



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO DA ALVENARIA
ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS

CARLOS EDUARDO DE FRANÇA VILLAR

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu

CO-ORIENTADOR: Prof Dr. Luís Alberto de Melo Carvalho

FORTALEZA - CE

ABRIL - 2005



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

PARECER DA COMISSÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CARLOS EDUARDO DE FRANÇA VILLAR

“CARACTERIZAÇÃO E COMPORTAMENTO DA ALVENARIA
ESTRUTURAL DE BLOCOS CERÂMICOS”

A Comissão de Dissertação composta pelos professores Hamilton Ferreira Gomes de Abreu (Presidente e Orientador) do Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção da Universidade Federal do Ceará, Luiz Alberto de Melo Carvalho do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará e Márcio Roberto Silva Corrêa do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, consideram o candidato:

Aprovado com Louvor Aprovado Não Aprovado

Secretaria do Programa de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em 20 de abril de 2005.

Hamilton Ferreira Gomes de Abreu
Presidente e Orientador

Luiz Alberto de Melo Carvalho
Membro e Co-orientador

Márcio Roberto Silva Corrêa
Membro

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e força concedidas para vencer os desafios ao longo de minha vida.

À Universidade Federal do Ceará pela oportunidade de realizar este Mestrado.

Ao Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, meu orientador, por todo o trabalho de orientação e que, com sua sabedoria e experiência, soube conduzir de forma irretocável o desenvolvimento deste trabalho sempre com total dedicação.

Ao Professor Dr. Luís Alberto de Melo Carvalho, meu co-orientador, por toda a dedicação, ensinamentos, incentivo e acompanhamento ao longo de toda a minha vida acadêmica.

Ao Professor Dr. Ricardo Emílio por sua grande ajuda na área dos materiais cerâmicos e nas revisões do artigo que foi escrito.

Aos Professores Dr. Lindberg Lima Gonçalves e Dr. Francisco Alcides Germano por conduzirem o Programa de Mestrado com muita dedicação e seriedade.

Ao Engenheiro José Ramalho pela grande e indispensável ajuda na realização dos ensaios deste trabalho.

Aos Mestres Adailson, Flávio Herculano, Marcelo e Nélio que muito colaboraram para a realização deste trabalho.

Aos colegas de mestrado Engenheiros Jean, John, Paulo e Rodrigo que colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao aluno de graduação Éder pela sua grande cooperação nos ensaios de resistência à compressão.

À Jacerama Jaguaruana Cerâmica LTDA pela doação dos blocos cerâmicos estruturais utilizados.

Aos meus pais Villar e Kelma pelo incentivo, todos os ensinamentos e pela intensa presença em todas as etapas de minha vida.

À minha esposa Melissa pela grande ajuda, incentivo e compreensão, fundamentais para ao desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

A todos que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Conceito de alvenaria estrutural.....	4
2.2 Aspectos históricos da alvenaria estrutural.....	5
2.3 Componentes da alvenaria estrutural.....	8
2.3.1 Blocos.....	8
2.3.2 Argamassa.....	11
2.3.3 Graute.....	12
2.3.4 Armadura.....	14
2.4 Mecanismos de ruptura da alvenaria estrutural.....	14
2.4.1 Comportamento do bloco.....	17
2.4.2 Comportamento da argamassa.....	18
2.4.3 Comportamento simultâneo da argamassa e do bloco.....	19
2.5 A alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.....	20
2.6 Caracterização dos materiais cerâmicos.....	23
2.6.1 Diagrama de fases.....	23
2.6.2 Microestrutura.....	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 Ensaio dos blocos cerâmicos estruturais.....	26
3.1.1 Determinação das características geométricas.....	26
3.1.1.1 Determinação dos valores médios dos comprimentos das faces.....	27
3.1.1.2 Determinação do desvio em relação ao esquadro.....	28
3.1.1.3 Determinação da planeza das faces.....	29
3.1.1.4 Determinação da área líquida.....	29
3.1.1.5 Determinação da área bruta.....	30
3.1.2 Determinação da resistência à compressão.....	30
3.1.3 Caracterização da microestrutura.....	31
3.2 Ensaio das argamassas.....	33
3.2.1 Determinação da resistência à compressão.....	34
3.3 Ensaio dos prismas.....	34
3.3.1 Determinação da resistência à compressão.....	35
3.4 Ensaio dos prismas contrafiados.....	35
3.4.1 Determinação da resistência à compressão.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1 Ensaio dos blocos cerâmicos estruturais.....	37
4.1.1 Características geométricas.....	37
4.1.1.1 Valores médios dos comprimentos das faces.....	37
4.1.1.2 Desvio em relação ao esquadro.....	39
4.1.1.3 Planeza das faces.....	40
4.1.1.4 Área líquida.....	41
4.1.1.5 Área bruta.....	42
4.1.2 Resistência à compressão.....	43
4.1.3 Caracterização da microestrutura.....	43
4.2 Ensaio das argamassas.....	64

4.2.1	Resistência à compressão	65
4.3	Ensaio dos prismas	66
4.3.1	Resistência à compressão	66
4.4	Ensaio dos prismas contrafiados	71
4.4.1	Resistência à compressão	71
5	CONCLUSÕES	77
5.1	Blocos cerâmicos estruturais	77
5.1.1	Características geométricas	77
5.1.2	Resistência à compressão	77
5.1.3	Caracterização da microestrutura	77
5.2	Prismas	79
5.3	Prismas contrafiados	80
5.4	Sugestões para pesquisas futuras	81
	REFERÊNCIAS	83
	ANEXOS	87
	ANEXO A	88
	ANEXO B	106

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – OBRAS HISTÓRICAS CONSTRUÍDAS EM ALVENARIA ESTRUTURAL.(A) PIRÂMIDES DO EGITO; (B) COLISEO, EM ROMA; (C) MURALHA DA CHINA.	6
FIGURA 2.2 – EDIFÍCIO MONADNOCK, CHICAGO (1891). (A) FACHADA MOSTRANDO OS SEUS 16 PAVIMENTOS; (B) PAREDES DO PAVIMENTO TÉRREO COM 1,80M DE LARGURA.	7
FIGURA 2.3 - ESQUEMA DE BLOCOS CERÂMICOS ESTRUTURAIS. (A) PAREDES VAZADAS; (B) PAREDES MACIÇAS; (C) PERFURADO.....	9
FIGURA 2.4 – ESQUEMA DE UMA PAREDE COMPRIMIDA.....	15
FIGURA 2.5 – ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NO BLOCO E ARGAMASSA EM UMA PAREDE COMPRIMIDA.	16
FIGURA 2.6 – ESQUEMA DE RUPTURA DOS BLOCOS QUANDO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO UNIAXIAL OU TRAÇÃO UNIAXIAL.....	17
FIGURA 2.7 – GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO DE RUPTURA À COMPRESSÃO UNIAXIAL DO BLOCO E A TENSÃO DE RUPTURA À TRAÇÃO UNIAXIAL DO BLOCO.	18
FIGURA 2.8 – AUMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA SOB UM ESTADO MULTIAXIAL DE TENSÕES DE COMPRESSÃO.	19
FIGURA 2.9 – DIAGRAMA DE FASES DO SISTEMA $Al_2O_3-SiO_2$. FONTE AKSAY AND PASK APUD KINGERY ET AL. (1976).....	24
FIGURA 3.1 – BLOCO CERÂMICO ESTRUTURAL UTILIZADO.	26
FIGURA 3.2 – LOCAIS ONDE FORAM FEITAS AS MEDIÇÕES DA LARGURA (L) DOS BLOCOS.....	27
FIGURA 3.3 – LOCAIS ONDE FORAM FEITAS AS MEDIÇÕES DA ALTURA (H) DOS BLOCOS.....	27
FIGURA 3.4 – LOCAIS ONDE FORAM FEITAS AS MEDIÇÕES DO COMPRIMENTO (C) DOS BLOCOS.....	28
FIGURA 3.5 – ESQUEMA DE MEDIDA DO DESVIO EM RELAÇÃO AO ESQUADRO (D).....	28
FIGURA 3.6 – ESQUEMA DE MEDIDA DA PLANEZA DAS FACES (F).	29
FIGURA 3.7 - ENSAIO DE ÁREA LÍQUIDA: BLOCOS IMERSOS EM ÁGUA FERVENTE.....	30
FIGURA 3.8 - ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS.....	31
FIGURA 3.9 - ESQUEMA USADO PARA RETIRADA DAS AMOSTRAS.	32
FIGURA 3.10 - ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS....	35
FIGURA (3.11) - ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS CONTRAFIADOS.....	36
FIGURA 4.1 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 7, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.MATRIZ DE COR ALARANJADA (1),	44
FIGURA 4.2 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 7, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X. MATRIZ DE COR ALARANJADA (1), INCLUSÕES DE SÍLICA DE DIVERSOS TAMANHOS (2) E UMA GRANDE QUANTIDADE DE POROS ALONGADOS (3), NA DIREÇÃO DE EXTRUSÃO DO BLOCO (4).	44
FIGURA 4.3 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 7, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X. MATRIZ DE COR ALARANJADA (1), INCLUSÕES DE SÍLICA DE DIVERSOS TAMANHOS	

(2) E UMA GRANDE QUANTIDADE DE POROS ALONGADOS (3), NA DIREÇÃO PARALELA AO COMPRIMENTO DO BLOCO (4).....	45
FIGURA 4.4 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISPOSIÇÃO DOS POROS NOS BLOCOS; (A) SEGUNDO O CORTE B-B; (B) SEGUNDO O CORTE C-C; (C) SEGUNDO O CORTE A-A; (D) DISPOSIÇÃO DOS POROS NOS BLOCOS.....	47
FIGURA 4.5 - ESQUEMA TEÓRICO PROPOSTO PARA A FORMAÇÃO DE PLANOS DE RUPTURA. ...	48
FIGURA 4.6 - ESQUEMA DE NUCLEAÇÃO E PROPAGAÇÃO DAS TRINCAS ENTRE OS POROS.....	48
FIGURA 4.7 - BLOCO ROMPIDO POR COMPRESSÃO. A RUPTURA SE DEU SEGUNDO UM PLANO VERTICAL, PELA SEPARAÇÃO DE “CAMADAS”.....	49
FIGURA 4.8 – DETALHE DA FORMAÇÃO DE FISSURAS VERTICAIS EM UM PEDAÇO DE BLOCO ROMPIDO À COMPRESSÃO (UMA CAIXA DE FÓSFOROS FOI COLOCADA PARA EFEITO DE ESCALA).....	49
FIGURA 4.9 – MICROGRAFIA DO BLOCO 7, CORTE BB EM CAMPO CLARO (100X) PARA A QUANTIFICAÇÃO DA FASE DE SÍLICA.	51
FIGURA 4.10 – IMAGEM DA MICROGRAFIA DO BLOCO 7, CORTE BB EM CAMPO CLARO (100X) FILTRADA PARA DESTACAR A FASE DE SÍLICA.....	51
FIGURA 4.11 - MICROGRAFIA DO BLOCO 7, CORTE BB EM CAMPO ESCURO (100X) PARA A QUANTIFICAÇÃO DA FASE DE POROS.	52
FIGURA 4.12 - IMAGEM DA MICROGRAFIA DO BLOCO 7, CORTE BB EM CAMPO ESCURO (100X) FILTRADA PARA DESTACAR A FASE DE POROS.....	52
FIGURA 4.13 – FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS FASES PRESENTES NOS BLOCOS 2, 5 E 7.	53
FIGURA 4.14 – MICROGRAFIA DO BLOCO 0 (100X) INDICANDO OS PONTOS ONDE FORAM FEITAS ANÁLISES DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA (A). ESPECTROS DE EDS DO BLOCO 0 EM QUATRO DIFERENTES PONTOS. (B) PONTO A; (C) PONTO B; (D) PONTO C; (E) PONTO D.....	59
FIGURA 4.15 – MICROGRAFIA DO BLOCO 2 (100X) INDICANDO OS PONTOS ONDE FORAM FEITAS ANÁLISES DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA (A). ESPECTROS DE EDS DO BLOCO 2 EM QUATRO DIFERENTES PONTOS. (B) PONTO A; (C) PONTO B; (D) PONTO C; (E) PONTO D.....	60
FIGURA 4.16 – MICROGRAFIA DO BLOCO 5 (100X) INDICANDO OS PONTOS ONDE FORAM FEITAS ANÁLISES DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA (A). ESPECTROS DE EDS DO BLOCO 5 EM QUATRO DIFERENTES PONTOS. (B) PONTO A; (C) PONTO B; (D) PONTO C; (E) PONTO D.....	61
FIGURA 4.17 – MICROGRAFIA DO BLOCO 7 (100X) INDICANDO OS PONTOS ONDE FORAM FEITAS ANÁLISES DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA (A). ESPECTROS DE EDS DO BLOCO 7 EM QUATRO DIFERENTES PONTOS. (B) PONTO A; (C) PONTO B; (D) PONTO C; (E) PONTO D.....	62
FIGURA 4.18 – CURVA $F_p \times F_A$ PARA OS TRÊS TRAÇOS DE ARGAMASSA UTILIZADOS.	67
FIGURA 4.19 – INÍCIO DE RUPTURA DO PRISMA PELOS BLOCOS. FORMAÇÃO DE TRINCA VERTICAL AO LONGO DA DIREÇÃO DE EXTRUSÃO (1) E DESPRENDIMENTO DE PEQUENOS PEDAÇOS (2).....	68
FIGURA 4.20 – RUPTURA DO PRISMA PELA FORMAÇÃO DE PLANO DE RUPTURA PROVOCADA PELA TRAÇÃO NO BLOCO COM O DESPRENDIMENTO DE UM GRANDE PEDAÇO.	68
FIGURA 4.21 – CURVA $F_{PCF} \times F_A$ PARA OS TRÊS TRAÇOS DE ARGAMASSA UTILIZADOS.	72
FIGURA 4.22 – RUPTURA DE UM PRISMA CONTRAFIADOS. FORMAÇÃO DE TRINCAS VERTICAIS AO LONGO DA DIREÇÃO DE EXTRUSÃO (1) E DESPRENDIMENTO DE PEQUENOS PEDAÇOS (2). 73	

FIGURA 4.23 – CURVA F_{PCF} X F_p PARA OS TRÊS TRAÇOS DE ARGAMASSA UTILIZADOS.....	74
FIGURA 4.24 – RELAÇÕES ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS, PRISMAS E PRISMAS CONTRAFIADOS, COM OS TRAÇOS DE ARGAMASSA.....	76
FIGURA A1 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 0, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	89
FIGURA A2 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 0, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	89
FIGURA A3 – MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 0, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	90
FIGURA A4 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 0, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	90
FIGURA A5 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 0, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	91
FIGURA A6 - MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 0, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	91
FIGURA A7 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 0, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	92
FIGURA A8 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 0, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	92
FIGURA A9 - MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 0, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	93
FIGURA A10 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 2, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	93
FIGURA A11 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 2, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	94
FIGURA A12 – MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 2, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	94
FIGURA A13 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 2, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	95
FIGURA A14 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 2, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	95
FIGURA A15 - MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 2, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	96
FIGURA A16 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 2, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	96
FIGURA A17 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 2, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	97
FIGURA A18 - MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 2, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	97
FIGURA A19 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 5, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.....	98

FIGURA A20 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 5, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	98
FIGURA A21 – MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 5, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	99
FIGURA A22 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 5, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	99
FIGURA A23 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 5, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	100
FIGURA A24 - MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 5, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	100
FIGURA A25 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 5, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	101
FIGURA A26 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 5, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	101
FIGURA A27 - MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 5, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	102
FIGURA A28 - MICROGRAFIA 2 DO BLOCO 7, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	102
FIGURA A29 – MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 7, CORTE AA, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	103
FIGURA A30 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 7, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	103
FIGURA A31 - MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 7, CORTE BB, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	104
FIGURA A32 - MICROGRAFIA 1 DO BLOCO 7, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	104
FIGURA A33 - MICROGRAFIA 3 DO BLOCO 7, CORTE CC, EM CAMPO ESCURO COM UM AUMENTO DE 100X.	105

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA UTILIZADOS	34
TABELA 4.1 – LARGURA DOS BLOCOS	37
TABELA 4.2 – ALTURA DOS BLOCOS	38
TABELA 4.3 – COMPRIMENTO DOS BLOCOS	38
TABELA 4.4 – DESVIO EM RELAÇÃO AO ESQUADRO DOS BLOCOS	40
TABELA 4.5 – PLANEZA DAS FACES DOS BLOCOS	41
TABELA 4.6 – ÁREA LÍQUIDA DOS BLOCOS	41
TABELA 4.7 – ÁREA BRUTA DOS BLOCOS	42
TABELA 4.8 – CARGA DE RUPTURA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS BLOCOS	43
TABELA 4.9 – TAMANHO DAS INCLUSÕES DA FASE DE SÍLICA PARA OS BLOCOS 2, 5 E 7	55
TABELA 4.10 – TAMANHO DOS POROS PARA OS BLOCOS 0, 2, 5 E 7	56
TABELA 4.11 – DIÂMETRO MÉDIO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA	65
TABELA 4.12 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA	65
TABELA 4.13 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS NA ÁREA BRUTA	66
TABELA 4.14 – INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS	69
TABELA 4.15 – FATOR DE MAJORAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA	69
TABELA 4.16 – EFICIÊNCIA DOS PRISMAS	70
TABELA 4.17 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS CONTRAFIADOS NA ÁREA BRUTA	72
TABELA 4.18 – INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS PRISMAS CONTRAFIADOS	74
TABELA 4.19 – RAZÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS PRISMAS CONTRAFIADOS E DOS BLOCOS	75

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um estudo de caracterização de blocos cerâmicos estruturais. A finalidade principal é estudar aspectos da microestrutura desses blocos, determinantes no processo de sua ruptura à compressão. São utilizados 18 blocos cerâmicos estruturais, submetidos à compressão até a ruptura. Para a caracterização da microestrutura, retiram-se amostras de blocos específicos de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão. A observação da microestrutura é realizada com a utilização de microscopia ótica e de microscopia eletrônica de varredura. São também realizadas análises de composição química através de EDS “energy dispersion spectrometry”. Com a análise dos resultados identifica-se a existência de relações fundamentais entre formato e disposição dos poros presentes na microestrutura dos blocos e o processo de ruptura à compressão. Com base nestas relações, propõe-se um esquema teórico para o mecanismo de ruptura dos blocos cerâmicos estruturais. Também é apresentado um estudo quantitativo da microestrutura (metalografia) dos blocos cerâmicos estruturais. Adicionalmente são confeccionados prismas (dois blocos unidos por uma junta de argamassa) e prismas contrafiados (formados por um bloco e meio na base e com três fiadas de altura, unidos por juntas verticais e horizontais) com três diferentes traços de argamassa. Determina-se para os prismas e para os prismas contrafiados a resistência à compressão. São, então, propostas equações relacionando as propriedades medidas para cada um dos elementos (prismas e prismas contrafiados) estudados.

