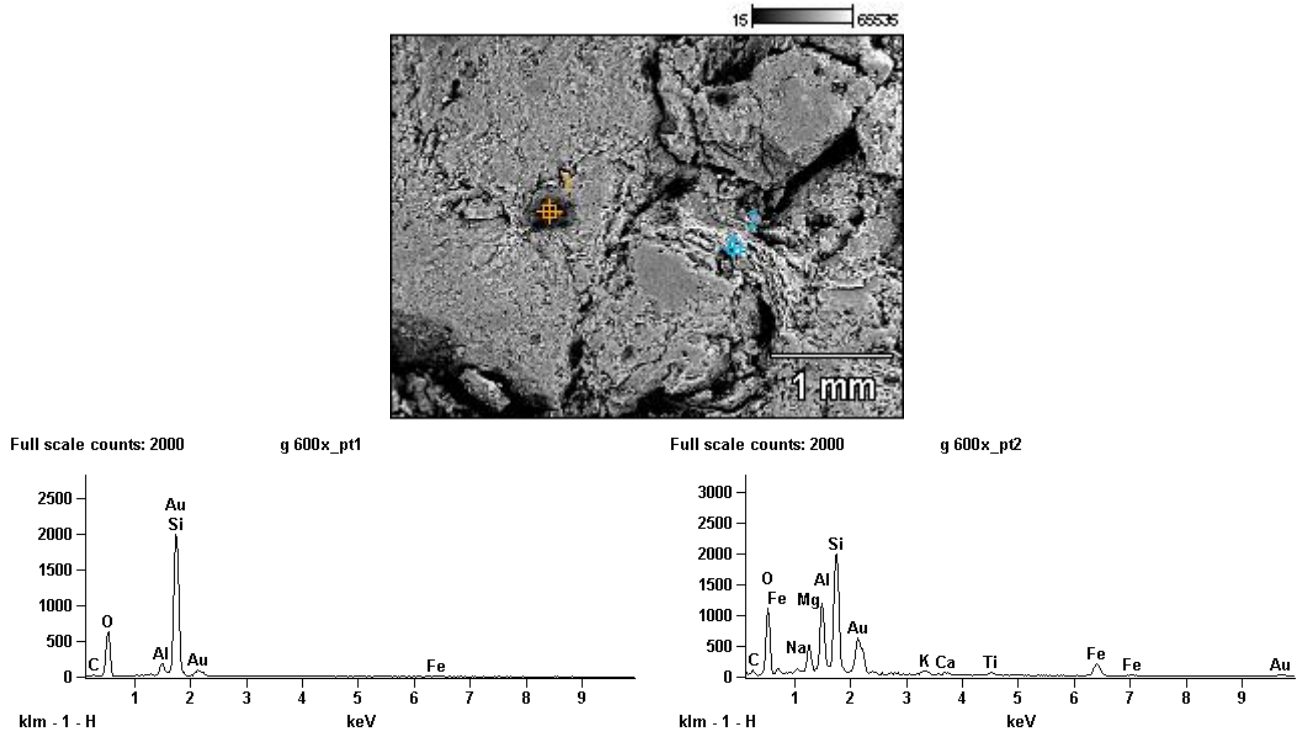


Figura 6.35: Micrografia de MEV da formulação **M50A** queimada a 1050°C, na faixa de variação I de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 600x.

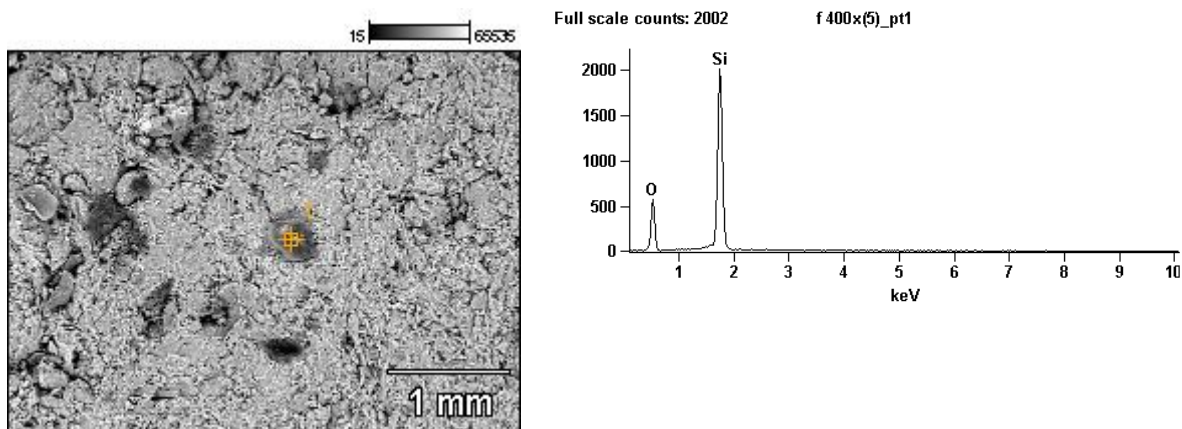


Figura 6.36: Micrografia de MEV da formulação **40M50A10CH** queimada a 1050°C, na faixa de variação **I** de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

As micrografias obtidas por MEV das composições **M**, **M50A** e **40M50A10CH** queimadas a 850°C na faixa de variação **II** de massa específica, bem como os espectros de EDS estão apresentadas nas Figuras 6.37, 6.38 e 6.39, respectivamente. Nota-se que, de maneira geral, apesar do maior grau de empacotamento das partículas a seco, ainda são observadas muitas regiões rugosas e com trincas e poucas áreas lisas devido ao processo de sinterização ineficiente. Esse mesmo padrão também foi observado nas amostras queimadas a 850°C na faixa de variação **I** de massa específica. Nessa temperatura não há formação suficiente de fase líquida para propiciar uma sinterização eficiente com alisamento da superfície e pouca quantidade de defeitos (Freitas, 2009)

O mapeamento por EDS, Figura 6.37, da amostra **M**, assim como observado nas outras amostras, revelou a presença de partículas de quartzo com muitas trincas ao seu redor, ponto 1, na matriz cerâmica. Partículas quartzo podem atuar com concentrador de tensão contribuindo para diminuir a resistência mecânica.