ABSTRACT

This work presents a study of characterization of structural ceramic blocks. The main goal of it is to investigate microstructure features of these blocks which determine their process of failure under compression. Eighteen ceramic blocks are subjected to compression up to failure. Samples are removed from specific blocks according to the results of the compression tests in order to characterize their microstructure. Investigation of microstructure is carried out by means of optical and scanning electron microscopy. Chemical analysis is realized by energy dispersion spectrometry (EDS). Analyzing the results, it is possible to identify the existence of a basic relationship between shape and distribution of pores present in the microstructure and the process of failure under compression. Based on this relationship, a model is proposed to explain the failure mechanism of structural ceramic blocks. A metallographic study of microstructure is also presented. In addition, prisms (two blocks on top of each other joined by mortar) and small scale walls are assembled using three different mortar mixes. Prisms and small scale walls have strength determined. Finally, equations are proposed to relate measured properties of each element (prism and small wall) studied.

1 Introdução

Desde as civilizações mais antigas se tem construído edificações em alvenaria. Em uma edificação em alvenaria estrutural pode-se chegar a uma economia de até 25% do custo total de uma obra, ampliando-se muito a possibilidade de acesso à moradia de uma parcela importante da população. Este aspecto tem uma grande importância em um país que convive com sérios problemas econômicos e sociais, agravados pela grande falta de moradia, o que tem gerado uma ocupação desordenada dos grandes centros urbanos.

No Brasil, a partir da década de 70, devido a um grande aumento do déficit habitacional, se começou a construir e pesquisar alvenaria estrutural de forma mais acentuada. Devido à tradição brasileira em obras de concreto armado, os investimentos e pesquisas foram centrados na alvenaria estrutural de blocos de concreto o que culminou com a elaboração de um conjunto de normas técnicas para alvenaria estrutural de blocos de concreto a partir da década de 80.

A alvenaria estrutural de blocos cerâmicos ficou em segundo plano de forma que até hoje não se dispõe, no Brasil, das normas necessárias para a sua utilização segura. Atualmente se dispõe apenas de um número reduzido de normas para a alvenaria de blocos cerâmicos. Estas normas tratam tanto da alvenaria estrutural como da alvenaria de vedação, não sendo, portanto, específicas para a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Isto tem levado a interpretações errôneas e perigosas. O que se tem feito para preencher esta lacuna é recorrer a normas internacionais e a adaptações da norma para a alvenaria estrutural de blocos de concreto.

Encontra-se em fase de elaboração, um conjunto completo de normas para a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. Ao longo deste trabalho, foram utilizados alguns desses projetos de norma, pois se avaliou que estes fazem uma abordagem mais atual, refletindo a nova tendência na utilização da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos no Brasil. Não se recorreu, portanto, salvo indicação em contrário, a normas internacionais e a adaptações das normas para blocos de concreto.

A utilização da alvenaria estrutural no Brasil ainda convive com conceitos e procedimentos inadequados, pondo muitas vezes em risco, a segurança dos habitantes. Atualmente, ainda persistem alguns questionamentos importantes, basicamente no que diz respeito à caracterização e ao comportamento conjunto dos materiais principalmente dos blocos cerâmicos. O uso inadequado da alvenaria estrutural vem ocasionando a ocorrência de problemas graves em obras, inclusive com vítimas fatais e, portanto, induzindo a “preconceito” e reação à sua utilização.

Este trabalho tem como objetivo principal determinar características na microestrutura de blocos cerâmicos estruturais determinantes no processo de sua ruptura à compressão. Para isso, utilizam-se 18 blocos que são submetidos à compressão até a ruptura.

O segundo capítulo trata dos conceitos e definições gerais sobre a alvenaria estrutural bem como um breve histórico da sua utilização e evolução desde a antiguidade até os dias atuais. São mostrados os mecanismos de ruptura da alvenaria em função do comportamento de seus componentes.

No terceiro capítulo mostram-se todos os ensaios que foram realizados ao longo deste trabalho. Detalham-se todos os materiais, equipamentos e procedimentos experimentais que foram utilizados para a realização destes experimentos. Também são descritos os equipamentos e técnicas que foram utilizados na caracterização da microestrutura dos blocos cerâmicos estruturais.

O quarto capítulo é o cerne do trabalho. Nele são apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios e medidas que foram realizados bem como as análises da microestrutura.

Para a caracterização da microestrutura, são retiradas amostras de blocos específicos de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de ruptura à compressão. O estudo da microestrutura é realizado com a utilização de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. Também são realizadas análises de composição química através de EDS “energy dispersion spectrometry” – espectroscopia por dispersão de energia em equipamento acoplado a um microscópio eletrônico de varredura. Com os resultados obtidos identifica-se a existência de relações fundamentais entre formato e disposição dos poros presentes na microestrutura e o processo de ruptura à compressão. Com base nestas relações, propõe-se um esquema teórico para a ruptura dos blocos através do qual se explica porque os blocos cerâmicos estruturais apresentam eficiência bem menor que os blocos de concreto estruturais. Também se apresenta um estudo quantitativo da microestrutura (metalografia). Pode-se constatar a existência de um conjunto de relações entre características das fases presentes na microestrutura dos blocos e o seu comportamento à compressão.

Adicionalmente são dosados três traços de argamassa para os quais se realizaram ensaios de resistência à compressão. Para cada um dos traços dosados, confeccionam-se prismas (dois blocos unidos por uma junta de argamassa) e prismas contrafiados (formados por um bloco e meio na base e com três fiadas de altura, unidos por juntas verticais e horizontais). Para os prismas e para os prismas contrafiados determina-se a

resistência à compressão. Com base nos resultados obtidos, são desenvolvidas equações relacionando as propriedades medidas para cada um dos elementos (prismas e prismas contrafiados) estudados.

Avalia-se também, a influência das propriedades dos componentes (blocos e argamassa) no comportamento dos elementos da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões finais deste trabalho bem como algumas sugestões para futuras pesquisas que poderão complementá-lo. Por fim, têm-se os seguintes anexos:

Anexo A – Micrografias feitas para os blocos 0, 2 ,5 e 7, que foram usadas nos estudos da microestrutura e de quantificação de fases.

Anexo B – Formulário de levantamento do sistema produtivo dos blocos cerâmicos estruturais utilizados neste trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Conceito de alvenaria estrutural

GALLEGOS (1991) define a alvenaria como um material estrutural composto que, em sua forma tradicional, é formado por unidades básicas, assentadas com argamassa e, portando, fracamente ligadas. Trata-se de um material heterogêneo e anisotrópico, que tem por natureza, uma resistência à compressão elevada e dependente principalmente da resistência das unidades básicas, os blocos. A resistência à tração é baixa e depende da aderência entre as unidades e a junta de argamassa.

PRUDÊNCIO JR. et al. (2002) consideram a alvenaria estrutural um tipo de estrutura em que as paredes são elementos portantes, compostos por unidades de alvenaria, unidos por juntas de argamassa e capazes de resistirem a outras cargas além de seu peso próprio.

Segundo RAMALHO e CORRÊA (2003), o principal conceito ligado à utilização da alvenaria estrutural é a transmissão de ações através de tensões de compressão. Esse é mais importante conceito a ser levado em conta quando se discute a alvenaria como processo construtivo para a elaboração de estruturas. Tensões de tração devem, preferencialmente, se restringir a regiões limitadas da estrutura e não apresentar valores muito elevados. Se as trações ocorrerem de forma generalizada, este tipo de estrutura pode ser até tecnicamente viável, mas não será economicamente adequada.

Pode-se, então, concluir que em uma edificação de alvenaria estrutural são as paredes que resistem às ações verticais e horizontais, transmitindo-as às fundações através de tensões de compressão. São, portanto, responsáveis pela segurança do edifício, substituindo as vigas e os pilares das estruturas convencionais de concreto armado. Cumprem, portanto, um papel duplo de estrutura e vedação.

De acordo com a norma brasileira NB-1228 (1989), a alvenaria estrutural pode ser classificada em três categorias:

- Alvenaria estrutural não armada: Aquela construída com blocos vazados, assentados com argamassa e que contém armaduras com finalidade construtiva ou de amarração, não sendo esta considerada na absorção dos esforços calculados.
- Alvenaria estrutural armada: Aquela construída com blocos vazados, assentados com argamassa, na qual certos furos são preenchidos continuamente com graute, contendo armaduras para absorver os esforços calculados além daquelas com finalidades construtivas ou de amarração.

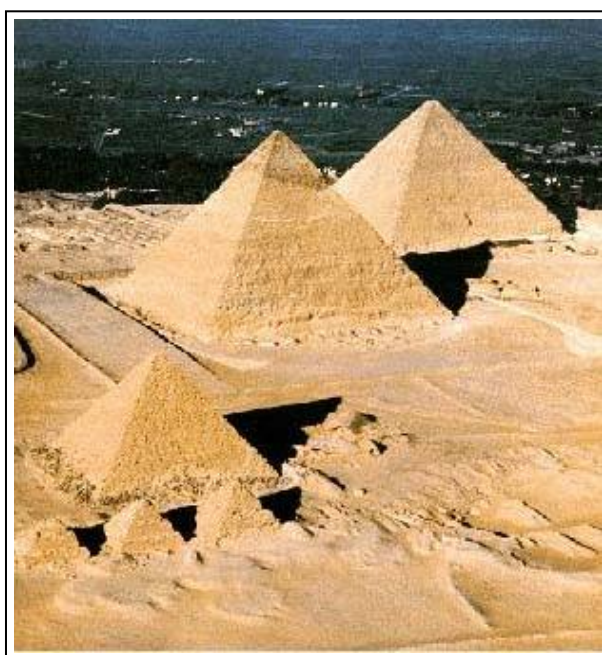
- Alvenaria estrutural parcialmente armada: Aquela em que algumas paredes são construídas segundo as recomendações da alvenaria armada, sendo as paredes restantes consideradas não armadas.

2.2 Aspectos históricos da alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural é o sistema construtivo mais antigo de que se tem notícia, tendo sido utilizado desde o início da atividade humana. Segundo GALLEGOS (1991), é provável que a alvenaria tenha sido inventada por um nômade a cerca de 15000 anos. Ao não encontrar refúgio natural para se proteger do frio, decidiu empilhar pedras construindo um local onde pudesse se abrigar.

Conforme a NATIONAL CONCRETE MASONRY ASSOCIATION apud PRUDÊNCIO JR. et al. (2002), no ano de 4000 a.C. a argila passou a ser trabalhada, possibilitando a produção de tijolos. Alguns anos depois os romanos desenvolveram a argamassa de cal utilizada tanto para assentamento como para revestimento.

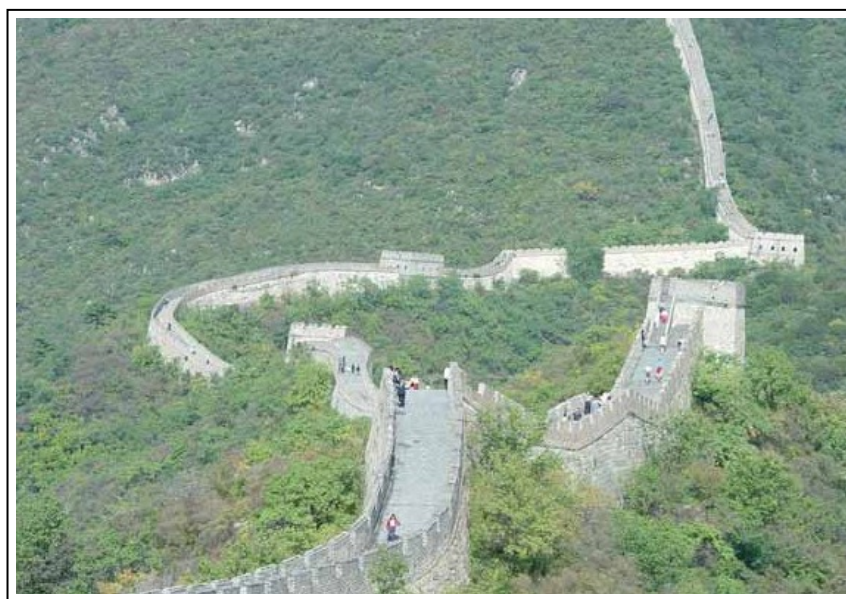
A falta de conhecimento dos materiais e a utilização de técnicas rudimentares não impediram a construção de obras monumentais de alvenaria estrutural. As pirâmides do Egito (figura 2.1a), o Pátemon na Grécia, o Coliseo em Roma (figura 2.1b) e a muralha da China (figura 2.1c), podem ser citados como exemplos da capacidade, confiabilidade e durabilidade e deste sistema.



(a)



(b)



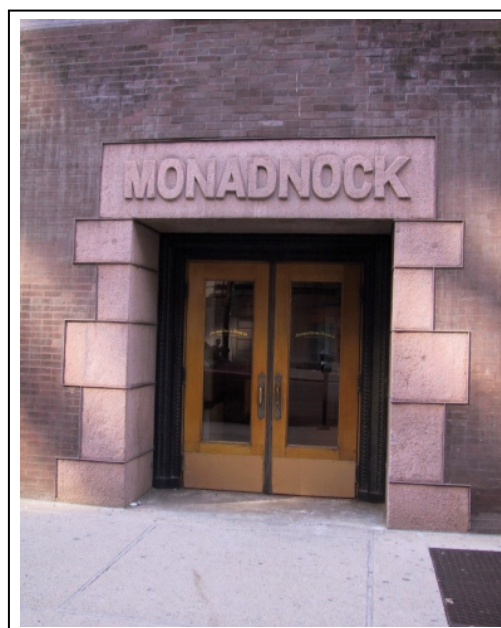
(c)

Figura 2.1 – Obras históricas construídas em alvenaria estrutural.(a) Pirâmides do Egito; (b) Coliseo, em Roma; (c) Muralha da China.

Entre 1889 e 1891, foi construído em Chicago, o edifício Monadnock (figura 2.2). Com 16 pavimentos e 65m de altura, foi o primeiro arranha-céu em alvenaria estrutural. Em sua base, as paredes tinham 1,80m de largura e foram dimensionadas utilizando-se métodos empíricos que eram os únicos disponíveis à época.



(a)



(b)

Figura 2.2 – Edifício Monadnock, Chicago (1891). (a) Fachada mostrando os seus 16 pavimentos; (b) Paredes do pavimento térreo com 1,80m de largura.

PRUDÊNCIO JR. et al. (2002) comenta que, até o final do século XIX, a alvenaria predominou como material estrutural. Entretanto, devido à ausência de procedimentos racionais de dimensionamento, as estruturas eram muito robustas e pouco econômicas. Nessa época, surgiram as estruturas de aço e de concreto armado. Fundamentadas em teorias racionais de cálculo, e devido ao grande arrojo e flexibilidade de forma que possibilitaram às edificações, esses novos tipos de estrutura proliferaram pelo mundo deixando a alvenaria estrutural relegada a um segundo plano.

Segundo RAMALHO e CORRÊA (2003), edifícios altos de alvenaria estrutural foram construídos no Brasil a partir de 1972. Inicialmente construiu-se em São Paulo o condomínio Central Parque Lapa com 4 blocos de 12 pavimentos em alvenaria armada de blocos de concreto. Logo depois veio o edifício Muriti, em São José dos Campos, com 16 pavimentos também em alvenaria armada de blocos de concreto.

Atualmente a utilização da alvenaria estrutural, principalmente a de blocos de concreto, se encontra bastante difundida no Brasil, concentrando-se nas regiões sul e sudeste. Apesar de dirigida essencialmente para habitações populares, a alvenaria estrutural já rompeu esta barreira. Edifícios de padrão médio e até mesmo de alto padrão tem sido construídos utilizando-se esta técnica.

2.3 Componentes da alvenaria estrutural

Segundo RAMALHO e CORRÊA (2003), entende-se por componente da alvenaria, uma entidade básica, ou seja, algo que compõe os elementos. Os elementos, por sua vez, irão compor a estrutura. Os componentes principais da alvenaria estrutural são: blocos, argamassa, graute e armadura. Os elementos da alvenaria estrutural são aqueles formados por pelos menos dois componentes. Como exemplo de elementos podemos citar: prismas, paredes, cintas, verga e contra-vergas.

2.3.1 Blocos

Segundo GALLEGOS (1991), os blocos são os componentes básicos para a execução da alvenaria.

Os blocos respondem por cerca de 80% do volume total das paredes e, portanto, desempenham um papel fundamental para a sua resistência. Na maioria dos casos, quanto mais resistente for o bloco, mais resistente será a alvenaria. No Brasil, se utilizam principalmente blocos de concreto e blocos cerâmicos tendo-se respectivamente a alvenaria estrutural de blocos de concreto e a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos.

Conforme o projeto de norma NBR XX02/2003 – REV. 16 (2003), os blocos cerâmicos estruturais são componentes da alvenaria estrutural que possuem furos prismáticos perpendiculares às faces que os contêm, são assentados com os furos na vertical e são produzidos por conformação plástica de matéria-prima argilosa contendo ou não aditivos e queimados a elevadas temperaturas. O projeto de norma citado também adota as seguintes definições, que são utilizadas neste trabalho:

- Área bruta: Área da seção perpendicular aos eixos dos furos, sem o desconto das áreas desses furos;
- Área líquida: Área da seção perpendicular aos eixos dos furos, com o desconto das áreas desses furos;
- Área argamassada: Área da seção perpendicular aos eixos dos furos, correspondente à área ocupada pela argamassa de assentamento;
- Bloco cerâmico estrutural de paredes vazadas: É aquele cujas paredes externas e internas apresentam vazados, sendo a razão da área líquida para a área bruta não maior que 60% (figura 2.3a);
- Bloco cerâmico estrutural com paredes maciças: É aquele cujas paredes externas são maciças e as internas podem apresentar vazados, sendo a razão da área líquida para a área bruta não maior que 65% (figura 2.3b);

- Bloco cerâmico estrutural perfurado: É aquele com vazados distribuídos em toda a sua face de assentamento sendo a razão da área líquida para a área bruta não maior que 75% (figura 2.3c).