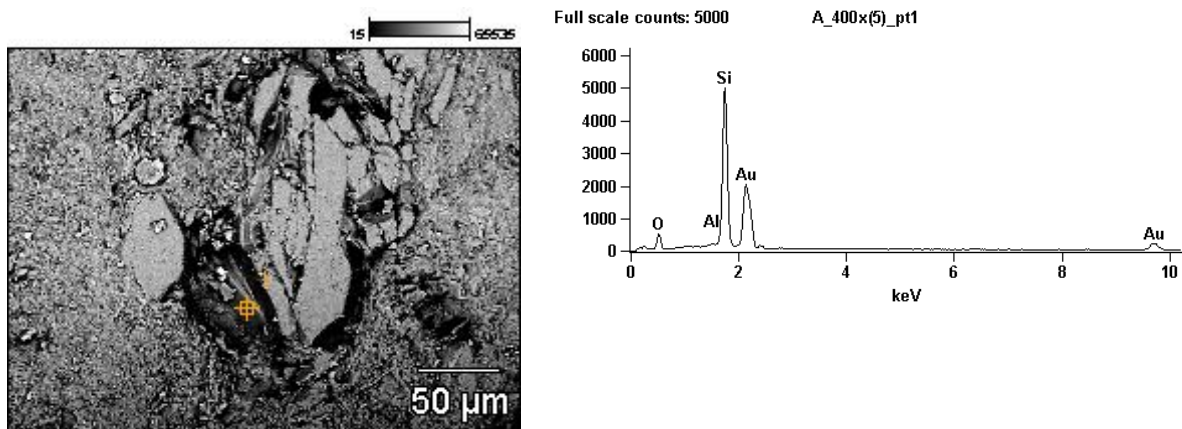


Figura 6.37: Micrografia de MEV da formulação **M** queimada a 850°C, na faixa de variação **II** de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

Na Figura 6.38, está apresentado o mapeamento por EDS de três pontos da composição **M50A** e na Figura 6.39 está apresentado o mapeamento de um ponto da composição **40M50A10CH**. O ponto 1 e 2, Figura 6.38, e o ponto 1, Figura 6.39, revela a presença de quartzo e o aparecimento de trincas ao redor dele. O mapeamento do ponto 3, Figura 6.38, mostra a matriz amorfa de aluminossilicato. Padrão observado em todas as amostras analisadas.

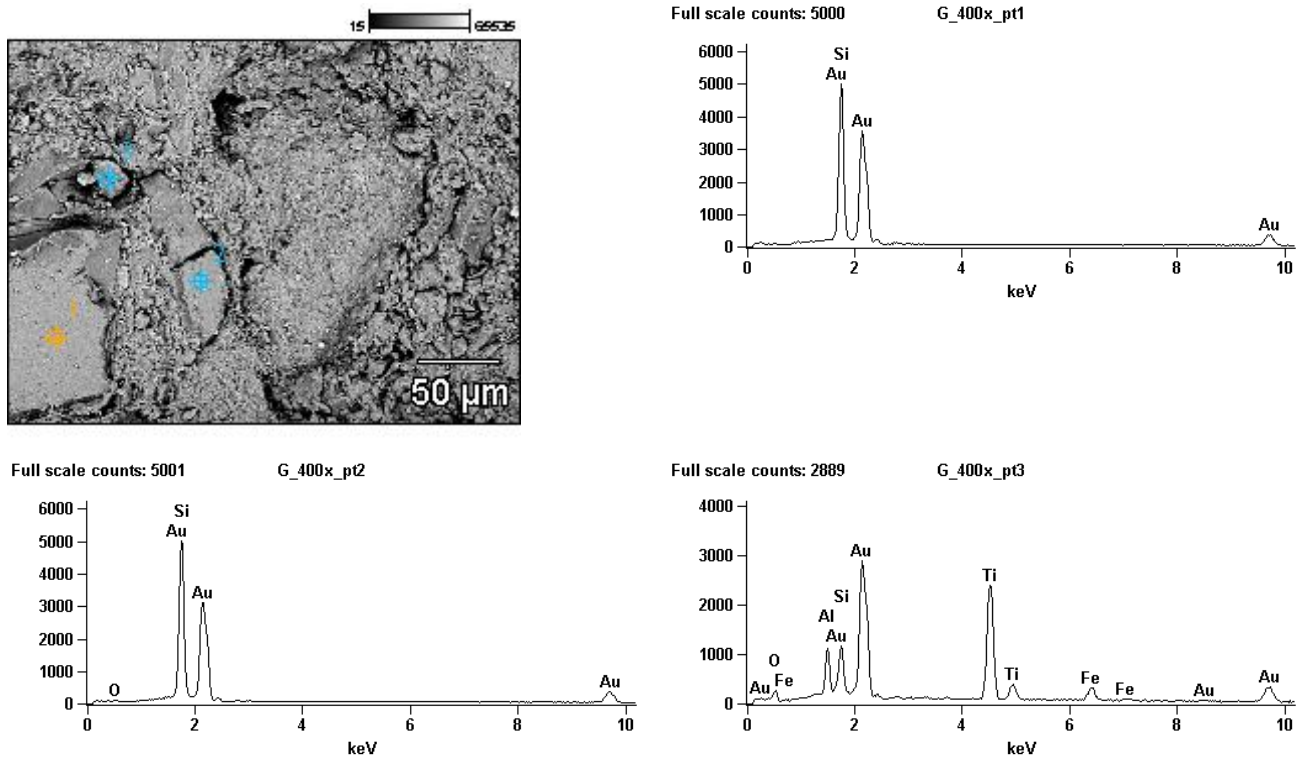


Figura 6.38: Micrografia de MEV da formulação **M50A** queimada a 850°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