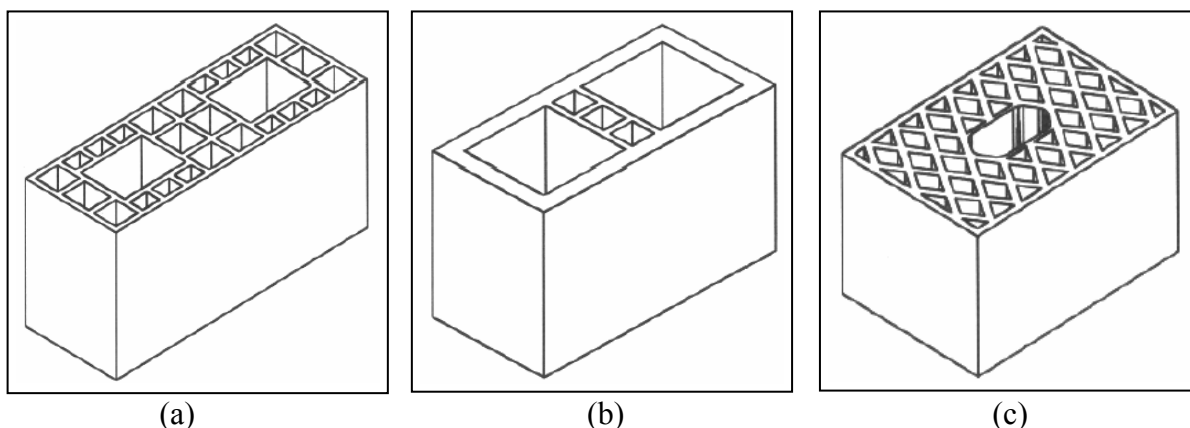


Figura 2.3 - Esquema de blocos cerâmicos estruturais. (a) Paredes vazadas; (b) Paredes maciças; (c) Perfurado.

Devido à grande importância que tem para a resistência da alvenaria, os blocos estruturais devem ser fabricados sob condições rígidas de controle, de modo a apresentarem propriedades uniformes. Infelizmente, no Brasil, não se convive com esta realidade, principalmente quando se trata de blocos cerâmicos estruturais. Estes blocos são produzidos em condições extremamente diversas. Tem-se desde sofisticadas fábricas que produzem blocos de alta qualidade, com propriedades uniformes e respeitando todas as especificações de norma, até olarias precárias, muitas vezes temporárias produzindo blocos sem nenhum tipo de controle de qualidade.

Devido a essas diferenças, GALLEGOS (1991) recomenda que, a qualidade dos blocos estruturais seja controlada através do coeficiente de variação de suas propriedades significativas. O coeficiente de variação é um parâmetro estatístico que mede o efeito da variação ou dispersão em relação à média. Ele é calculado através da razão entre o desvio padrão e a média (equação 2.1).

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2.1)$$

Onde:

v : coeficiente de variação

σ : desvio padrão

\bar{x} : média

É importante se apresentar aqui a definição de prisma. Segundo o projeto de norma NBR XX03/2003 – REV. 23 (2004) tem-se:

- Prisma oco: Elemento composto pela justaposição de dois blocos cerâmicos unidos por junta de argamassa, destinado ao ensaio de compressão axial.
- Prisma cheio: Elemento composto pela justaposição de dois blocos cerâmicos unidos por junta de argamassa, tendo seus vazios usados para o grauteamento, preenchidos por graute destinado ao ensaio de compressão axial.

Neste trabalho foram usados apenas prismas ocos que são chamados simplesmente de prismas.

O prisma é, portanto, o elemento da alvenaria estrutural usado para avaliar o comportamento conjunto do bloco e da argamassa. A ele está ligado um conceito fundamental utilizado para a avaliação do comportamento das alvenarias. Trata-se da eficiência do prisma que é definida como a razão entre a resistência à compressão do prisma e a resistência à compressão do bloco (equação 2.2). Também se pode definir a eficiência da parede, que é a razão entre a resistência à compressão da parede e a resistência à compressão do bloco (equação 2.3).

$$\eta_p = \frac{f_p}{f_b} \quad (2.2)$$

$$\eta_{par} = \frac{f_{par}}{f_b} \quad (2.3)$$

Onde:

η_p : Eficiência do prisma

η_{par} : Eficiência da parede

f_p : Resistência à compressão do prisma

f_{par} : Resistência à compressão da parede

f_b : Resistência à compressão do bloco

2.3.2 Argamassa

Segundo GALLEGOS (1991), a argamassa tem a função de absorver as irregularidades inevitáveis existentes na superfície dos blocos e, sobretudo, uni-los ou aderi-los com relativa estabilidade durante o processo construtivo. A argamassa deve prover a rigidez necessária para garantir o assentamento da fiada seguinte e, para formar um conjunto durável, impermeável e com alguma resistência à tração.

Segundo RAMALHO e CORRÊA (2003), a argamassa de assentamento possui as funções básicas de solidarizar os blocos, transmitir e uniformizar as tensões, absorver pequenas deformações e prevenir a entrada de água e de vento nas edificações. Usualmente composta de cimento, cal, areia e água, a argamassa deve reunir boas características de trabalhabilidade, resistência, plasticidade e durabilidade para o desempenho de suas funções.

GALLEGOS (1991), ressalta a importância de se distinguir as propriedades da argamassa no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco a propriedade essencial da argamassa é a trabalhabilidade. A argamassa com uma trabalhabilidade adequada é aquela que pode ser manipulada e espalhada com facilidade sobre as superfícies horizontais e verticais dos blocos, se aderindo facilmente e estabelecendo um contato completo com as irregularidades presentes. Outra propriedade importante da argamassa no estado fresco é a retenção de água. PRUDÊNCIO JR. et al. (2002), define a retenção de água como a capacidade da argamassa de opor resistência à perda de água quando em contato com os blocos, que são, em geral, ávidos por água. Se a argamassa não possui boa retenção, a mesma enrijecerá rapidamente, dificultando ou até mesmo impedindo o assentamento da fiada seguinte e a completa hidratação do cimento. Se a retenção de água for muito elevada, será difícil manter a correta espessura da junta de argamassa, principalmente depois da confecção das fiadas subseqüentes.

Segundo GALLEGOS (1991), as propriedades da argamassa no estado endurecido são a aderência e a resistência à compressão.

A aderência é uma propriedade essencial da argamassa, que vai garantir a solidarização entre os blocos e, portanto, depende das características do bloco que está sendo utilizado. Já a resistência à compressão da argamassa é tida como uma propriedade com importância secundária.

Segundo RAMALHO e CORRÊA (2003), deve-se destacar pelo menos dois fatores quando se trata da influência da argamassa na resistência à compressão das paredes. O primeiro diz respeito à espessura da junta horizontal que deve se situar dentro de limites bem estreitos, em torno de 10mm. O segundo diz respeito a resistência

à compressão argamassa que deve estar entre 70% e 100% da resistência do bloco na área bruta não devendo ser inferior a 40%.

A argamassa é, portanto, o componente de ligação entre os blocos sendo constituída por cimento, cal, areia e água. Responde por cerca de 20% do volume total da parede desempenhando, pois, um papel secundário para a resistência. Entretanto, cabe à argamassa o papel fundamental de controlar o tipo de ruptura das paredes. De maneira geral, em paredes com juntas de argamassa muito resistentes, a ruptura se dará nos blocos sendo, portanto, uma ruptura frágil, o que não é desejável. Em paredes com juntas de argamassa com uma resistência adequada, a ruptura ocorrerá primeiro na junta de argamassa e depois no bloco, o que garante um menor grau fragilidade à alvenaria, sendo, portanto, desejável. Diante disso, pode-se atribuir à junta de argamassa o papel de conferir ductilidade às paredes de alvenaria estrutural.

PRUDÊNCIO JR. et al. (2002) comenta que, apesar do uso de argamassas de assentamento de blocos de alvenaria datar dos primórdios da civilização, só nas últimas décadas é que se deu um enfoque e um tratamento racionais de sua tecnologia. Inicialmente, os avanços eram alcançados por um processo de tentativa e erro e a técnica era passada de geração para geração. Atualmente, apesar de haver um crescente interesse científico e tecnológico neste material, muitos dos vícios e do desconhecimento do meio técnico da construção, no que se refere à sua formulação, persistem.

É importante destacar que as argamassas utilizadas na alvenaria estrutural devem ser mistas, ou seja, devem ter a cal como um de seus componentes. A cal otimiza as propriedades da argamassa conferindo-lhe plasticidade, coesão, retenção de água e principalmente uma melhoria de sua aderência, sendo, portanto, fundamental.

Como a argamassa e o concreto são elaborados basicamente a partir dos mesmos componentes (aglomerantes e agregados), há uma tendência de se confundir esse dois materiais que tem funções totalmente diferentes. O concreto, como um material estrutural, tem como meta básica a resistência. Já a argamassa é um adesivo e, portanto, a aderência é o seu principal objetivo. Portanto, a elaboração de uma boa argamassa não segue as mesmas diretrizes do concreto sendo muitas vezes completamente diferentes.

2.3.3 Graute

Segundo o American Concrete Institute-ACI em PRUDÊNCIO JR. et al. (2002), o graute é definido como uma mistura de materiais cimentícios e água, com ou sem

agregados graúdos, em proporção tal que se obtenha uma consistência líquida sem segregação de seus constituintes.

RAMALHO e CORRÊA (2003), definem o graute como um concreto com agregados de pequena dimensão e relativamente fluido, eventualmente necessário para o preenchimento dos vazios dos blocos. Sua função é propiciar o aumento da área líquida da seção transversal dos blocos ou promover a solidarização dos blocos com eventuais armaduras colocadas em seus vazios.

O Graute é, portanto, um concreto bastante fluido constituído por cimento, agregados e água que é utilizado para preencher os furos dos blocos, aumentando assim a sua área líquida e, portanto, sua capacidade de carga. O graute ideal é aquele que garante um aumento da capacidade de carga das paredes tão somente pelo aumento da área líquida (não havendo dessa forma aumento da resistência das paredes). Ele também deve ser capaz de garantir o funcionamento monolítico do conjunto bloco-graute-armadura, bem como proteger as armaduras contra a corrosão.

O graute é elaborado com os mesmos componentes do concreto, porém deve-se atingir uma elevada fluidez. Isto é necessário para permitir que ele preencha completamente os furos dos blocos em uma parede ao longo da sua altura. Têm-se então dois fatores que exigem esta alta fluidez. O primeiro é a pequena dimensão dos furos dos blocos muitas vezes ainda diminuída pela presença de armadura. O segundo é a grande altura a ser preenchida pelo graute que normalmente exige que o lançamento seja feito em duas etapas limitando esta altura à metade da altura da parede.

Para se atingir essa fluidez elevada é necessária a utilização de grandes quantidades de água o que pode resultar em um produto final muito poroso e conseqüentemente com uma baixa resistência à compressão. Esta queda da resistência não ocorre pois os blocos onde o graute será colocado absorvem o excesso de água o que diminui a relação água/cimento e resulta em uma maior resistência à compressão.

Combinações inadequadas de graute com o bloco podem afetar negativamente as propriedades da parede. Por exemplo, se o graute tiver um módulo de deformação muito menor do que o bloco, ele terá uma deformação transversal exagerada levando a uma ruptura por tração das paredes dos blocos. Estes problemas se tornam mais críticos na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos devido às diferenças existentes entre as propriedades dos dois materiais (concreto e cerâmica).

2.3.4 Armadura

São Barras de aço (do mesmo tipo utilizado em estruturas de concreto) colocadas nos furos dos blocos que deverão ser preenchidos com graute para que se garanta a solidarização bloco-graute-armadura. Tem a função de reforçar as paredes aumentando, portanto, sua capacidade de carga, combater eventuais esforços de tração e reforçar, determinadas regiões onde se observam concentrações de tensões.

É importante destacar as duas funções distintas da armadura que pode ser encontrada nas paredes de alvenaria estrutural. A primeira é combater eventuais esforços de tração oriundos de deformações volumétricas (devido à retração, variações de temperatura e de umidade) e reforçar determinadas regiões onde ocorrem concentrações de tensões (bordas de aberturas e extremidades de paredes). Trata-se, portanto, de uma armadura construtiva, que não é calculada, sendo encontrada em todas as categorias de alvenaria estrutural (não armada, parcialmente armada e armada). A segunda função é a de reforçar as paredes aumentando, portanto, sua capacidade de carga. Trata-se, portanto, de uma armadura obrigatória, calculada, sem a qual as paredes não resistem aos esforços de compressão aos quais estão submetidas. Esta armadura é encontrada apenas na alvenaria armada. Ressalta-se, que o aumento da capacidade de carga da alvenaria permitido pela NB 1228 (1989), em função colocação de armadura, é muito reduzido.

2.4 Mecanismos de ruptura da alvenaria estrutural

Segundo GALLEGOS (1991), a alvenaria é um material composto, heterogêneo e anisotrópico em que se reúnem, com um comportamento único, materiais com características elásticas distintas. As juntas horizontais, devido a sua natureza contínua, dividem a alvenaria em camadas (as fiadas) lhe dando a aparência de um material composto laminado. Por outro lado, quando os furos dos blocos estão preenchidos com graute, se consegue atingir um determinado grau de continuidade o que diminui o caráter anisotrópico do conjunto.

Várias pesquisas têm sido desenvolvidas na tentativa de se elaborar modelos matemáticos que sejam capazes de prever a resistência à compressão de uma parede de alvenaria estrutural.

GALLEGOS (1991), comenta que os primeiros estudos sobre este assunto foram realizados por Haller em 1959 e se basearam em uma análise elástica do sistema bloco-argamassa. Os resultados obtidos não condiziam com a realidade, uma vez que foram

encontrados, para a resistência à compressão dos prismas, valores maiores que os da resistência à compressão dos blocos.

Posteriormente, HILLSDORF apud GALLEGOS (1991), em 1969 e FRANCIS et al. apud GALLEGOS (1991), em 1970, de forma independente, desenvolveram modelos elásticos baseados na resistência e na deformação do bloco e da argamassa submetidos a esforços multiaxiais. FRANCIS et al. Apud RAMALHO e CORRÊA (2003), se basearam na deformação unitária dos materiais para fundamentar seu modelo enquanto que HILLSDORF apud RAMALHO e CORRÊA (2003), baseou-se nos esforços resistidos pelos materiais. Estes pesquisadores, apesar de terem trabalhado separadamente, adotaram as mesmas hipóteses para elaborar suas pesquisas:

- Blocos sólidos, isto é, sem furos;
- Relação linear, ou de Coulomb, entre o valor da resistência à tração biaxial e a resistência à compressão uniaxial, para definir a envoltória de ruptura do bloco submetido a um carregamento triaxial;
- Esforços laterais de tração uniformes ao longo da altura dos blocos;
- Esforços de tração iguais nas duas direções laterais dos blocos;
- Aderência perfeita entre a argamassa e os blocos.

Quando o bloco está inserido no contexto de uma parede submetida a uma ação de compressão, como apresentado na figura (2.4), surgem tensões que serão transmitidas através de seus componentes de formas distintas.

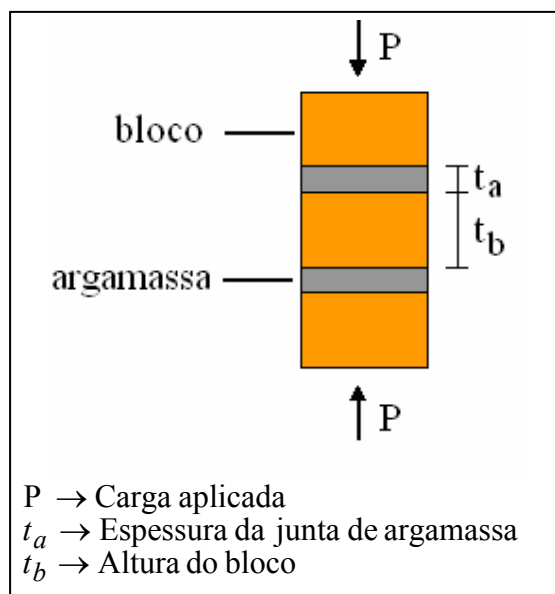


Figura 2.4 – Esquema de uma parede comprimida.

Segundo DUARTE (1999), a argamassa apresenta um módulo de deformação menor que o do bloco, porém seu coeficiente de Poisson é maior. Devido a essas diferenças de propriedades, quando bloco e argamassa trabalham em conjunto sob compressão, a argamassa se deforma mais que o bloco e, de forma simplificada, em uma parede com blocos e argamassa (sem graute), a solicitação dos componentes dar-se-á como no esquema apresentado na figura (2.5).

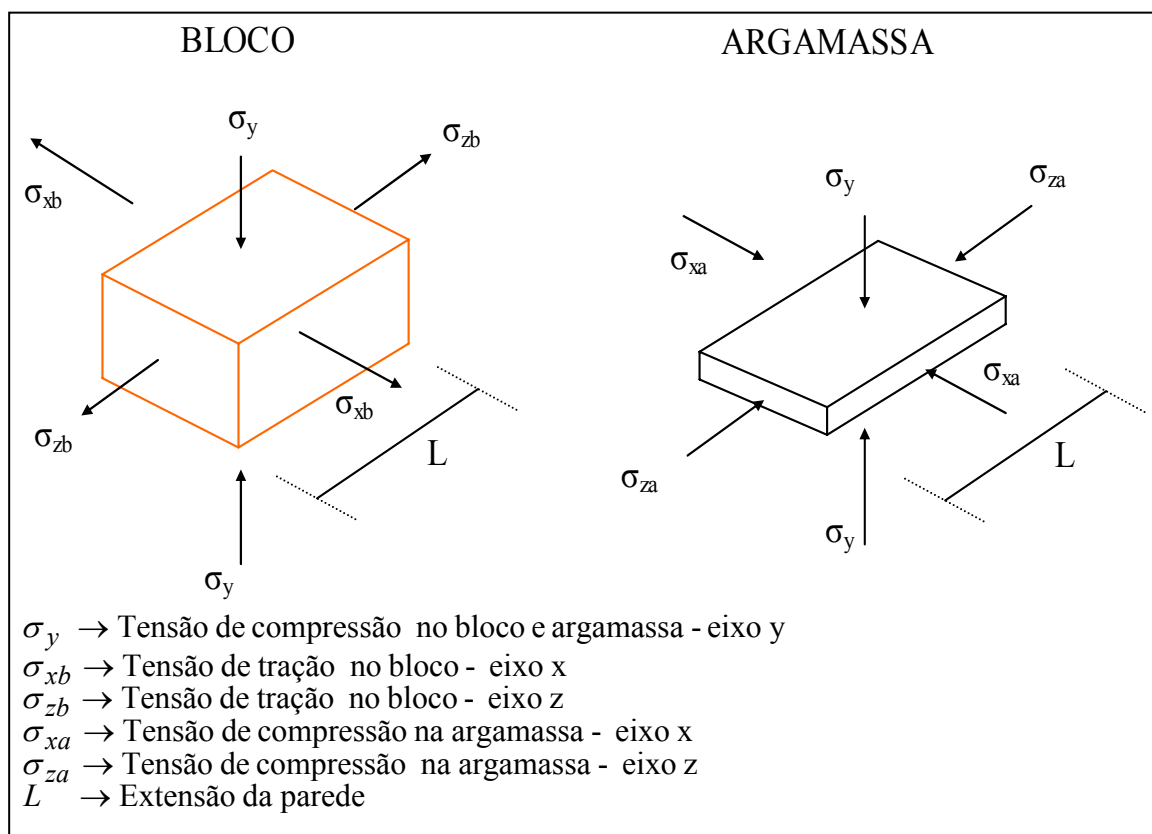


Figura 2.5 – Esquema de distribuição de tensões no bloco e argamassa em uma parede comprimida.