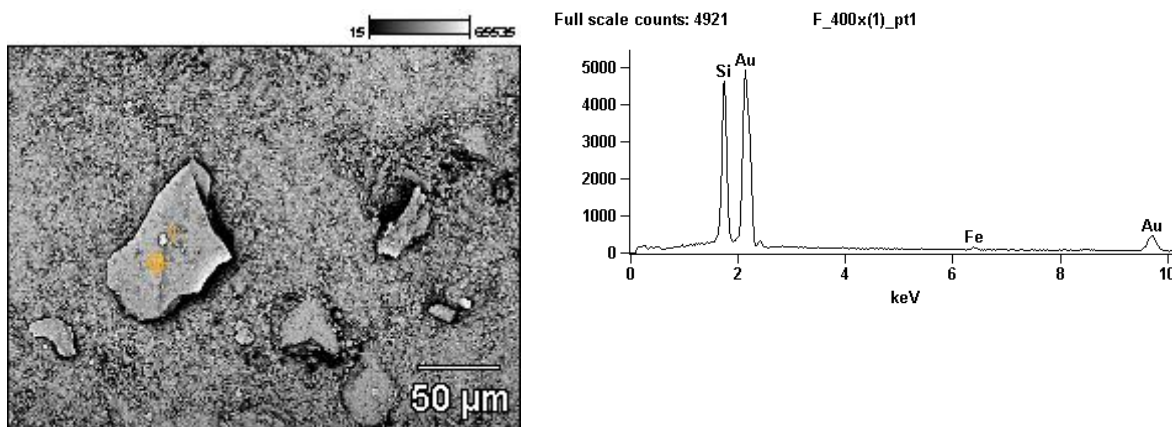


Figura 6.39: Micrografia de MEV da formulação **40M50A10CH** queimada a 850°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

As micrografias obtidas por MEV das composições **M**, **M50A** e **40M50A10CH** queimadas a 1050°C na faixa de variação **II** de massa específica, bem como os espectros de EDS estão apresentadas nas Figuras 6.40, 6.41 e 6.42, respectivamente. Pode-se observar em todas as amostras a presença de regiões com áreas lisas e pouca rugosidade. A 1050°C as reações de sinterização estão em estágio avançado e assim pode-se observar que as partículas estão mais consolidadas.

O mapeamento por EDS da composição **M**, Figura 6.40, assim como observado em todas as amostras, revelou a presença de partículas de quartzo, ponto 1, envolta por uma matriz amorfa de aluminossilicato, ponto 2. As partículas de quartzo apresentam um comportamento inerte e mesmo na temperatura de 1050°C, em que as reações de sinterizações estão em um estágio avançado (Vieira *et al.*, 2008), elas podem ser observadas.

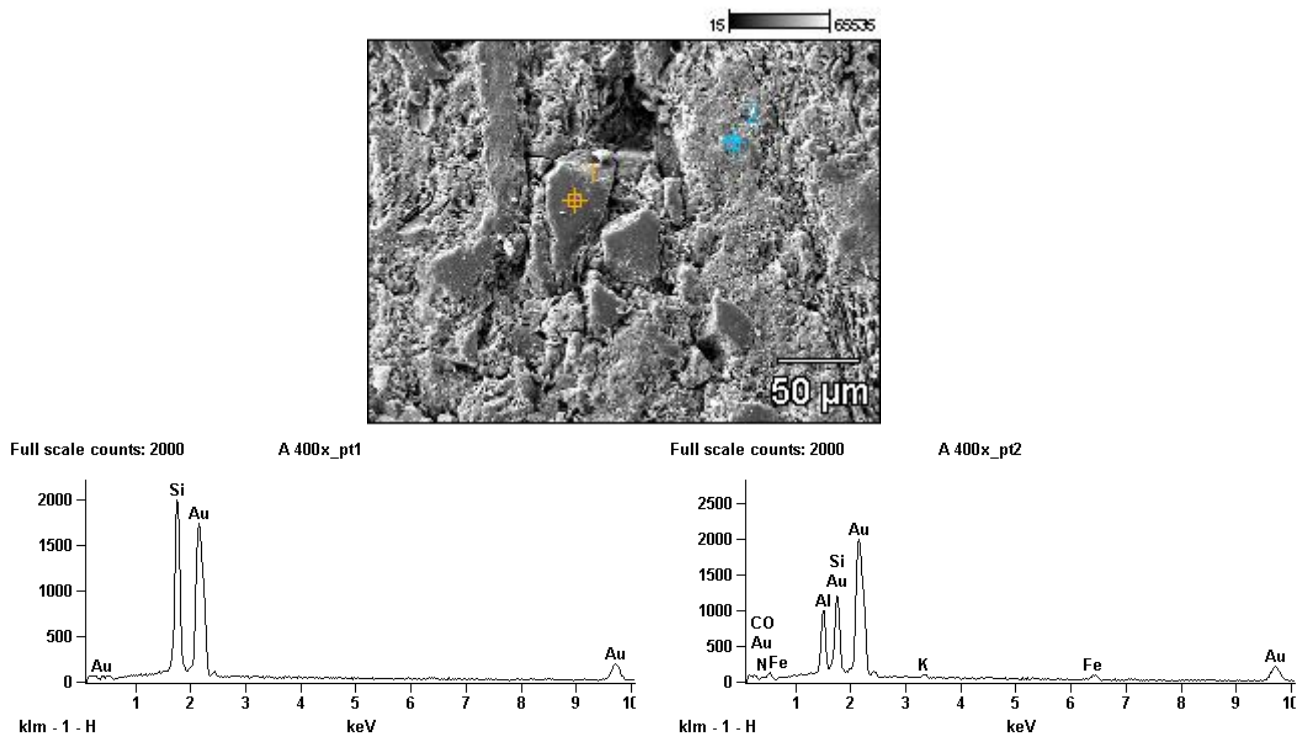


Figura 6.40: Micrografia de MEV da formulação **M** queimada a 1050°C, na faixa de variação **II** de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

O mapeamento por EDS da composição **M50A**, Figura 6.41, no ponto 1, mostra uma partícula, que provavelmente é quartzo, envolta por uma matriz de aluminossilicato, ponto 2, e uma grande falha em volta dessa partícula. Essa falha mais uma vez reforça o caráter inerte do quartzo e pode afetar a resistência mecânica da peça. Porém, apesar dessa falha, a resistência mecânica obtida pelas cerâmicas da composição **M50A** foi maior que as das cerâmicas da composição **M**.