Como se pode observar, o bloco está submetido a uma combinação de compressão axial e tração biaxial gerando um estado biaxial de tensões compressão-tração. Isto caracteriza uma situação desfavorável, por tratar-se de material frágil. Sob estas circunstâncias o bloco apresenta uma resistência à compressão menor que a obtida para o mesmo, em um ensaio de compressão uniaxial. Quando colocado para trabalhar em uma parede, o bloco irá, portanto, atingir a ruptura sob solicitações menores do que se estivesse trabalhando isoladamente.

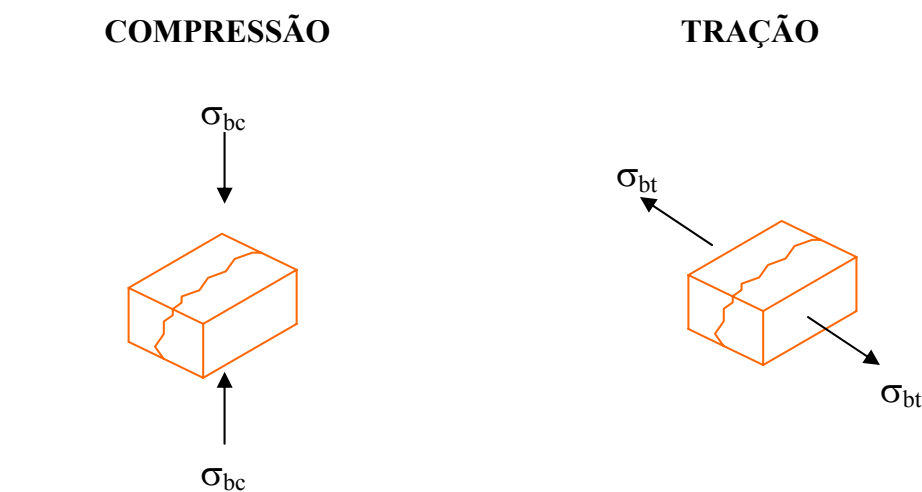
A argamassa, entretanto, está submetida a um estado triaxial de compressão o que lhe confere um aumento na sua capacidade resistente. Quando inserida em uma parede a

argamassa apresenta, portanto, uma resistência maior que a encontrada quando ela trabalha isoladamente.

Pode-se compreender melhor as diferentes possibilidades de ruptura da alvenaria quando se analisa isoladamente seus componentes.

2.4.1 Comportamento do bloco

Segundo DUARTE (1999), quando submetidos ao ensaio de compressão ou de tração, os blocos apresentam a mesma configuração de ruptura (figura 2.6).



Onde:

σ_{bc} → Tensão de ruptura à compressão uniaxial do bloco

σ_{bt} → Tensão de ruptura à tração uniaxial do bloco

Figura 2.6 – Esquema de ruptura dos blocos quando submetidos à compressão uniaxial ou tração uniaxial.

Considerando uma relação linear entre a tensão de ruptura à compressão uniaxial do bloco e a tensão de ruptura à compressão uniaxial da argamassa, a ruptura dos blocos quando submetidos à compressão uniaxial e tração uniaxial combinadas, pode então ser representada pela reta da figura (2.7).

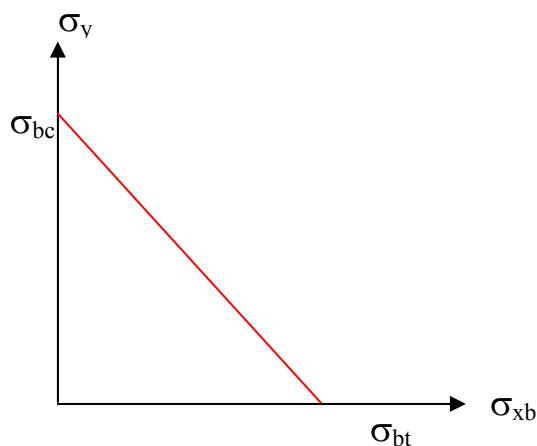


Figura 2.7 – Gráfico da relação entre a tensão de ruptura à compressão uniaxial do bloco e a tensão de ruptura à tração uniaxial do bloco.

Temos então a equação (2.4), que representa a ruptura do bloco submetido a um estado de tensões de compressão e tração combinadas:

$$\sigma_{xb} = \sigma_{bt} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_{bc}} \right) \quad (2.4)$$

Onde:

- σ_y → Tensão de compressão no bloco - eixo y
- σ_{xb} → Tensão de tração no bloco - eixo x
- σ_{bc} → Tensão de ruptura à compressão uniaxial do bloco
- σ_{bt} → Tensão de ruptura à tração uniaxial do bloco

2.4.2 Comportamento da argamassa

De acordo com CHEEMA e KLINGLER Apud MOHAMAD et al. (2002a), o aumento da resistência à compressão da argamassa devido a um estado multiaxial de tensões de compressão, pode ser representada pelo gráfico de uma reta com coeficiente angular de 4,1 (figura 2.8).

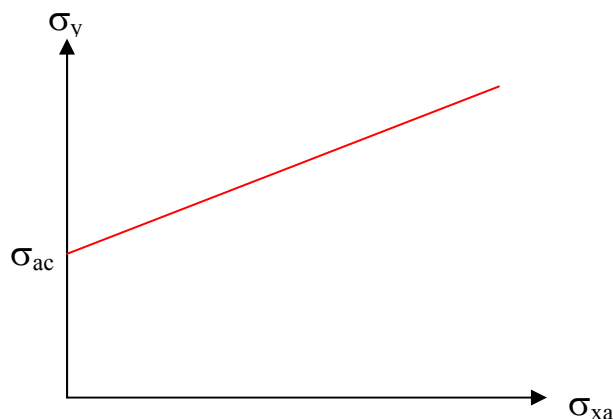


Figura 2.8 – Aumento da resistência à compressão da argamassa sob um estado multiaxial de tensões de compressão.

Temos então a equação (2.5) que representa a ruptura da argamassa submetida a um estado multiaxial de tensões de compressão:

$$\sigma_{xa} = \frac{\sigma_y - \sigma_{ac}}{4.1} \quad (2.5)$$

Onde:

σ_y → Tensão de compressão na argamassa - eixo y

σ_{xa} → Tensão de compressão na argamassa - eixo x

σ_{ac} → Tensão de ruptura à compressão uniaxial da argamassa

Considerando o equilíbrio na direção horizontal tem-se a equação (2.6):

$$\sigma_{xb} \cdot t_b \cdot l = \sigma_{xa} \cdot t_a \cdot l \Rightarrow \sigma_{xb} = \sigma_{xa} \cdot \left(\frac{t_a}{t_b} \right) \quad (2.6)$$

2.4.3 Comportamento simultâneo da argamassa e do bloco

Quando a ruptura ocorre através do bloco, ela se dá de acordo com a equação (2.4) vista anteriormente.

Quando a ruptura ocorre através da argamassa, ela se dá de acordo com a equação (2.5) já deduzida. Considerando esta hipótese, teremos a expressão da equação (2.7), a seguir, para a tensão de tração no bloco.

$$\sigma_{xb} = \sigma_{xa} \cdot \left(\frac{t_a}{t_b} \right) \Rightarrow \sigma_{xb} = \frac{\sigma_y - \sigma_{ac}}{4.1} \cdot \left(\frac{t_a}{t_b} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma_{xb} = (\sigma_y - \sigma_{ac}) \cdot \lambda \quad (2.7)$$

Onde:

$$\lambda = \left(\frac{t_a}{t_b \cdot 4.1} \right)$$

Igualando os valores da tensão de tração no bloco no eixo x, quando a ruptura se dá através do bloco (equação 2.4) e quando a ruptura se dá através da argamassa (equação 2.7), teremos a equação 2.8, a seguir, de ruptura simultânea na argamassa e no bloco.

$$\sigma_{bt} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_{bc}} \right) = (\sigma_y - \sigma_{ac}) \cdot \lambda \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma_y = \sigma_{bc} \cdot \left(\frac{\sigma_{bt} + \lambda \cdot \sigma_{ac}}{\sigma_{bt} + \lambda \cdot \sigma_{bc}} \right) \quad (2.8)$$

Esta é a equação de HILSDORF apud DUARTE (1999) para a determinação da tensão de ruptura à compressão da alvenaria.

2.5 A alvenaria estrutural de blocos cerâmicos

Os blocos cerâmicos têm como matéria prima a argila, um material com valor agregado muito baixo. A fabricação de blocos cerâmicos estruturais, assim como outros produtos baseados em argila, se caracteriza pelo baixo custo de produção. Isto resulta em um produto final barato, o que permite uma boa competitividade com os semelhantes que utilizam outras matérias primas, como os blocos de concreto. O grande obstáculo para esses produtos é o alto custo com transporte. Este fato exige que as fábricas de blocos cerâmicos se situem próximas de jazidas de argila bem como de potenciais mercados consumidores do produto final.

Segundo GALLEGOS (1991), as argilas se originam da degradação natural de rochas ígneas ou feldspatos. São encontradas em depósitos aluviais ou eólicos, misturadas com uma grande quantidade de areia e impurezas. Apresentam-se com uma

grande variedade de composição e estrutura dependendo do local de onde foram extraídas. CAPUTO (1988), comenta que apesar de sua aparência amorfa, as argilas são constituídas por minerais cristalinos denominados minerais argílicos, dentre os quais podemos destacar três grupos principais: caolinitas, montmorilonitas e ilitas. Para KINGERY et al. (1976), os minerais argílicos presentes estão normalmente misturados com quartzo, feldspato, mica e outras impurezas. Impurezas secundárias como dolomita, rutila e materiais ferruginosos também podem ser encontrados.

Segundo KINGERY et al. (1976), a estrutura dos minerais argílicos é composta por combinações de camadas $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n$ de SiO_4 tetraédrico unidas pelos vértices com camadas $\text{AlO}(\text{OH})_2$ de alumina octaédrica. As caolinitas são formadas por camadas alternadas de $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n$ e $\text{AlO}(\text{OH})_2$. Já as montmorilonitas têm uma estrutura composta por camadas de $\text{AlO}(\text{OH})_2$ alternadas por duas camadas de $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n$.

A obtenção de blocos cerâmicos estruturais se dá através de quatro fases seqüenciais bem definidas: preparação da matéria-prima, conformação, tratamento térmico e acabamento.

Na fase de preparação da matéria-prima, a argila extraída da natureza deve passar por um processo de beneficiamento que a deixe pronta para ser industrializada. Depois de extraída, a argila é estocada a céu aberto e é deixada em descanso por um determinado período. Esta etapa é conhecida como sazonalamento ou apodrecimento. Segundo BAUER (1992), o sazonalamento tem por finalidade principal a fermentação das partículas orgânicas, o que aumenta a plasticidade. SOARES et al. (2002), comenta que apesar do período de descanso para se alcançarem resultados ideais no processamento cerâmico ser de 1 ano, é comum que a duração da fase de sazonalamento esteja associada à operacionalização de cada indústria.

Após o sazonalamento, a argila passa por um processo de redução de seus grãos. A seguir se tem a correção, que é feita para se dar à argila a constituição desejada. Nesta etapa, é comum a adição de uma argila pré-queimada e moída. Isto é feito para se diminuir a proporção de finos, com o objetivo de reduzir a retração ocorrida na queima. Finalizando a fase de preparação da matéria-prima ocorre a mistura, que é feita de forma manual ou mecânica para que se obter uma massa homogênea.

A segunda fase na produção de blocos cerâmicos estruturais é da conformação plástica, que é feita através da extrusão. A extrusão consiste basicamente em se compactar a massa plástica de argila, numa câmara de alta pressão, contra o molde (boquilha) de formato desejado. A massa moldada é expelida como um corpo contínuo, sendo cortada no comprimento desejado. Portanto, é nesta fase que a massa de argila

adquire a forma de bloco. Existem três sistemas diferentes para a extrusão: pistão, cilindros e hélice. Segundo SOARES et al. (2002), para se obter um bom resultado na extrusão, deve-se garantir que o material a ser conformado apresente as mínimas variações possíveis, tanto na composição (plasticidade), como na preparação (granulometria) e no seu teor de umidade.

O tratamento térmico constitui a terceira fase na produção de blocos cerâmicos e tem duas etapas: secagem e queima. Segundo OLIVEIRA apud SOARES et al. (2002), o processo de secagem pode ser definido como a eliminação da água de conformação através do ar aquecido e é considerada uma das fases mais delicadas do processo produtivo. A umidade de extrusão dos produtos cerâmicos normalmente oscila entre 20% e 30% e, após a secagem, esta umidade residual deve estar abaixo de 5%.

A queima é a etapa fundamental na fabricação de blocos cerâmicos estruturais, pois é nela que ocorrem as reações químicas para a formação do material cerâmico. Os fornos são os equipamentos utilizados nesta etapa do processo e são classificados, de acordo com o tipo de operação, em intermitentes e contínuos.

Segundo KINGERY et al. (1976), durante um processo de queima regular, os grandes grãos de quartzo e outros minerais, normalmente não são afetados. As argilas contêm uma quantidade de impurezas suficiente para que haja a pronta formação de uma fase vítrea. A estrutura resultante consiste em grandes grãos de componentes secundários envolvidos por uma matriz de grãos pequenos de mulita e partículas de vidro. O pequeno tamanho dos grãos da matriz torna difícil a observação por microscopia ótica.

A estrutura interna resultante está diretamente relacionada com a composição da argila utilizada e com o processo de queima. Blocos que tenham passado por uma queima insuficiente, apresentam uma grande quantidade de poros o que resulta em uma baixa resistência e também afeta negativamente as demais propriedades. Produtos que tenham sido excessivamente queimados tornam-se muito vítreos e, portanto, são muito frágeis. Uma pequena quantidade de porosidades resulta em altas resistências à compressão, entretanto, provoca a ruptura do bloco como um todo, de uma forma explosiva e repentina, quanto submetido a esforços mecânicos. A insuficiência de poros também impede a obtenção de uma boa aderência entre o bloco e a argamassa.

Tem-se, portanto, que executar uma queima ideal de forma a se conseguir um bloco que apresente uma boa resistência à compressão e não seja tão frágil, rompendo através da formação de fissuras que possam ser acompanhadas. É importante, também, a

existência de uma determinada quantidade de poros que possa garantir uma boa aderência com a argamassa.

A coloração dos blocos depende dos seus elementos constituintes. Normalmente o ferro e o TiO_2 são os principais responsáveis pela cor que pode variar de amarelo a preto dependendo de impurezas particulares presentes.

2.6 Caracterização dos materiais cerâmicos

2.6.1 Diagrama de fases

No equilíbrio, um sistema está em seu estado de energia livre mais baixo para uma determinada composição de temperatura, pressão e outras condições impostas. Quando um determinado conjunto de parâmetros de um sistema é fixado, apenas uma combinação de fases poderá ser encontrada e a composição de cada uma dessas fases poderá ser determinada. Os diagramas de equilíbrio de fases permitem de uma forma clara, representar graficamente esta situação de equilíbrio e são uma ferramenta muito importante para a caracterização dos sistemas cerâmicos. Eles mostram a composição de cada fase presente, o número de fases presentes e a quantidade de cada fase presente na condição de equilíbrio. Os componentes principais dos blocos cerâmicos são a alumina (Al_2O_3) e a sílica (SiO_2) formando, pois, um sistema Al_2O_3 - SiO_2 . A figura (2.9) mostra o diagrama de fases de um sistema Al_2O_3 - SiO_2 .

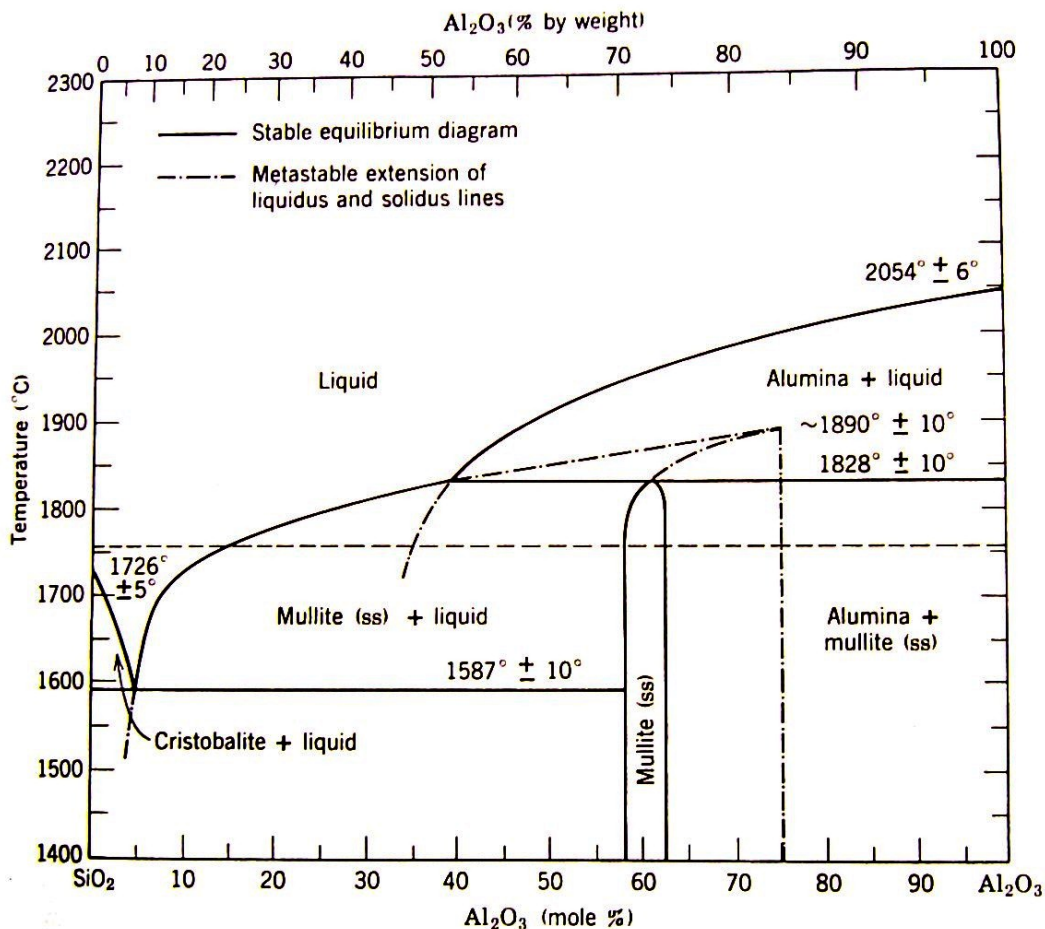


Figura 2.9 – Diagrama de fases do sistema Al₂O₃-SiO₂. Fonte Aksay and Pask apud KINGERY et al. (1976).