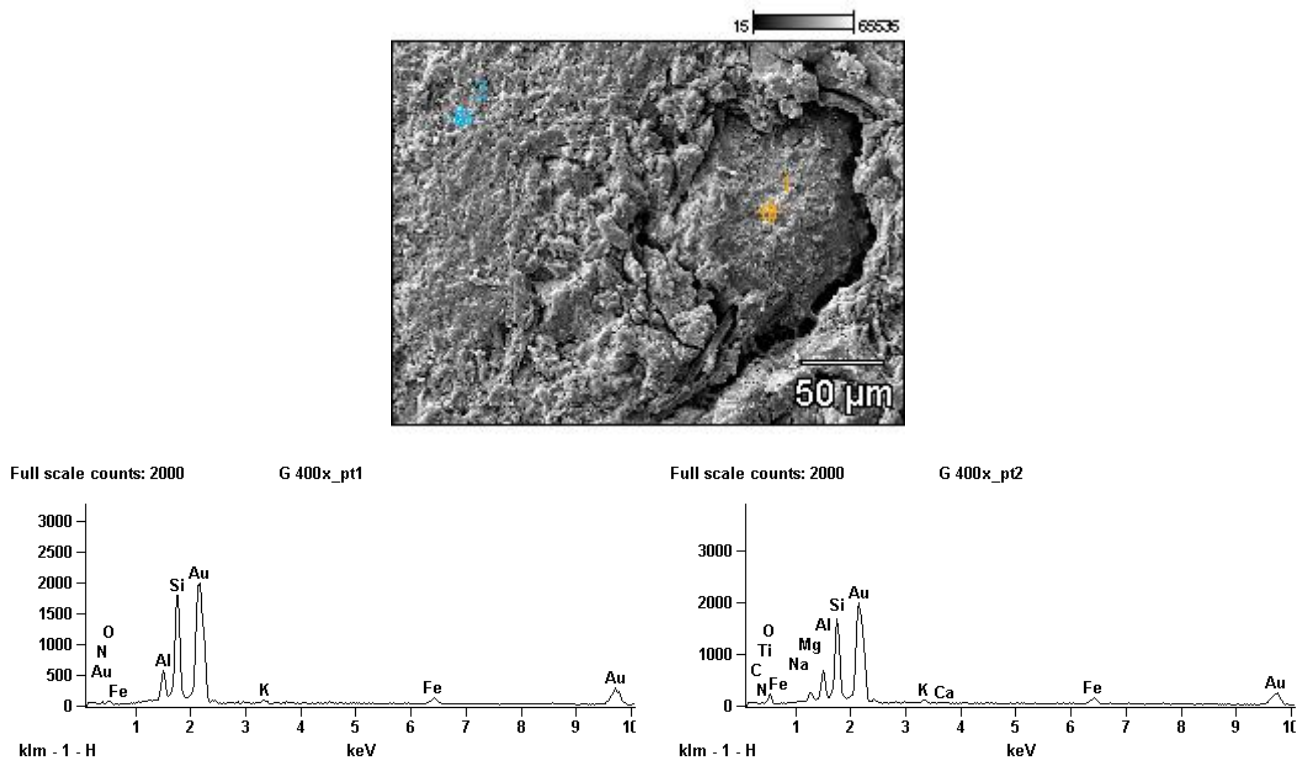


Figura 6.41: Micrografia de MEV da formulação **M50A** queimada a 1050°C, na faixa de variação II de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

Na Figura 6.42 o mapeamento por EDS da composição **40M50A10CH** novamente relevou a presença de uma matriz amorfa de aluminossilicato, ponto 1 e 2. É observada também a presença de Fe que pode estar associado à hematita e Al que pode estar ligado a partículas de alumina α (Weffers & Bell, 1972).

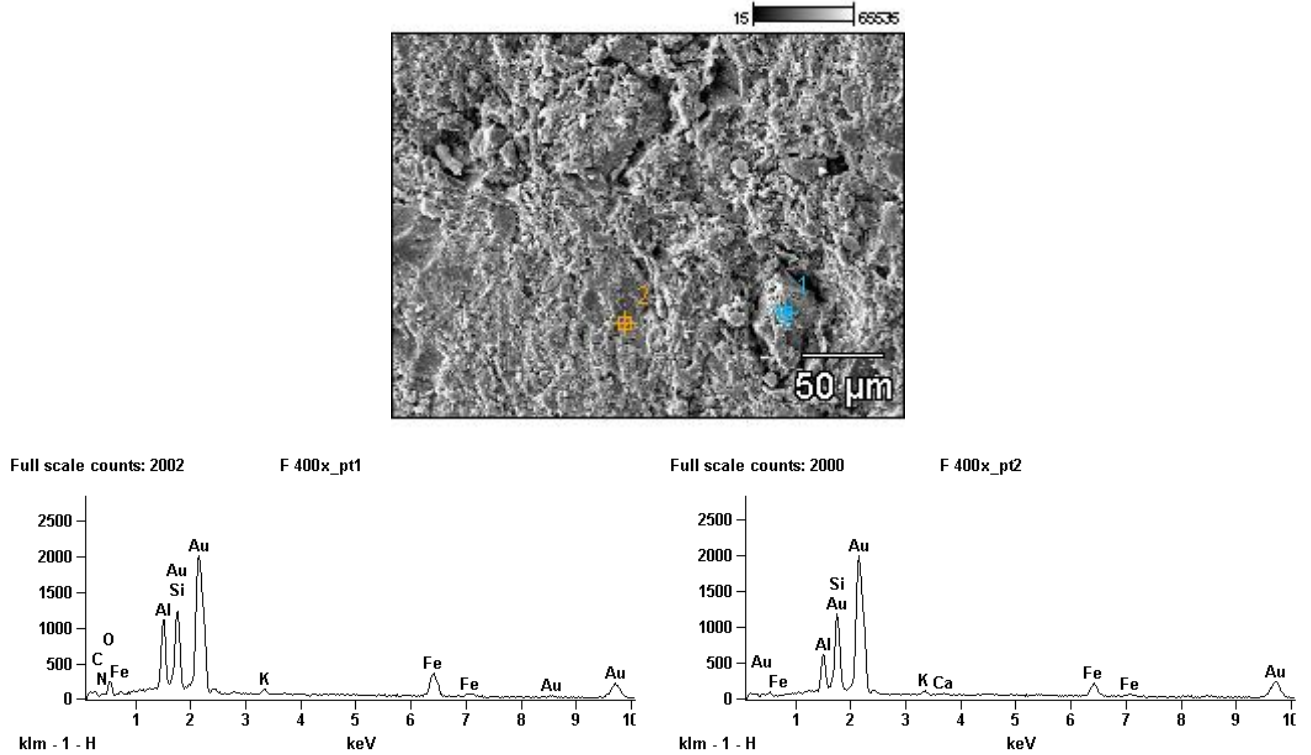


Figura 6.42: Micrografia de MEV da formulação **40M50A10CH** queimada a 1050°C, na faixa de variação **II** de massa específica e espectros EDS dos pontos indicados sobre a imagem. Aumento: 400x.