Os blocos cerâmicos, normalmente têm uma composição de alumina variando entre 35% e 55%. Dentro deste intervalo e desprezando as impurezas, as fases presentes no equilíbrio para temperaturas abaixo de 1587°C, de acordo com o diagrama de fases da figura (2.9), são a mullita e a sílica. A quantidade relativa destas fases varia de acordo com a composição e provocam variações correspondentes nas propriedades dos blocos.

2.6.2 Microestrutura

Segundo VOORT (1984), uma determinação detalhada e precisa da microestrutura dos materiais tem uma importância fundamental para a caracterização da sua composição, estrutura e propriedades.

As propriedades dos materiais cerâmicos, assim como as de outros materiais, são significativamente influenciadas por sua microestrutura. A observação da microestrutura pode revelar características de fundamental importância no comportamento e para a utilização dos blocos cerâmicos estruturais. Algumas das

características que contribuem para a resistência e praticamente todas as que iniciam o processo de falha mecânica podem ser identificadas através do estudo da microestrutura de um material.

Segundo KINGERY et al. (1976), um fato importante no estudo dos materiais cerâmicos é que suas propriedades são determinadas não só pela composição e estrutura das fases presentes, mas também pelo arranjo entre essas fases. A distribuição de fases ou microestrutura nos produtos finais depende das técnicas de fabricação, matérias primas, relações de equilíbrio de fases, crescimento dos grãos e processo de queima.

O estudo da microestrutura se baseia essencialmente na capacidade de diferenciar materiais que tenham diferente composição química, estrutura e orientação. Através deste estudo, podemos determinar as seguintes características:

- A quantidade e identificação das fases presentes, incluindo a porosidade;
- A quantidade relativa de cada fase presente;
- Características de cada fase como tamanho, forma e orientação.

Segundo KINGERY et al. (1976), os poros, que são uma das fases presentes em grande parte dos materiais cerâmicos, podem ocorrer com uma grande diversidade de tamanho, forma e distribuição.

As características dos poros são determinantes no processo de ruptura de um material uma vez que é a partir dos poros que se inicia o processo de nucleação e propagação de trincas.

Existem diferentes técnicas para a observação da microestrutura dos materiais sendo as duas principais a microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura.

3 Materiais e métodos

3.1 Ensaio dos blocos cerâmicos estruturais

Foram utilizados dezoito blocos cerâmicos estruturais comerciais (figura 3.1) com dimensões nominais de 140 x 290 x 190 (largura, comprimento e altura em mm) que foram numerados de 0 a 17. Os blocos foram retirados de uma mesma fornada, tendo sua origem em uma fábrica de blocos cerâmicos localizada no município de Jaguaruana, estado do Ceará, Brasil. No anexo (B) podem-se verificar detalhadamente as especificações do processo de fabricação. Os blocos foram selecionados levando-se em conta características visuais. Foram escolhidos os que não apresentavam defeitos sistemáticos como trincas, quebras, superfícies irregulares, deformações e indícios de uma queima inadequada.

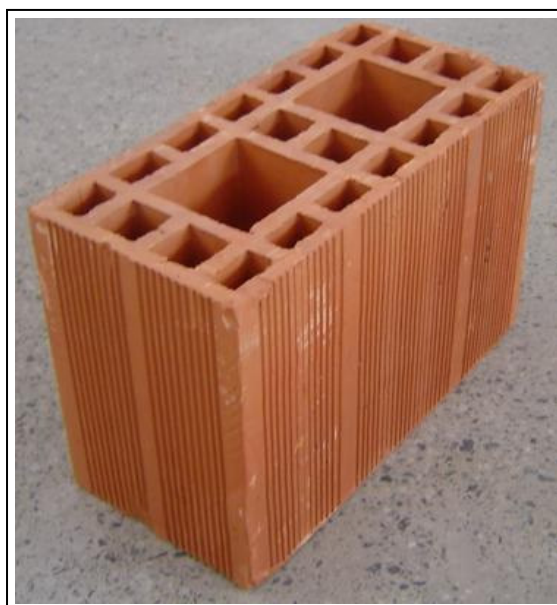


Figura 3.1 – Bloco cerâmico estrutural utilizado.

Convém mencionar, para uma melhor identificação dos blocos, que eles são semelhantes (forma e dimensões) aos blocos Selecta (blocos produzidos pela Selecta, hoje, Uralita, que se tornaram referência a nível nacional).

3.1.1 Determinação das características geométricas

A determinação das características geométricas dos blocos foi realizada experimentalmente de acordo com o projeto de norma NBR XX03/2003 – REV. 23 (2004).

3.1.1.1 Determinação dos valores médios dos comprimentos das faces

Os valores médios dos comprimentos das faces foram determinados para os dezoito blocos. Foi utilizado um paquímetro com precisão de 0,1mm. Os valores para a largura (L), altura (H) e comprimento (C) foram obtidos fazendo-se duas medidas em cada bloco nos pontos indicados nas figuras (3.2), (3.3) e (3.4).

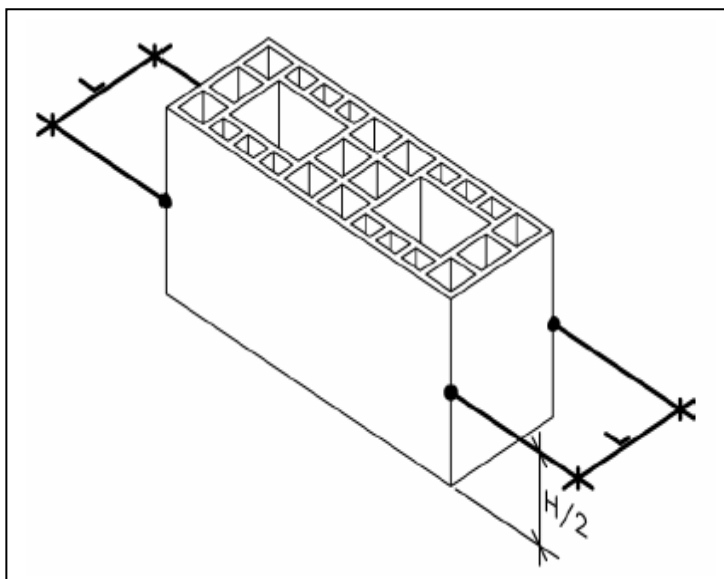


Figura 3.2 – Locais onde foram feitas as medições da largura (L) dos blocos.

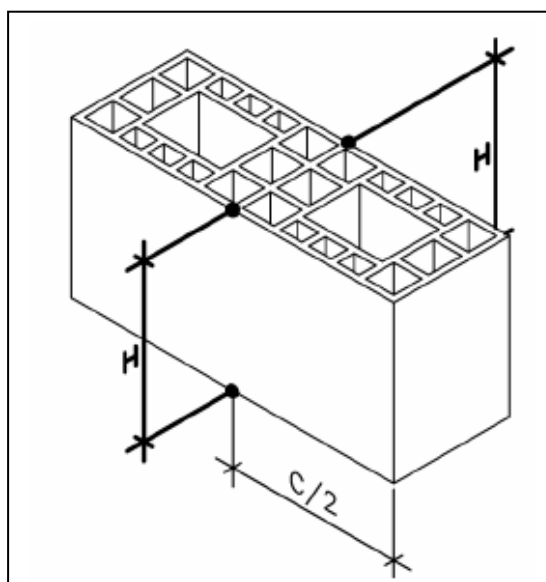


Figura 3.3 – Locais onde foram feitas as medições da altura (H) dos blocos.

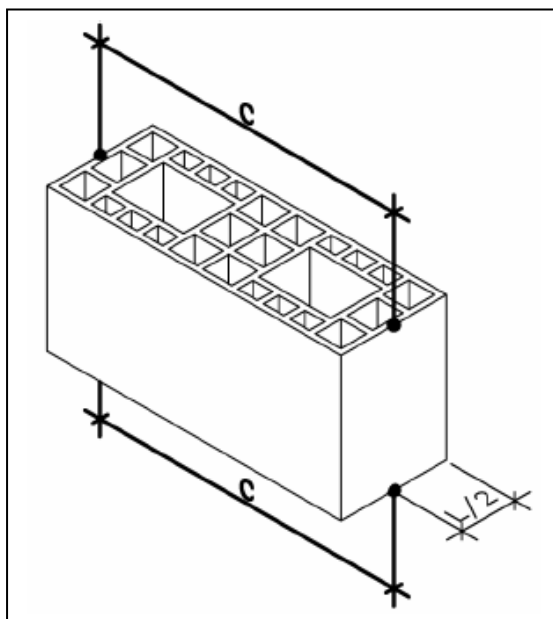


Figura 3.4 – Locais onde foram feitas as medições do comprimento (C) dos blocos.

3.1.1.2 Determinação do desvio em relação ao esquadro

O desvio em relação ao esquadro (D) foi determinado para os dezoito blocos. Foram utilizados um esquadro metálico e uma régua metálica com precisão de 0,5mm. Os valores foram obtidos fazendo-se uma medida em cada bloco conforme a figura (3.5).

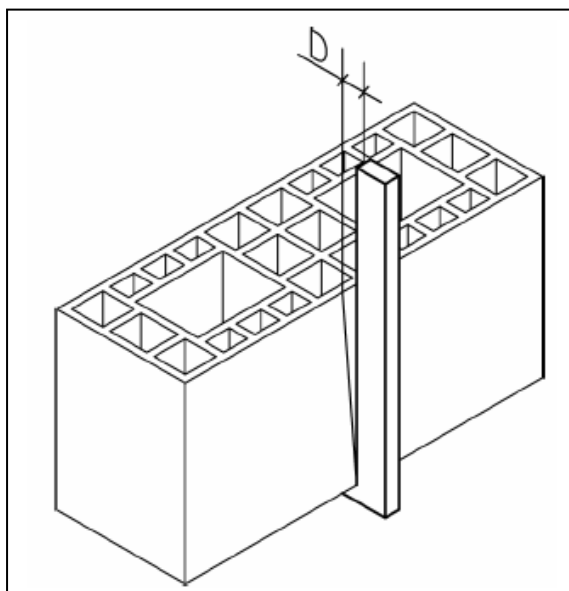


Figura 3.5 – Esquema de medida do desvio em relação ao esquadro (D).

3.1.1.3 Determinação da planeza das faces

A planeza das faces (F) foi determinada para os dezoito blocos. Foram utilizados um esquadro metálico e uma régua metálica com precisão de 1mm. Os valores foram obtidos fazendo-se uma medida em cada bloco conforme a figura (3.6).

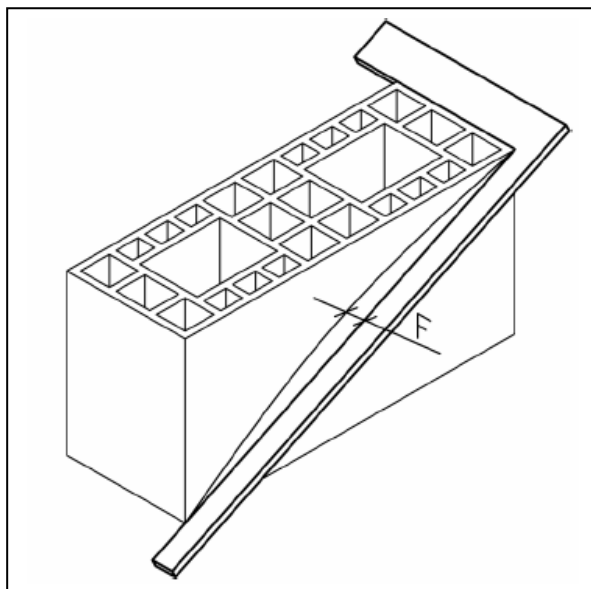


Figura 3.6 – Esquema de medida da planeza das faces (F).

3.1.1.4 Determinação da área líquida

O ensaio de determinação da área líquida foi realizado em cinco blocos (13 a 17). Os blocos foram saturados através da imersão em água fervente por duas horas como mostrado na figura (3.7). Depois de saturados, foram enxutos superficialmente com um pano úmido e pesados obtendo-se a massa saturada M_u . Posteriormente foram pesados imersos em água à temperatura de 25°C obtendo-se a massa aparente M_a .

A área líquida expressa em cm^2 de cada bloco foi então calculada pela equação (3.1), a seguir:

$$A_{liq} = \frac{M_u - M_a}{\gamma \cdot H} \quad (3.1)$$

Onde:

A_{liq} - área líquida em cm^2

M_u - massa do bloco saturado, em g.

M_a - massa aparente do bloco, em g.

H - altura do bloco, em cm.

γ - massa específica da água, g/cm^3 , adotando-se igual a 1.



Figura 3.7 - Ensaio de área líquida: blocos imersos em água fervente.

3.1.1.5 Determinação da área bruta

A área bruta dos blocos foi determinada pela multiplicação dos valores médios obtidos para a largura e comprimento de cada um dos 18 blocos.

3.1.2 Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada para os dezoito blocos, os quais foram submetidos à compressão até a ruptura, na direção dos furos, como se mostra na figura (3.8). Foi utilizada uma máquina hidráulica para testes em materiais VEB-Werkstoffprüfmaschinen-Leipzig, modelo 265/6 com capacidade nominal de carga de 3000 kN.

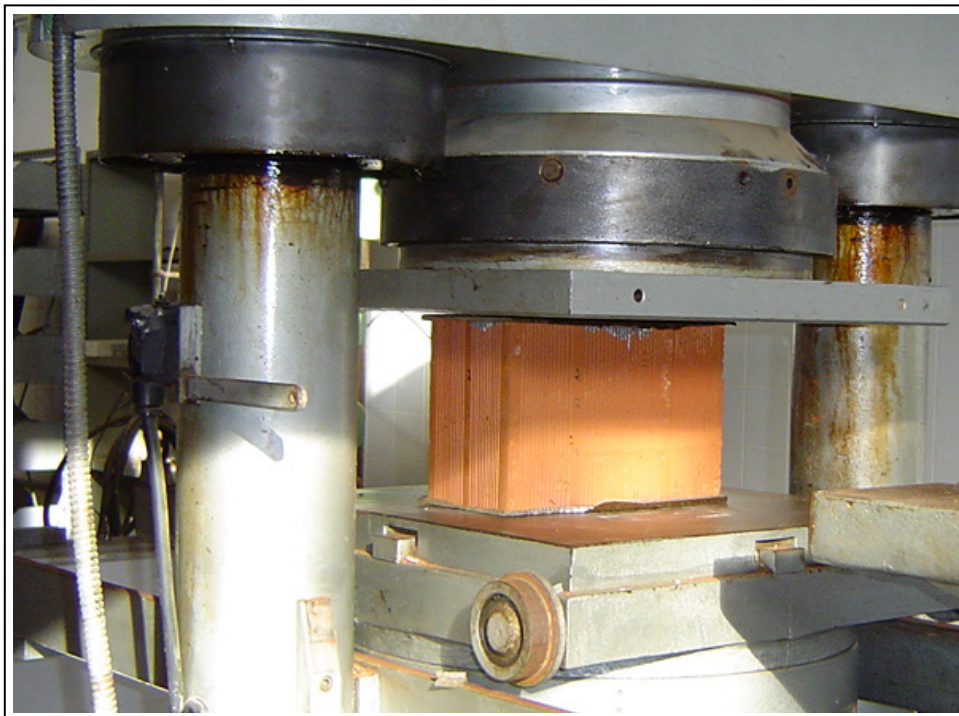


Figura 3.8 - Ensaio de determinação da resistência à compressão dos blocos.

Os ensaios foram realizados de acordo com o projeto de norma NBR XX03/2003 – REV. 23 (2004). As faces de aplicação do carregamento foram regularizadas com capeamento de enxofre.

3.1.3 Caracterização da microestrutura

As amostras analisadas para a caracterização da microestrutura foram retiradas de três blocos após a realização do ensaio de ruptura à compressão. Os blocos foram selecionados da seguinte forma:

Bloco 5 - foi o que resistiu à maior carga no ensaio de ruptura à compressão;

Bloco 7 - foi o que resistiu à menor carga no ensaio de ruptura à compressão;

Bloco 2 - foi o que resistiu a uma carga próxima da média no ensaio de ruptura à compressão.

Além destas foram analisadas amostras do bloco 0, retiradas antes do ensaio de ruptura à compressão.

Para cada um dos blocos selecionados foram retiradas três amostras de acordo com os três sentidos indicados na figura (3.9). Procurou-se observar cada uma das três direções possíveis de orientação do material nos blocos. Retirou-se, portanto, três amostras por bloco, perfazendo um total de doze amostras analisadas.

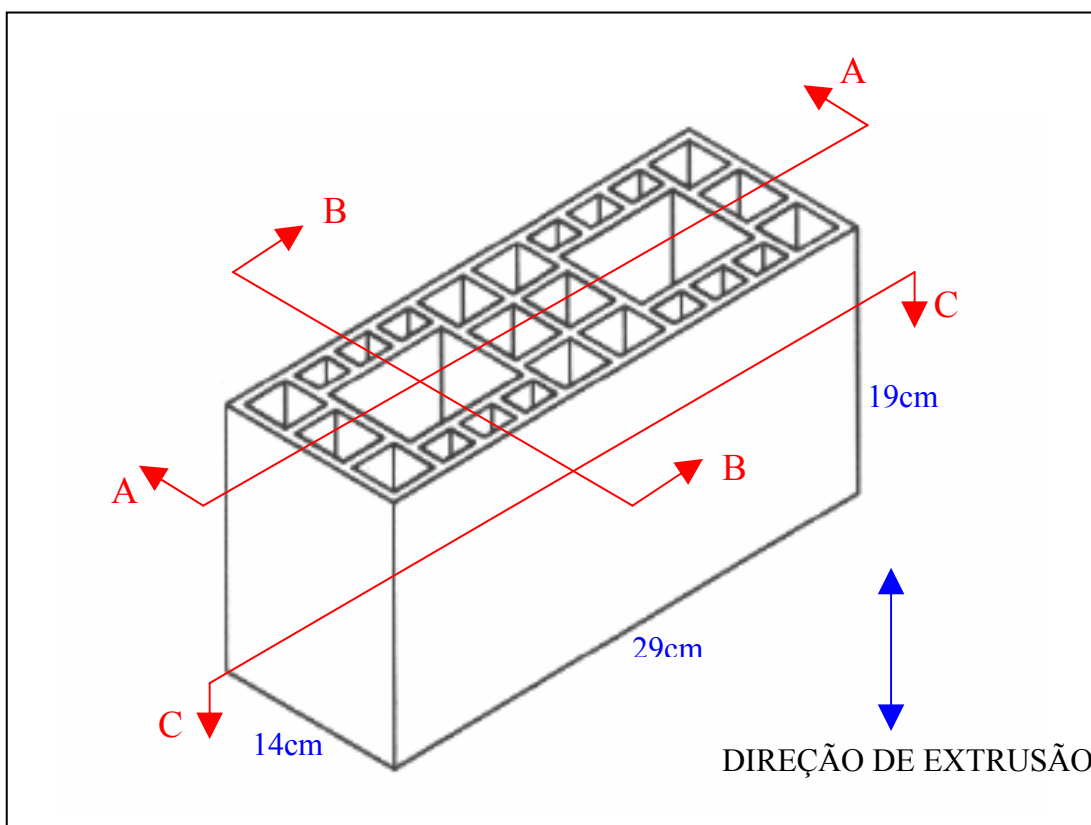


Figura 3.9 - Esquema usado para retirada das amostras.

De acordo com a figura (3.9) tem-se:

- Corte vertical A-A: As amostras foram preparadas de forma a se observar uma área pertencente a um plano paralelo à face de 29x19cm do bloco e, portanto, paralela à direção de extrusão;
- Corte vertical B-B: As amostras foram preparadas de forma a se observar uma área pertencente a um plano paralelo à face de 14x19cm do bloco e, portanto, paralela à direção de extrusão;
- Corte horizontal C-C: As amostras foram preparadas de forma a se observar uma área pertencente a um plano paralelo à face de 14x29cm do bloco e, portanto, perpendicular à direção de extrusão;

Cada uma das amostras foi embutida em Bakelite e posteriormente lixada com lixas 220, 320, e 600 por um período de cinco minutos para cada uma. Não foi necessário realizar qualquer tipo de ataque químico, pois as fases presentes puderam ser bem diferenciadas em microscópio ótico após o processo de lixamento.

As observações foram feitas em um microscópio ótico Olympus BX51M, com uma ampliação de 100X, equipado com câmera Evolution LC Color modelo PL-A662 para captura das imagens. Para cada uma das amostras se capturou um conjunto de seis

imagens (três em campo claro e três em campo escuro) de regiões diferentes totalizando setenta e duas micrografias.

O estudo quantitativo da microestrutura dos blocos foi realizado através do software “Image-Pro Plus[®]”. Cada uma das 72 micrografias foi quantificada sendo as fotos em campo claro usadas para a quantificação da fase de sílica, e as fotos em campo escuro para a quantificação da fase dos poros.

A obtenção da composição química de pontos específicos das amostras foi realizada através de análises de EDS “energy dispersion spectrometry” (espectroscopia por dispersão de energia). Isto foi feito em equipamento acoplado a um microscópio eletrônico de varredura Philips XL-30. Procurou-se realizar as análises de forma a identificar a composição química das fases presentes e também de pontos que apresentaram aspectos particulares. A distinção das fases e dos pontos particulares foi feita pela coloração apresentada nas observações realizadas no microscópio eletrônico de varredura com elétrons retroespalhados. Foi escolhida uma amostra de cada bloco na qual foram feitas quatro medidas em pontos específicos da região observada. No total realizaram-se, portanto, dezesseis análises de composição química.

3.2 Ensaio das argamassas

Utilizaram-se três traços de argamassa mista (cimento, cal e areia) que foram dosados de maneira a se obter uma argamassa mais resistente (T1), uma com resistência intermediária (T2) e uma menos resistente (T3). As argamassas foram preparadas com cimento Portland CP II-Z-32RS, cal hidratada da classe CH-III e areia lavada de rio. Devido à pequena dimensão das juntas de argamassa (10mm), a areia recebida foi seca em estufa e posteriormente peneirada de forma a se obter uma dimensão máxima característica dos grãos de 2,4 mm. Para a areia, também foi determinado o módulo de finura e o teor de material pulverulento.

Na produção de cada traço, todos os constituintes foram medidos em massa e misturados em betoneira. As características de cada traço utilizado são apresentadas na tabela (3.1). A quantidade de água utilizada foi a necessária para garantir uma trabalhabilidade semelhante à utilizada em obra, de acordo com a avaliação de um pedreiro experiente.

Tabela 3.1 – Características dos traços de argamassa utilizados.

Identificação do traço	Traço em volume (cimento:cal:areia)	Traço em peso (cimento:cal:areia)	Fator água /cimento (litros/kg)
T1	1:0,25:3	1:0,089:3,214	0,762
T2	1:0,5:4,5	1:0,179:4,821	1,048
T3	1:1:6	1:0,357:6,429	1,474

Para cada traço de argamassa foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos com 50mm de diâmetro por 100mm de altura perfazendo um total de 12 corpos de prova. A moldagem foi feita de acordo com a NBR 7215 (1996), imediatamente após a mistura de cada traço. Posteriormente, os corpos de prova foram deixados em ambiente laboratorial até a idade de realização dos ensaios de determinação da resistência à compressão, como recomenda a NBR 13279 (1995). Para cada corpo de prova foi determinado o diâmetro através da média de duas medidas realizadas em posições ortogonais de seu terço médio. Para as medidas, foi utilizado um paquímetro com precisão de 0,1mm.

3.2.1 Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada para os quatro corpos de prova de cada traço. Eles foram submetidos à compressão em uma máquina universal para ensaios mecânicos, marca Instron, modelo 8802, com capacidade nominal de carga de 250 kN.

Os ensaios foram realizados aos 28 dias e de acordo com a NBR 13279 (1995) As faces de aplicação do carregamento foram regularizadas com capeamento de enxofre.

3.3 Ensaios dos prismas

Para cada traço de argamassa foram moldados três prismas de dois blocos perfazendo um total de 9 corpos de prova. O preparo, assentamento e cura dos prismas foram feitos de acordo com as prescrições do projeto de norma NBR XX03/2003 – REV. 23 (2004).

A moldagem foi feita logo após a mistura da argamassa tendo todos os prismas sido executados por um mesmo pedreiro com experiência comprovada em alvenaria estrutural. A espessura das juntas foi controlada para que ficassem com 10 ± 3 mm. Depois de moldados, os prismas foram deixados em ambiente laboratorial até a idade de realização dos ensaios de determinação da resistência à compressão.

3.3.1 Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada para os três prismas executados com cada traço de argamassa. Os prismas foram submetidos à compressão até a ruptura, na direção dos furos, como se mostra na figura (3.10). Foi utilizada uma máquina hidráulica para testes em materiais VEB-Werkstoffprüfmaschinen-Leipzig, modelo 265/6 com capacidade nominal de carga de 3000 kN.

Os ensaios foram realizados aos 28 dias e de acordo com as prescrições do projeto de norma NBR XX03/2003 – REV. 23 (2004). Para a regularização das faces de aplicação do carregamento, os blocos foram capeados com enxofre.



Figura 3.10 - Ensaio de determinação da resistência à compressão dos prismas.

3.4 Ensaios dos prismas contrafiados

Para cada traço de argamassa foram moldados três prismas contrafiados com um bloco e meio de comprimento por três fiadas de altura, totalizando 9 corpos de prova. O preparo, assentamento e cura dos prismas contrafiados foram feitos de acordo com as prescrições do projeto de norma NBR XX03/2003 – REV. 23 (2004).

Os prismas contrafiados foram moldados logo após a mistura da argamassa, por um mesmo pedreiro com experiência comprovada em alvenaria estrutural. A espessura das juntas foi controlada para que ficassem com $10\pm 3\text{mm}$. Depois de moldados os

prismas contrafiados foram deixados em ambiente laboratorial até a idade de realização dos ensaios de determinação da resistência à compressão.

3.4.1 Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada para os três prismas contrafiados executados para cada traço de argamassa. Os prismas contrafiados foram submetidos à compressão até a ruptura, na direção dos furos, como se mostra na figura (3.11). Foi utilizada uma máquina hidráulica para testes em materiais VEB-Werkstoffprüfmaschinen-Leipzig, modelo 265/6 com capacidade nominal de carga de 3000 kN.

Os ensaios foram realizados aos 28 dias e de acordo com as prescrições do projeto de norma NBR XX03/2003 – REV. 23 (2004). As faces de aplicação do carregamento foram regularizadas com capeamento de enxofre.



Figura (3.11) - Ensaio de determinação da resistência à compressão dos prismas contrafiados.

4 Resultados e discussões

4.1 Ensaio dos blocos cerâmicos estruturais

São apresentados a seguir os resultados obtidos nos ensaios realizados nos blocos cerâmicos estruturais.

4.1.1 Características geométricas

4.1.1.1 Valores médios dos comprimentos das faces

Os valores individuais e médios obtidos para a largura, altura e comprimento dos blocos são apresentados na tabela (4.1), tabela (4.2) e tabela (4.3).

Tabela 4.1 – Largura dos blocos.

Bloco Nº	Largura (mm)		
	Medida 1	Medida 2	Média
0	135,7	136,1	135,9
1	135,2	136,4	135,8
2	134,6	135,5	135,1
3	137,0	135,8	136,4
4	136,6	135,5	136,1
5	134,4	135,1	134,8
6	135,7	136,8	136,3
7	134,7	135,9	135,3
8	136,6	135,7	136,2
9	135,4	136,1	135,8
10	135,1	136,0	135,6
11	137,2	136,6	136,9
12	137,4	137,5	137,5
13	136,7	137,3	137,0
14	137,2	136,2	136,7
15	137,4	136,1	136,8
16	136,2	135,5	135,8
17	136,2	135,0	135,6
Largura Média			136,1
Desvio Padrão			0,7

Tabela 4.2 – Altura dos blocos.

Bloco Nº	Altura (mm)		
	Medida 1	Medida 2	Média
0	189,8	190,1	190,0
1	190,5	188,0	189,3
2	187,0	190,0	188,5
3	191,0	191,0	191,0
4	190,0	190,0	190,0
5	189,0	190,0	189,5
6	190,0	190,0	190,0
7	189,0	188,5	188,8
8	190,0	190,0	190,0
9	191,0	190,0	190,5
10	188,0	189,0	188,5
11	189,5	191,0	190,3
12	191,0	191,0	191,0
13	188,6	188,7	188,7
14	189,3	189,7	189,5
15	189,8	188,8	189,3
16	188,1	187,8	188,0
17	188,6	189,5	189,0
Altura Média			189,5
Desvio Padrão			0,9

Tabela 4.3 – Comprimento dos blocos.

Bloco Nº	Comprimento (mm)		
	Medida 1	Medida 2	Média
0	285,3	286,4	285,9
1	282,0	283,0	282,5
2	282,0	281,0	281,5
3	286,0	285,0	285,5
4	283,0	280,0	281,5
5	279,0	279,0	279,0
6	282,0	283,0	282,5
7	283,5	284,0	283,8
8	285,0	286,0	285,5
9	284,0	284,0	284,0
10	284,0	282,0	283,0
11	286,0	285,0	285,5
12	288,0	288,0	288,0
13	284,0	284,5	284,3
14	286,2	283,0	284,6
15	285,2	285,2	285,2
16	284,0	284,3	284,2
17	283,1	283,4	283,2
Comprimento Médio			283,9
Desvio Padrão			2,0

Conforme o projeto de norma NBR XX02/2003 – REV. 16 (2003) as tolerâncias dimensionais máximas de fabricação para a largura, altura e comprimento dos blocos cerâmicos devem ser de $\pm 3\text{mm}$. Pode-se observar que os blocos não atenderam a essas exigências tanto na largura ($140\pm 3\text{mm}$) quanto no comprimento ($290\pm 3\text{mm}$). Apenas a altura ficou dentro dos limites exigidos ($190\pm 3\text{mm}$). As variações dimensionais são um problema sério nos blocos cerâmicos estruturais. GALLEGOS (1991), comenta que é difícil se prever a retração dos produtos à base de argila. KIRABIRA (2003), recomenda a adição de uma argila pré-queimada e triturada (grog) à massa de argila, para diminuir a retração durante a secagem e a queima.

Esta falta de precisão dimensional invalida o conceito de modulação, que é fundamental na alvenaria estrutural, levando à necessidade de ajustes para compensar a imprecisão dos blocos. Estes ajustes são normalmente feitos com um aumento das juntas de argamassa e dos revestimentos. Isto prejudica a qualidade final das alvenarias tanto no aspecto econômico, pois será necessário um volume maior de argamassa, quanto no aspecto estrutural com um pior funcionamento do sistema e um aumento do peso total da estrutura. Felizmente, a altura dos blocos ficou dentro dos limites exigidos, pois a execução de juntas horizontais mais espessas tem um efeito muito negativo sobre o desempenho estrutural do sistema. Segundo GALLEGOS (1991), um aumento da junta de argamassa de 10mm para 15mm e 20mm provoca respectivamente uma redução de 30% e 50% na resistência do prisma. OLIVEIRA (2002), encontrou uma redução de 40% na resistência do prisma quando a junta de argamassa foi aumentada de 10mm para 20mm.

4.1.1.2 Desvio em relação ao esquadro

Os valores obtidos para o desvio em relação ao esquadro dos blocos são apresentados na tabela (4.4).

Tabela 4.4 – Desvio em relação ao esquadro dos blocos.

Bloco N°	Desvio (mm)
0	1,8
1	1,5
2	3,3
3	2,3
4	1,3
5	1,9
6	1,5
7	1,1
8	0,4
9	0,1
10	1,8
11	1,7
12	1,3
13	0,5
14	2,0
15	0,4
16	2,1
17	2,5
Média	1,5
Desvio Padrão	0,8

Conforme o projeto de norma NBR XX02/2003 – REV. 16 (2003) as tolerâncias dimensionais máximas de fabricação para o desvio em relação ao esquadro dos blocos cerâmicos devem ser de $\pm 3\text{mm}$. Pode-se observar que os blocos atenderam a esse requisito.

4.1.1.3 Planeza das faces

Os valores obtidos para planeza das faces dos blocos são apresentados na tabela (4.5).

Tabela 4.5 – Planeza das faces dos blocos.

Bloco N°	Planeza (mm)
0	0,3
1	0,0
2	0,5
3	0,0
4	0,5
5	0,0
6	0,0
7	0,0
8	0,0
9	0,0
10	0,5
11	0,0
12	0,0
13	0,0
14	0,4
15	0,1
16	0,2
17	0,0
Média	0,1
Desvio Padrão	0,2

Conforme o projeto de norma NBR XX02/2003 – REV. 16 (2003) as tolerâncias dimensionais máximas de fabricação para planeza das faces dos blocos cerâmicos devem ser de $\pm 3\text{mm}$. Pode-se observar que os blocos atenderam a esta exigência.

4.1.1.4 Área líquida

Os blocos ensaiados apresentaram as áreas líquidas que são mostradas na tabela (4.6).

Tabela 4.6 – Área líquida dos blocos.

Bloco N°	M_u (g)	M_a (g)	Área Líquida (cm²)
13	6527	3563	157
14	6643	3632	159
15	6720	3715	159
16	6531	3646	153
17	6510	3653	151
Média			155,9
Desvio Padrão			3,4

Não existe nenhum padrão de valores exigidos pelas normas para a área líquida. Este é um dado importante utilizado para a classificação e caracterização dos blocos.

4.1.1.5 Área bruta

Os resultados obtidos para a área bruta dos blocos na tabela (4.7).

Tabela 4.7 – Área bruta dos blocos.

Bloco N°	Área Bruta (cm²)
0	388,5
1	383,6
2	380,2
3	389,4
4	383,0
5	376,0
6	384,9
7	383,9
8	388,7
9	385,5
10	383,6
11	390,8
12	395,9
13	389,4
14	389,0
15	390,0
16	386,0
17	384,1
Média	386,3
Desvio Padrão	4,5

Assim como para área líquida, não existe nenhum padrão de valores exigidos pelas normas para a área bruta. Este é um dado importante utilizado para a classificação e caracterização dos blocos.

Com base na área líquida média e na área bruta média obtida podemos, então, calcular a razão “área líquida / área bruta” para os blocos:

$$\frac{\text{Área líquida}}{\text{Área bruta}} = \frac{155,9}{386,3} = 0,40$$

De acordo com valor obtido para a razão “área líquida / área bruta”, o projeto de norma NBR XX02/2003 – REV. 16 (2003) classifica os blocos estudados como blocos cerâmicos estruturais de paredes vazadas. Pode-se também recomendar o uso do valor obtido como o fator a ser utilizado para a razão “área líquida / área bruta” na elaboração de projetos de alvenaria estrutural com o bloco estudado.

4.1.2 Resistência à compressão

Os resultados obtidos para a resistência à compressão dos blocos na área bruta são apresentados na tabela (4.8).

Tabela 4.8 – Carga de ruptura e resistência à compressão dos blocos.