O quartzo, presente em todas as amostras, bem como compostos de ferro observados em algumas micrografias, podem atuar como concentradores de tensão contribuindo para diminuir a resistência mecânica das cerâmicas. Além disso, a presença desses elementos indica que eles apresentam caráter inerte e que atuam também como material de preenchimento na matriz cerâmica (Ribeiro, 2010).

6.3.3 – Difração de raios-X

Os difratogramas de raios-X da composição **M** queimada a 850°C e 1050°C estão apresentados na Figura 6.43 e 6.44, respectivamente. Quartzo, mica e hematita são as fases cristalinas predominantes presentes na Figura 6.43. A

850°C não ocorre alteração de fases cristalinas de queima, exceto para a caulinita que ao perder sua água de constituição se transforma em metacaulinita, uma fase amorfa. A 1050°C, Figura 6.44, além das fases observadas a 850°C, nota-se a presença de mulita, uma fase cristalina da metacaulinita, aluminossilicato comum em argilas cauliníticas queimadas nessa temperatura (Vieira *et al.*, 2005).

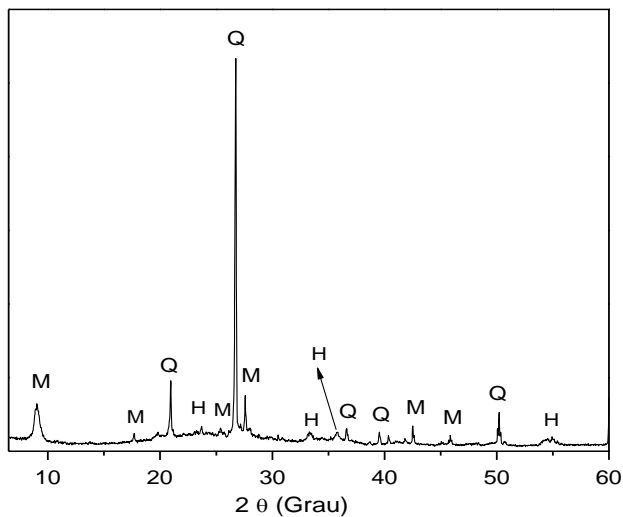


Figura 6.43: Difratoograma de raios-X da formulação **M** queimada 850°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo.

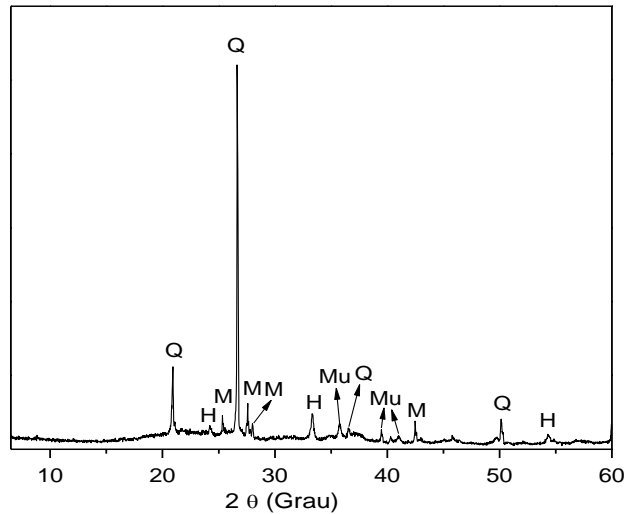


Figura 6.44: Difratoograma de raios-X da formulação **M** queimada 1050°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo; **Mu** = mulita.

Os difratogramas de raios-x da composição **M50A** queimada a 850°C e 1050°C estão apresentados na Figura 6.45 e 6.46, respectivamente. As fases cristalinas presentes na cerâmica queimada a 850°C são: quartzo, mica, hematita, feldspatos plagioclásios e feldspatos potássicos. A presença de feldspatos plagioclásios e potássicos se deve ao argilito adicionado a massa argilosa. A 1050°C nota-se, assim como na composição **M** queimada na mesma temperatura, a presença de mulita. Como já discutido anteriormente, as matérias-primas utilizada para a formulação de massa apresentam composição similar, por isso são encontradas fases semelhantes em todas as formulações estudadas.

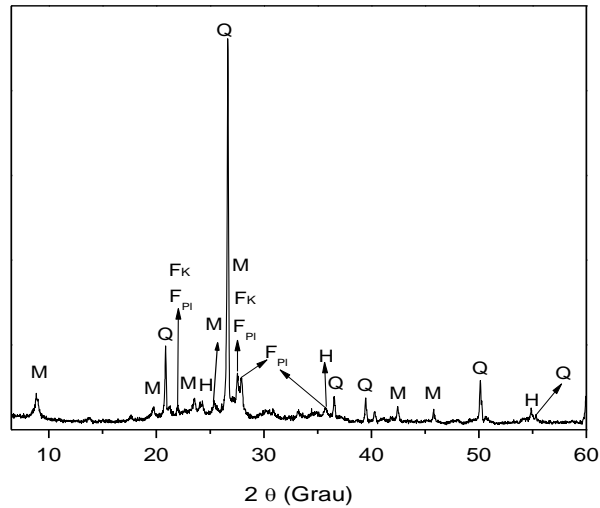


Figura 6.45: Difratoograma de raios-X da formulação **M50A** queimada 850°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo; **F_{PI}** = feldspatos plagioclásios; **F_K** = feldspatos potássicos.

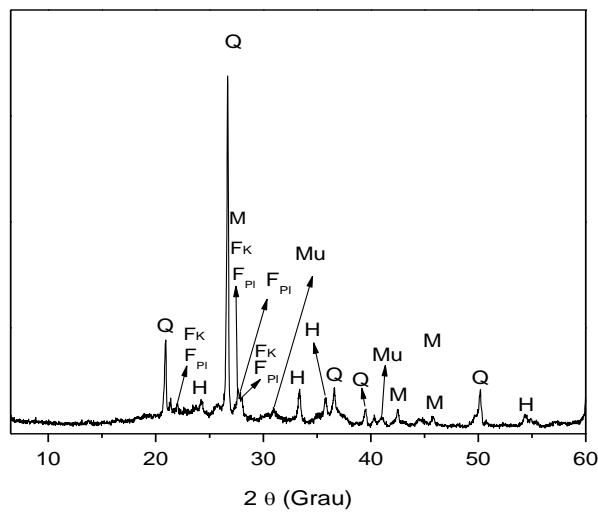


Figura 6.46: Difratoograma de raios-X da formulação **M50A** queimada 1050°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo; **Mu** = mulita; **F_{PI}** = feldspatos plagioclásios; **F_K** = feldspatos potássicos.

Nas Figuras 6.47 e 6.48 estão apresentados os difratogramas de raios-x da composição **45M50A10CH** queimada a 850°C e 1050°C respectivamente. Assim como observado na composição **M50A** queimada a 850°C as fases cristalinas presentes na composição **45M50A10CH** queimada na mesma temperatura são: quartzo, mica, hematita, feldspatos plagioclásios e feldspatos potássicos. Na temperatura de 1050°C, além das fases cristalinas já citadas, observa-se a presença de mulita.

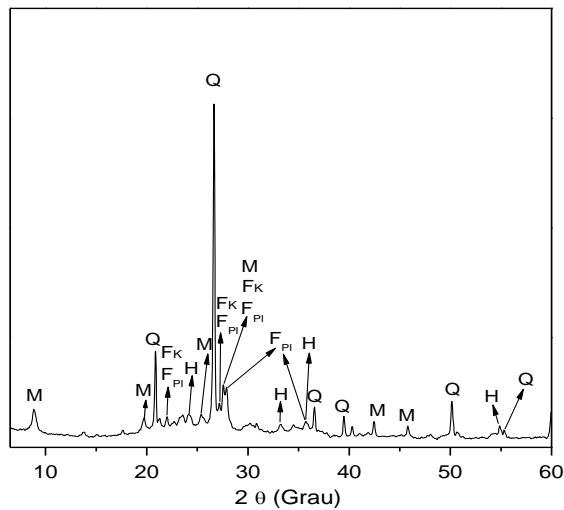


Figura 6.47: Difratograma de raios-X da formulação **45M50A10CH** queimada 850°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo; **F_{PI}** = feldspatos plagioclásios; **F_K** = feldspatos potássicos.

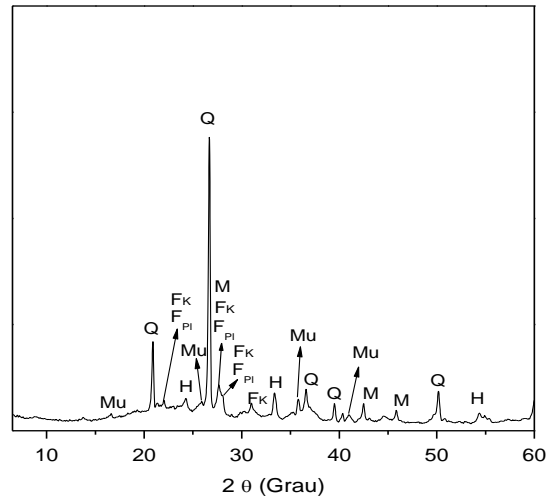


Figura 6.48: Difratoograma de raios-X da formulação **45M50A10CH** queimada 1050°C. **H** = hematita; **M** = mica muscovita; **Q** = quartzo; **Mu** = mulita, **F_{Pl}** = feldspatos plagioclásios; **F_K** = feldspatos potássicos.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se afirmar que a incorporação de argilito e chamote em massa cerâmica argilosa para produção de adoquim, nas condições descritas nesse trabalho, permitiu as seguintes conclusões:

Os ensaios de caracterização das argilas revelaram que elas são constituídas sobretudo por caulinita, quartzo, mica muscovita, gibsita e minerais esmectícios. O argilito apresenta como fases cristalinas predominantes a caulinita, quartzo, mica muscovita, mineral micáceo, microclina e feldspatos plagioclásios. O chamote material é constituído, principalmente, por quartzo, mica muscovita, hematita como fases cristalinas. É observada ainda a fase caulinita que evidencia que os blocos de vedação que originaram o chamote foram queimados a temperaturas inferiores a 600°C.

O argilito e o chamote apresentam granulometria mais grosseira que as argilas o que pode facilitar a secagem das peças.

Devido à constituição mineralógica com menor teor de argilomineral, tanto o chamote quanto o argilito permitiram um ajuste de plasticidade da massa argilosa.

De acordo com o diagrama de Winkler, a incorporação de argilito e 5% de chamote à massa proporciona a produção de telhas. Já a incorporação de 10% chamote indica a produção de telhas e blocos de vedação

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

A incorporação de argilito, nas duas faixas de variação de massa específica, contribuiu para diminuir a absorção de água das cerâmicas queimadas a 1050°C.

A incorporação de argilito contribuiu para diminuir a retração diametral das cerâmicas, nas temperaturas de 850 e 950°C evitando a formação de defeitos na peça final. Já na temperatura de 1050°C a adição de argilito não provocou alterações significativas. A incorporação de chamote, nas duas faixas de variação de massa específica nas três temperaturas, em relação a composição **M50A** não alterou significativamente essa propriedade. Em relação a composição **M**, o chamote provocou uma redução da retração nas temperaturas de 850 e 950°C. Já na temperatura de 1050°C a incorporação de chamote provocou um discreto aumento dessa propriedade.

O argilito adicionado a massa argilosa proporcionou um aumento da resistência mecânica nas duas faixas de variação de massa específica. A adição de chamote nos teores de 5 e 10% contribuiu para diminuir a resistência mecânica das peças queimadas a 850 e 950°C na faixa de variação **I** de massa específica. Já na faixa de variação **II** de massa específica não foram observadas variações significativas.

De acordo com as normas Colombianas e Americanas todas as composições avaliadas poderiam ser utilizadas para a fabricação de adoquim utilizado na pavimentação de vias para tráfego de pedestres.

Segundo a norma brasileira para produção de PPC, os resultados de resistência mecânica na faixa de variação **I** indicaram que a formulação **M** queimada a 850°C, **45M50A5CH** e **40M50A10CH** queimadas a 850 e 950°C não alcançaram o mínimo de 35 MPa, não sendo indicado seu uso em nenhum tipo de via. Já a formulação **M** queimada a 950°C, **M50A** queimada nas três temperaturas, e as formulações **45M50A5CH** e **40M50A10CH** queimadas a 1050°C, são

indicadas para pavimentação de vias com tráfego de veículos comerciais. Na faixa de variação II de massa específica todas as composições, nas três temperaturas de queima, seriam indicadas para a produção de adoquim para a pavimentação de vias de tráfego pesado.