Bloco Nº	Carga de Ruptura (kN)	Resistência à Compressão (MPa)
0	810,0	20,9
1	575,0	15,0
2	560,0	14,7
3	570,0	14,6
4	555,0	14,5
5	840,0	22,3
6	510,0	13,2
7	370,0	9,6
8	535,0	13,8
9	625,0	16,2
10	530,0	13,8
11	530,0	13,6
12	465,0	11,7
13	625,0	16,0
14	410,0	10,5
15	390,0	10,0
16	640,0	16,6
17	475,0	12,4
Média	556,4	14,4
Desvio Padrão	124,7	3,3
Coef. de Variação (%)	22,4	23,0

GALLEGOS apud OLIVEIRA (2002) recomenda como limite aceitável o valor máximo de 9% para o coeficiente de variação da resistência à compressão de unidades de alvenaria submetidas à compressão simples. O coeficiente de variação de 23,0% obtido indica falta de homogeneidade dos blocos. Com base nesta constatação, pode-se esperar também uma falta de homogeneidade nas demais propriedades dos blocos cerâmicos estruturais estudados.

4.1.3 Caracterização da microestrutura

As figuras (4.1), (4.2), e (4.3) apresentam as micrografias feitas para o bloco 7, onde se mostram características gerais observadas em todas as amostras analisadas. As demais micrografias realizadas podem ser encontradas no anexo (A).

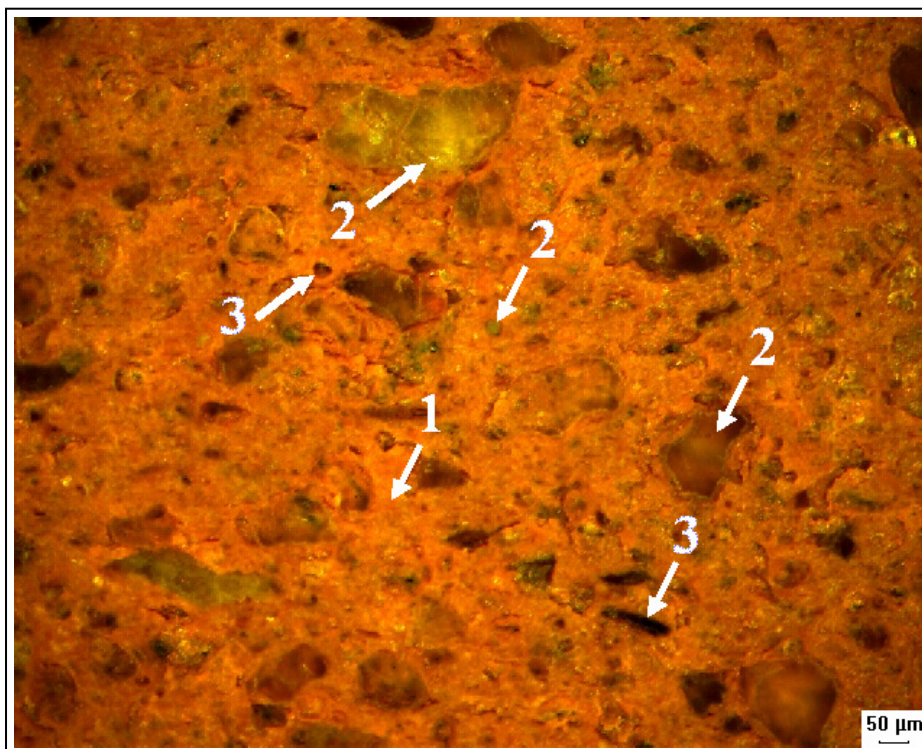


Figura 4.1 - Micrografia 1 do bloco 7, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X. Matriz de cor alaranjada (1), inclusões de sílica de diversos tamanhos (2) e uma quantidade de poros muito pequena sem uma orientação preferencial (3).

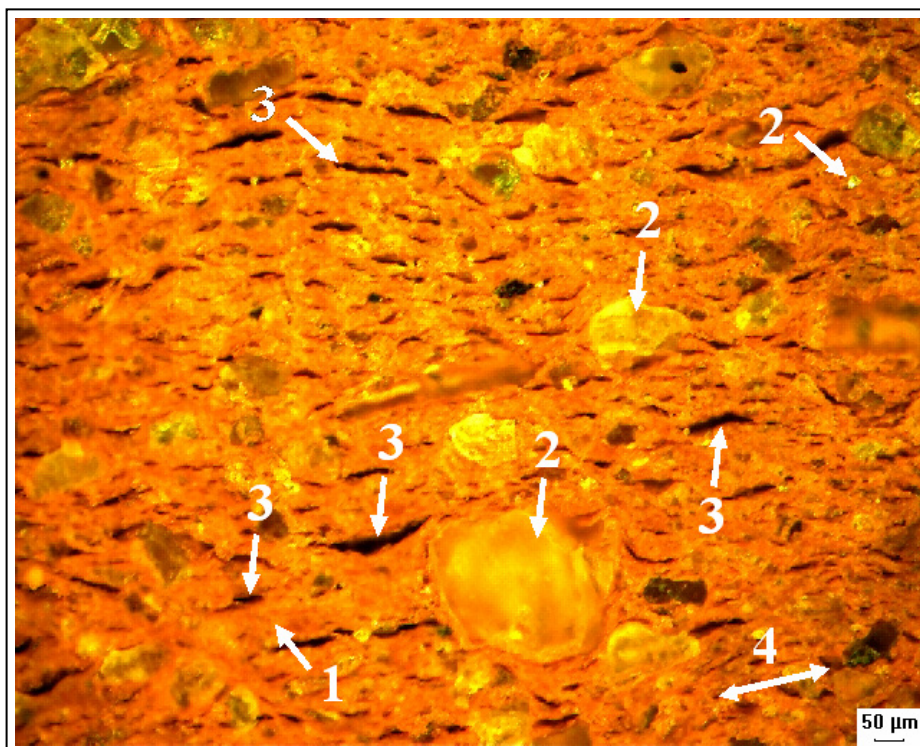


Figura 4.2 - Micrografia 2 do bloco 7, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X. Matriz de cor alaranjada (1), inclusões de sílica de diversos tamanhos (2) e uma grande quantidade de poros alongados (3), na direção de extrusão do bloco (4).

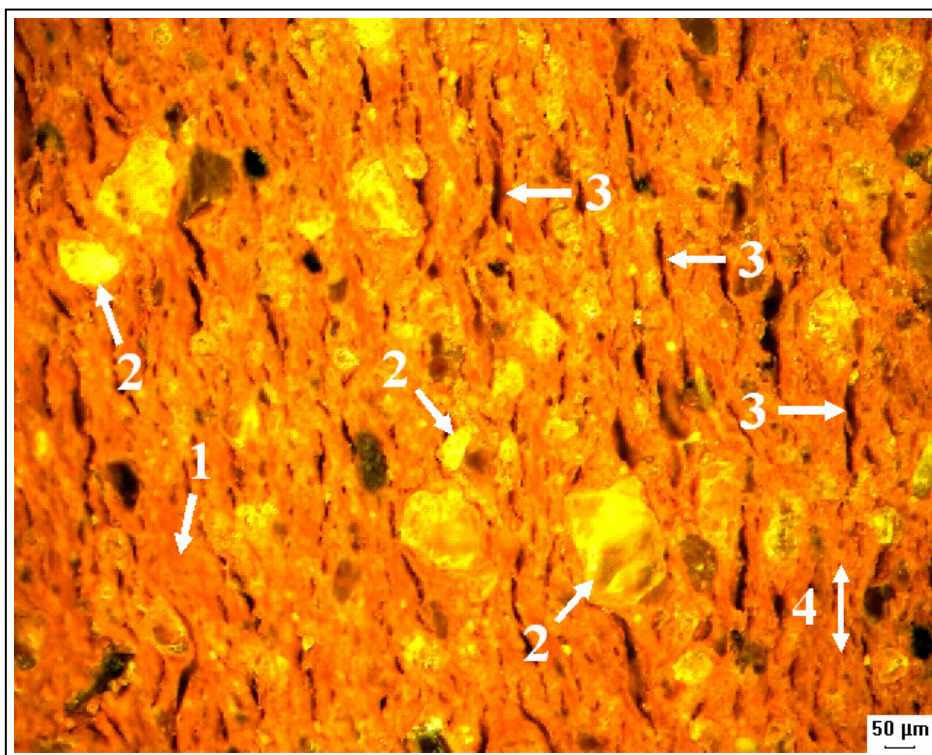


Figura 4.3 - Micrografia 2 do bloco 7, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X. Matriz de cor alaranjada (1), inclusões de sílica de diversos tamanhos (2) e uma grande quantidade de poros alongados (3), na direção paralela ao comprimento do bloco (4).

Pôde-se observar nas micrografias feitas dos cortes B-B e cortes C-C, figuras (4.2) e (4.3) respectivamente, a existência de uma matriz onde se detectou através de EDS, apresentados nas figuras (4.14), (4.15), (4.16) e (4.17), a presença de O, Na, Al, Si, K, Ca, Mg, Fe e Ti. Nota-se também a existência de poros alongados na direção de extrusão, paralelamente ao comprimento dos blocos e uma grande quantidade de inclusões onde se detectou a presença de O e Si de acordo com os resultados de EDS apresentados nas figuras (4.14), (4.15), (4.16) e (4.17).

As micrografias feitas dos cortes A-A, figura (4.1), mostram a existência da matriz, uma grande quantidade de inclusões da fase de sílica e uma quase total inexistência de porosidades. Na realidade, constatou-se, de acordo com as observações dos cortes B-B e C-C, que, nos cortes A-A as amostras foram retiradas paralelamente aos poros. Estes se revelaram bem achatados e, portanto, quando visualizados sob este ângulo, não são facilmente identificados, pois estão sendo seccionadas longitudinalmente.

O formato e disposição dos poros caracterizam uma estrutura interna que favorece a formação de um conjunto de planos paralelos preferenciais de ruptura ao longo da direção de extrusão e paralelos ao comprimento dos blocos quando estes são

comprimidos. Na figura (4.4) apresenta-se esquematicamente a disposição dos poros nos blocos e na figura (4.5) propõe-se um esquema teórico de formação de planos de ruptura.

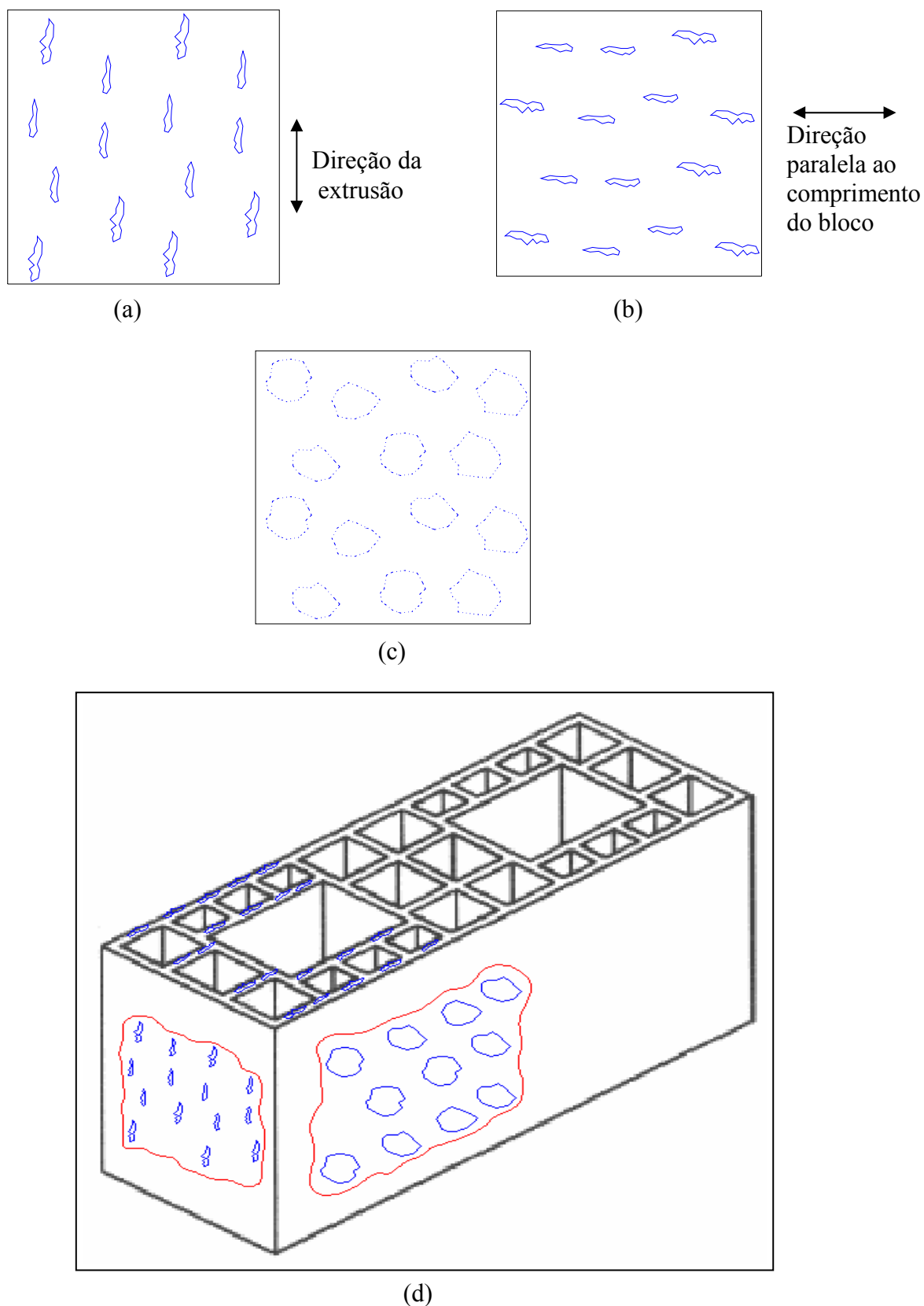


Figura 4.4 - Representação esquemática da disposição dos poros nos blocos; (a) segundo o corte B-B; (b) segundo o corte C-C; (c) segundo o corte A-A; (d) Disposição dos poros nos blocos.

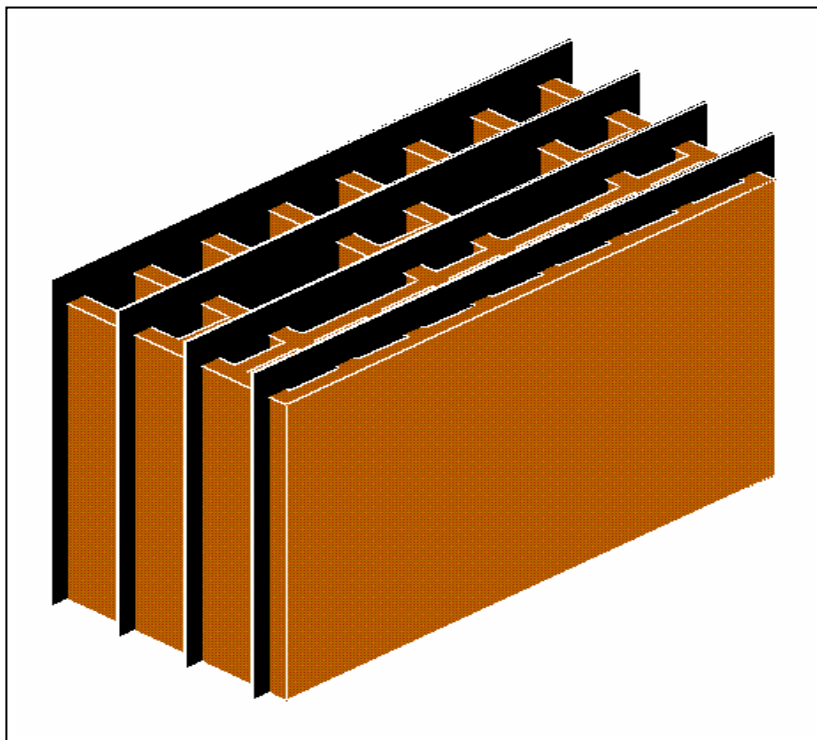


Figura 4.5 - Esquema teórico proposto para a formação de planos de ruptura.

Quando os blocos são submetidos a esforços de compressão, a região entre os poros fica sujeita a uma concentração de tensões, nucleando trincas que acabam por ligá-los como pode ser visto na figura (4.6). Ocorre, portanto, a formação de camadas ou planos fazendo com que haja a ruptura através da sua separação.

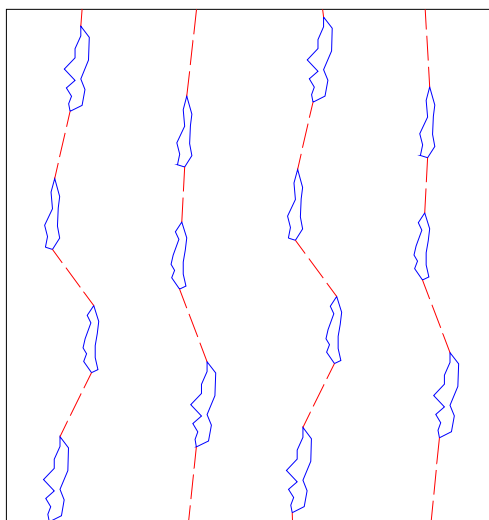


Figura 4.6 - Esquema de nucleação e propagação das trincas entre os poros.

Pôde se constatar, nos ensaios de ruptura à compressão, que os blocos romperam pela formação de grandes trincas verticais com a separação de grandes pedaços e muitas

vezes com o descolamento de outros menores. Isto ocorreu sempre ao longo da altura e na direção de extrusão dos blocos, deixando evidente a formação efetiva de diversas camadas ou planos de ruptura, como pode ser visto nas figuras (4.7) e (4.8).



Figura 4.7 - Bloco rompido por compressão. A ruptura se deu segundo um plano vertical, pela separação de “camadas”.