Finalmente, os resultados obtidos indicaram que o uso do argilito e do chamote para formulação de massa para a produção de adoquim tem potencial para o uso em cerâmica vermelha. O efeito deletério do chamote na absorção de água e na retração de queima pode ser minimizado utilizando 10% de adição do resíduo a massa e realizar a queima em temperaturas superiores a 950°C. Com relação a resistência a compressão, o ideal seria utilizar as formulações na faixa de variação de densidade II pois os valores obtidos permitiriam a produção de adoquim tanto para pavimentação de vias de tráfego leve, quanto de vias de tráfego pesado.

CPAÍTULO 8 – SUGESTÕES

- Realizar um estudo de viabilidade econômica para a produção do adoquim.
- Realizar testes industriais com as formulações estudadas em escala laboratorial.
- Realizar ensaios de abrasão nas peças industriais.
- Investigar prováveis gases, bem como materiais particulados, que podem ser liberados durante a etapa de queima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAJO, M. P. (2000). Manual sobre fabricacion de baldosas tejas y ladrillos. Ed. Baralmar S.A., Terrassa, Espanha, p. 360.

AMERICAN ASSOCIATION OF CERAMICS. Disponível em: www.ceramics.org
Acessado em 21 de agosto de 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Cerâmica no Brasil – Números do Setor**. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br>>. Acessado em: 21 de Agosto de 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). ABNT NBR 6459. **Determinação do limite de liquidez: método de ensaio**. Rio de Janeiro.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984c). ABNT NBR 7181 **Determinação da análise granulométrica dos solos**. Rio de Janeiro,.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). ABNT NBR 7207. **Classificação dos pavimentos**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1995). ABNT NBR 6502. **Rochas e Solos**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). ABNT NBR 10004 **Resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). ABNT NBR 10005.
Lixiviação de Resíduos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). ABNT NBR 10006
Solubilização de Resíduos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). ABNT NBR 10007
Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro.

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

BARBIERI, L.; CORRADI, A.; LANCELLOTTI, A. (2000). Alkaline and alkaline-earth
silicate glasses and glas-ceramics from municipal and industrial wastes. **Journal
of the European Ceramic Society**, Amstredam, 20: 2477-2483.

BELTRÁN, V. (1995) Extruded rustic floor tile, I: Impact of the composition on the
body's behaviour in the prefiring process stages. **Tile e Brick Int.**, v. 11, n. 3,
p.169–176.

BELTRÁN, V. (1996). 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, p.320–326.

BOSCHI, A.O. (1980). Cerâmica vermelha ou estrutural. Seminário de cerâmica
urbana do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 26-29.

BRASIL. (1986). Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA**. *Resolução n.º 001, de 23 de janeiro de 1986*. Diário Oficial da União. Brasília, DF.

BRINDLEY, G. M.; NAKAHIRA, M. (1959). The kaolinite-mullite reaction series. Parts I,II, III. **J. Amer. Ceram. Soc.** 42, 311, 314; 319.

BUSTAMANTE, G.M.; BRESSIANI, J.C. (2000)A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 3, p. 31-36.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA - ABC. (2003). **Anuário Brasileiro de cerâmica**. São Paulo. p. 5-8. (v. 1).

CABRAL JR. (2006). Arranjos Produtivos Mínero-Cerâmicos e o Desenvolvimento Econômico: Caso do APL de Socorro – SP. **Cerâmica Industrial**, São Carlos, v. 11, n. 2, mar./abr.

CAMPELO, N.S.; MORAIS, M.R.; ARAGÃO, A.F.; CABRAL, E.M.; REBELO, E.P.; PINHEIRO, S.C.; PAIVA, O.A. (2006). Estudo da utilização de resíduo queimado (“Chamote”) oriundo do pólo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru – AM como aditivo na fabricação de telhas. **Cerâmica industrial**. v.11, n.1, p.44-46 jan/fev.

CALLISTER, W.D. Jr., (2002). **Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

CASTRO, R.J.S. (2008). **Formulação e caracterização de matérias-primas para revestimento semi-poroso com adição de chamote de telhas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN. 111 p.

CONORSA, 2010. Disponível em < <http://www.conorsa.es>>. Acesso em: Outubro. 2010.

DEMIR, I. & ORHAN, M. (2003). Reuse of waste bricks in the production line. **Building and Environment** 38, 1451 – 1455 p.

DONDI, M.; MARSIGLI, M; FABRI, B. (1997a). Recycling of industrial and urban wastes in brick production – A Review. **Tile & Brick International**, v. 13, nº3, 218-225p.

DONDI, M.; MARSIGLI, M; FABRI, B. (1997b.) Recycling of industrial and urban wastes in brick production – A Review (Part 2). **Tile & Brick International**, v. 13, nº4, 302-308p.

FERNANDES, P.F.; OLIVEIRA, A.P.N.; HOTZO, D. (2003). Reciclagem do lodo da estação de tratamento de efluente de uma industria de revestimentos cerâmicos. Parte 1: ensaios laboratoriais. **Cerâmica industrial** 8 (2), março/abril.

FIORITI, C.F.; INO, A.; AKASAKI, J.L. (2007). Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 43-54, out./dez.

FREITAS, L. A. (2009). Incorporação de coque de petróleo em cerâmica vermelha. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ. 94 p.

GOUVEIA, F.P. (2008). **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 de mestrado. Universidade de Brasília, Brasília –DF. 111 p.

HOOD, Rogério da S. S.(2006) **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização de Resíduos de Construção e Demolição Como Agregado Miúdo Reciclado na**

Confecção de Blocos de Concreto Para Pavimentação. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre.

HUANG, W. T. (1962). **Petrology, McGraw-Hill Book Company**, New York, p. 396-397.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: www.ibge.gov.br Acesso: Julho. 2010.

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Disponível em: WWW.ibracon.org.br Acesso: Novembro. 2011.

INTERPAVI. Disponível em: www.interpavi.com.br/brazil/tecnico.htm . Acesso em: Outubro. 2010.

JORDÃO, M.A. (1988). Curso internacional de treinamento em grupo em tecnologia cerâmica. IPT/ JICA.

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

LEE, J.D. (1996). **Química inorgânica não tão concisa.** 4 ed. São Paulo: Editora Edgaer Blucher LTDA, 452 p.

LEINZ, V. e AMARAL, S. E. (1998). **Geologia Geral**, Editora Nacional, São Paulo p. 46-47.

LUZ, A. B. e LINS, F. F. (2005). **Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações.** 1 Ed. Rio de Janeiro: CETEM – MCT, 726 p.

MANO, E.B. (1991). **Polímeros como materiais de engenharia**. 1 ed. São Paulo: Blücher, 197p.

MALPESA. http://www.malpesa.es/en/area_descarga.jsp. Acessado em 21/10/2010.

MARTINS, L.; SUGUIO,K.; FLEXOR, J.M.; TESSLER,M.G., EICHLER, B.B. (1984). Significado geológicos das variações dos graus de arredondamento das areias holocentricas da planície costeira do rio Paraíba do Sul, **Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia**, pag.119.

MELO, M. M.; MARTINELLI, A. E.; PINHEIRO, A. S.; NASCIMENTO, R. M.; VIEIRA, F. A. (2006). Avaliação do efeito da adição de chamote de telha em formulação de grês porcelanato com queima a gás natural. **Anais: 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

MENEZES, R.R., NEVES,G.A.,FERREIRA H.C. (2002). O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 6 (2): 303-313.

MITCHELL, J.K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley and Sons, Inc, 1ª ed., New York, 437p.

MONTANO, L.; BIANCHINI, N.; RINCÓN, J.M.; ROMERO, M. (2001). Sintering behavior of pressed red wastes from zinc hydrometallurgy. **Ceramics International**, Oxford, 27: 29-37.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. (2005). Effect of oily waste addition to clay ceramic. **Ceramics International**, nº 30, p. 353–358.

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

PALMONARI, C.; TIMELLINI, G. (2002). A industria de revestimento italiana e o Meio Ambiente, **Cerâmica Industrial**, 7: 7-11.

PINHEIRO, R. M.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. (2010). Caracterização de matérias-primas para fabricação de adoquim. **Anais**: 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Foz do Iguaçu, Paraná. Disponível em: http://www.metallum.com.br/54cbc/trabalhos_tecnicos.asp?Id=3.

PINHEIRO, I.S. (2008). **Beneficiamento e caracterização de resíduos gerados na produção de blocos cerâmicos visando à aplicação como adição pozolânica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG. 154 p.

PIOROTTI, J. L. (1985). **Pavimentação intertravada**. Rio de Janeiro: Montana, 64 p.

RAMOS, I.S.; ALVES, M. G.; ALEXANDRE, J. (2006). Diagnóstico do Pólo Cerâmico de Campos dos Goytacazes – RJ. **Cerâmica Industrial**, São Carlos, v. 11, n. 1, jan./fev.

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

RIPOLI, F.F. (1997). A Utilização do Rejeito Industrial Cerâmico - Chamote - como Fator de Qualidade na Fabricação de Elementos Cerâmicos: um Estudo Experimental. **CERÂMICA** 43 (281-282).

RIKER, S. R. L. (2008). Caracterização dos argilitos da Formação Novo Remanso e sua aplicação na indústria da cerâmica vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., 26-31 out. 2008, Curitiba, PR. **Anais**. Curitiba, PR: SBG.

SABRAH, B.A.; EBIED, E.A. (1987). Utilization of cement-dust a substitute of some Clay content in clay-sand. **Freiburg**, 1: 5129-5137.

SÁNCHEZ, E.; GARCÍA,J.; SANZ,V.;OCHANDIO,E. (1990). Critérios de selección de matérias primas para La fabricaión de pavimentos y revestimientos cerâmicos. **Céran**. Información, 157, 13-21.

SCHINEIDER, S. J. Jr. (2000). Engineered Materials Handbook – Ceramics and Glasses, Ed. ASM International, EUA, p.589.

SILVA, F. A. N. (2000). **Caracterização microestrutural e avaliação ambiental de cerâmicas argilosas com incorporação do resíduo borra de petróleo encapsulada**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 151 p.

SILVA, N. J. W.; BELO. P. (2000). Avaliação de misturas de resíduo sólido com argila plástica para aplicação em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, 42 (273): 335-338.

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

SOUZA, V. P. (2007). **Análise dos gases emitidos na produção de cerâmicas com adição de resíduos industriais**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense. 74 p. Campos dos Goytacazes.

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

TOLENTINO, M.; ROCHA, R. C. F.; SILVA, R. R.; (1995). **O azul do planeta um retrato da atmosfera terrestre**. 1 ed. São Paulo: Ed. Moderna, 11 p.

VICENZI, J. (1999). **Efeito da adição de chamota em uma massa cerâmica de argila vermelha**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 153 p.

VICENZI, J.; BERGMANN, C. P. (2009). Adição de Chamota em uma Massa Cerâmica à Base de Argila Vermelha: Efeito na secagem pré-queima. **Cerâmica Industrial**, 14 (2) Março/Abril, 16-21p.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F.; PINATTI, D. G. (2000). Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ. **Cerâmica**, v. 46 n° 297, Jan./Feb./Mar.

VIEIRA, C. M. F. (2001). **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.

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

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

VIEIRA, C. M. F.; EMILIANO. J. V. (2005). 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: 49° Congresso Brasileiro de Cerâmica**, p.15.

VIEIRA, C. M. F.; TEIXEIRA, S. S.; MONTEIRO, S. N. (2005). 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**, p.12.

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

VIEIRA, C. M. F.; TERRONES, L. A.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. (2007). Características e efeito da fração granulométrica menor que 2 μm no comportamento de queima de uma argila. **Cerâmica** n°53, p. 249- 254.

VIEIRA, C. M. F.; SOARES, J. B.; MONTEIRO, S. N. (2008). Desenvolvimento de massas de revestimento cerâmico com argila caulínica e nefelina. **Cerâmica** n°54, p. 184- 192.

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

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. (2009). Incorporation of solid wastes in red ceramics – an updated review. **Revista Matéria**, v. 14, n. 3, pp. 881 – 905,. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11097>.

K. WEFFERS; G. M. BELL (1972). Technical Paper n. 19, Alcoa Research Laboratories, Pittsburgh.