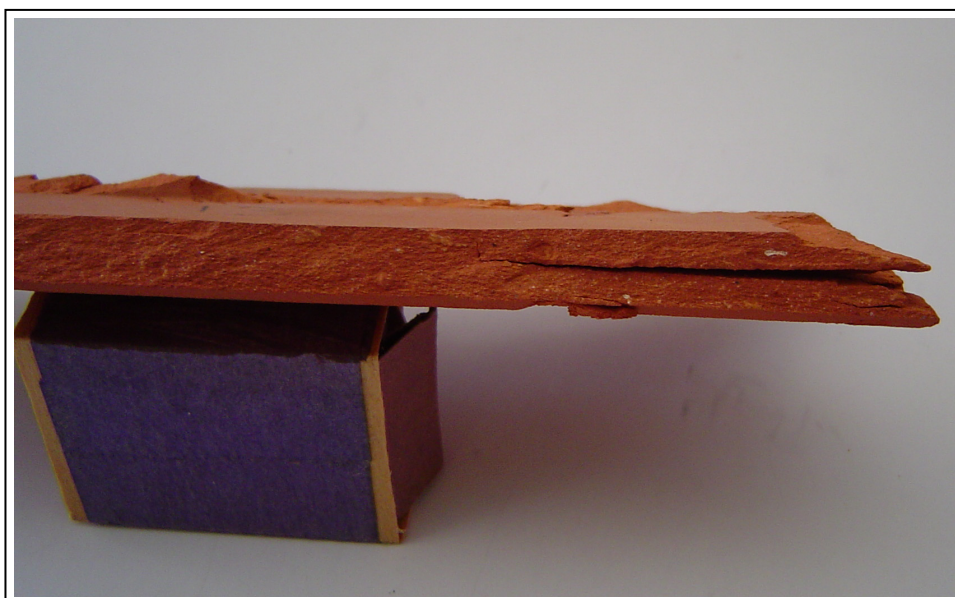


Figura 4.8 – Detalhe da Formação de fissuras verticais em um pedaço de bloco rompido à compressão (uma caixa de fósforos foi colocada para efeito de escala).

A formação dos planos preferenciais de ruptura devida ao formato e disposição dos poros encontrados explica porque os blocos cerâmicos apresentam eficiências bem menores que os blocos de concreto, quando inseridos no contexto de um prisma (f_p/f_b) ou de uma parede (f_{par}/f_b).

As três amostras retiradas do bloco antes do ensaio de ruptura à compressão, revelaram uma microestrutura semelhante à das nove amostras que foram retiradas dos três blocos após o ensaio evidenciando que o formato e a disposição dos poros não foram alterados pelo processo de carregamento. Isto confirma a característica frágil do material.

A seguir, nas figuras (4.9), (4.10), (4.11) e (4.12) são apresentadas micrografias típicas, com os respectivos tratamentos de imagem, que foram utilizadas para a quantificação das fases presentes nos blocos cerâmicos estruturais.

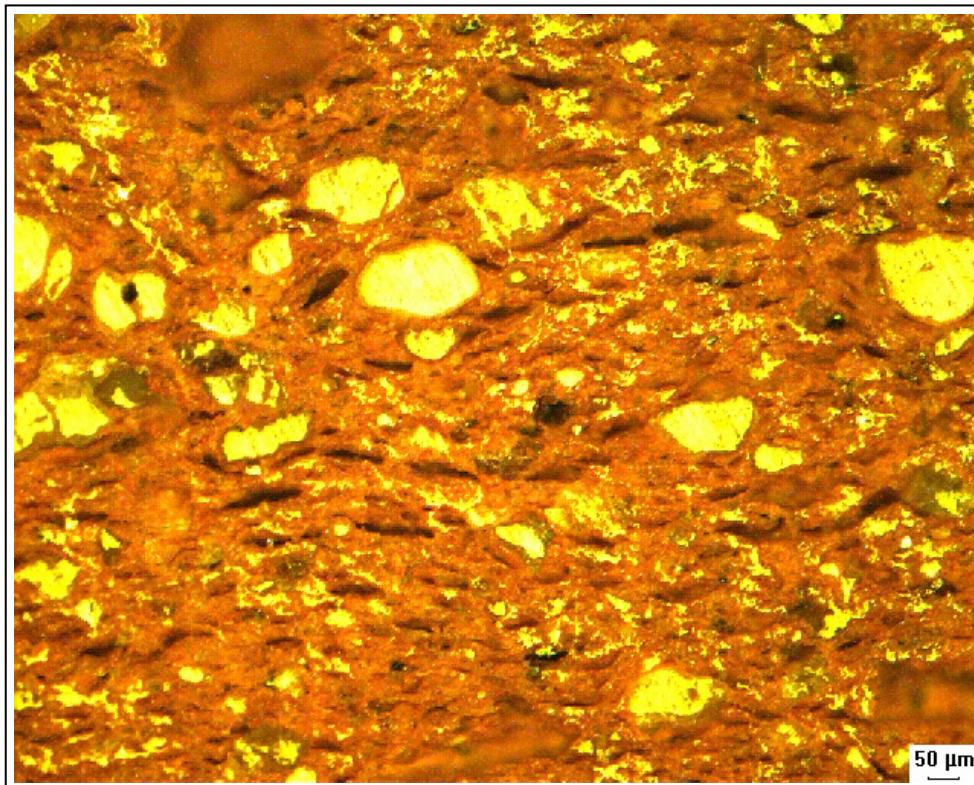


Figura 4.9 – Micrografia do Bloco 7, corte BB em campo claro (100X) para a quantificação da fase de sílica.

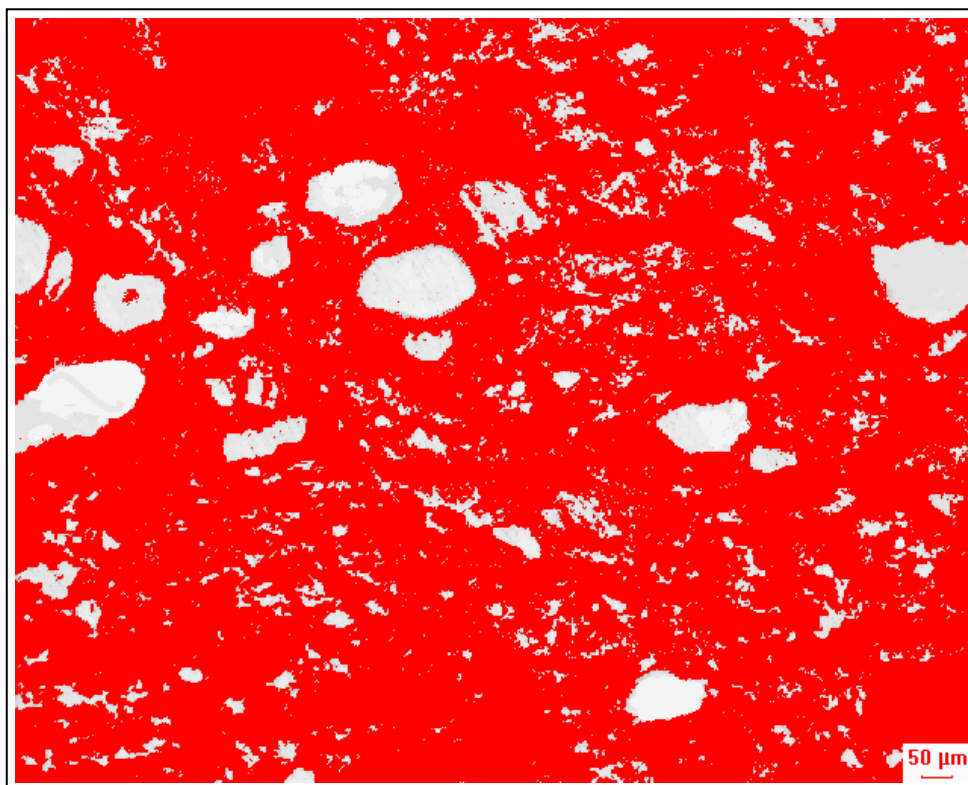


Figura 4.10 – Imagem da Micrografia do Bloco 7, corte BB em campo claro (100X) filtrada para destacar a fase de sílica.

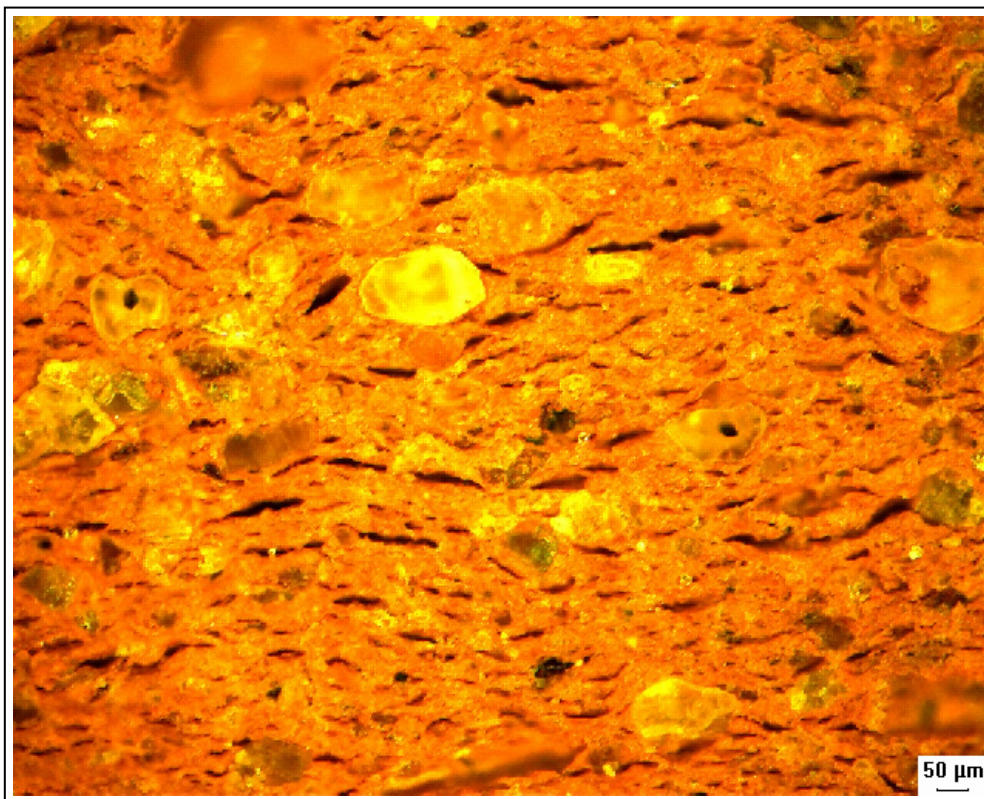


Figura 4.11 - Micrografia do Bloco 7, corte BB em campo escuro (100X) para a quantificação da fase de poros.

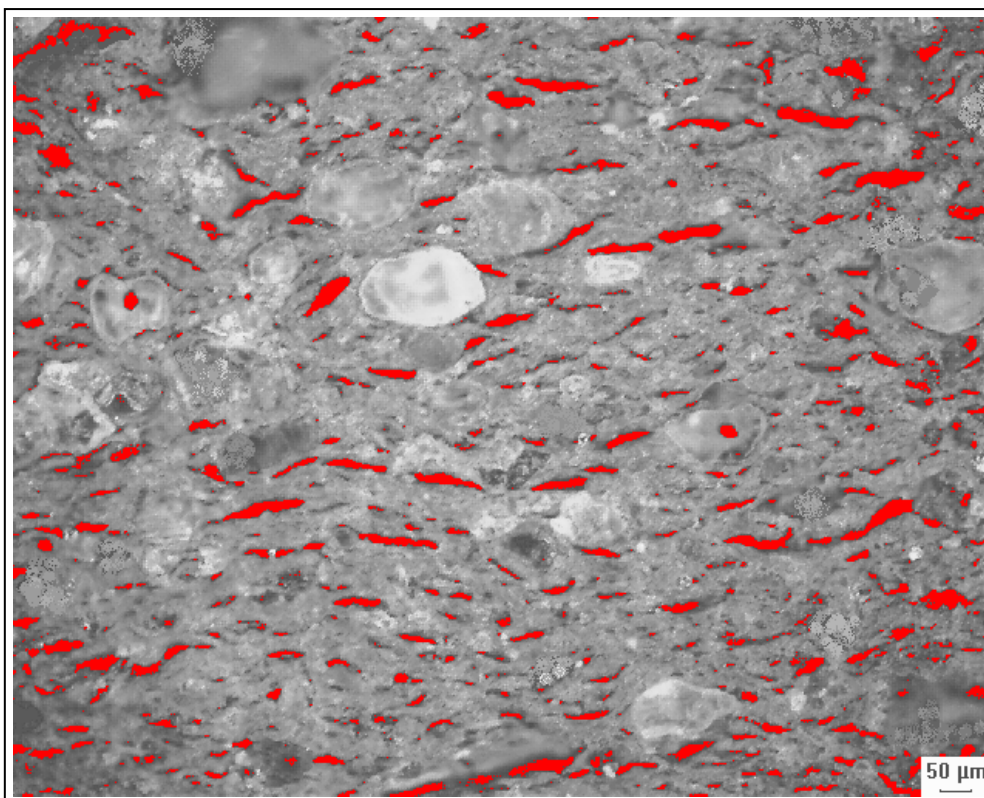


Figura 4.12 - Imagem da Micrografia do Bloco 7, corte BB em campo escuro (100X) filtrada para destacar a fase de poros.

O gráfico da figura (4.13) mostra os resultados obtidos para a fração volumétrica das fases nos blocos 2, 5 e 7 a partir da média dos valores obtidos em cada uma das micrografias feitas para esses blocos.

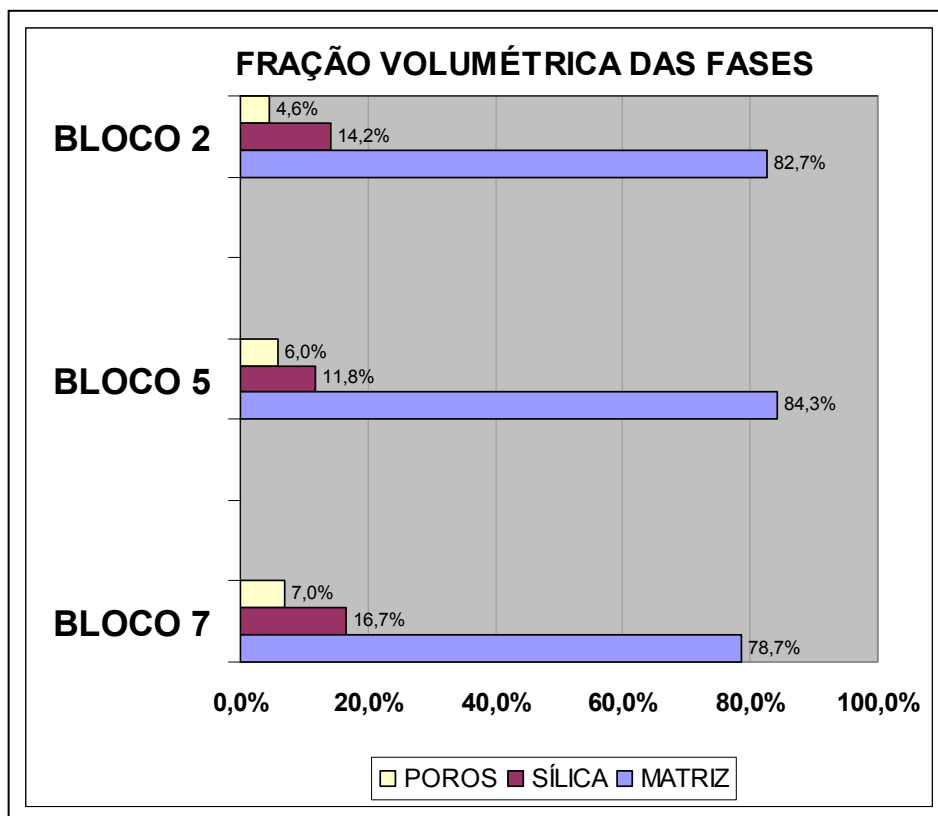


Figura 4.13 – Fração volumétrica das fases presentes nos blocos 2, 5 e 7.

Obteve-se, portanto, que:

- O bloco 7, que registrou a menor resistência à compressão nos ensaios realizados (370 kN), apresenta o maior percentual da fase de poros (7,0%), o maior percentual da fase de sílica (16,7%) e o menor percentual da fase matriz (78,7%);
- O bloco 5, que registrou a maior resistência à compressão nos ensaios realizados (840 kN), apresenta um percentual intermediário da fase de poros (6,0%), o menor percentual da fase de sílica (11,8%) e o maior percentual da matriz (84,3%);
- O bloco 2, que registrou uma resistência à compressão próxima da média nos ensaios realizados (560 kN), apresenta o menor percentual da fase de poros (4,6%), um percentual intermediário da fase de sílica (14,2%) e percentual intermediário matriz (82,7%);

A partir dos resultados obtidos têm-se as seguintes indicações:

- A matriz está relacionada de forma direta com a resistência à compressão dos blocos influenciando-a de forma positiva, ou seja, quanto maior a quantidade desta fase, maior a resistência à compressão do bloco e vice versa.
- A fase de sílica está relacionada de forma direta com a resistência à compressão dos blocos influenciando-a de forma negativa, ou seja, quanto maior a quantidade desta fase, menor a resistência à compressão do bloco e vice versa.
- A fase de poros, do ponto de vista quantitativo, está relacionada de forma secundária com a resistência à compressão dos blocos influenciando-a de forma negativa. O bloco 7, que registrou a menor resistência à compressão apresentou o maior percentual de poros, o que justifica a influência negativa, entretanto, houve uma inversão entre os blocos 2 e 5. O bloco 5, que teve a maior resistência à compressão apresentou um percentual intermediário de poros e o bloco 2, que teve uma resistência intermediária à compressão apresentou o menor percentual de poros, o que justifica uma influência secundária.

A relação secundária dos poros, do ponto de vista quantitativo, com a resistência à compressão dos blocos, significa que a resistência à compressão dos blocos é menos sensível a uma alteração da quantidade dos poros, do que a uma alteração no seu formato e orientação, que, como foi visto, governam o mecanismo de ruptura dos blocos cerâmicos estruturais.

A tabela (4.9) mostra os resultados obtidos para o tamanho das inclusões da fase de sílica para os blocos 2, 5 e 7 a partir da média dos valores obtidos em cada uma das micrografias.

Tabela 4.9 – Tamanho das inclusões da fase de sílica para os blocos 2, 5 e 7.

	INCLUSÕES DA FASE DE SÍLICA				
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIO	DESVIO PADRÃO	
BLOCO 2	5,1	221,0	15,4	17,2	EIXO MAIOR (µm)
	2,4	116,0	8,0	9,6	EIXO MENOR (µm)
BLOCO 5	5,1	185,2	14,8	15,3	EIXO MAIOR (µm)
	2,4	106,5	7,6	8,7	EIXO MENOR (µm)
BLOCO 7	5,1	213,7	18,0	19,8	EIXO MAIOR (µm)
	2,4	129,6	9,1	10,3	EIXO MENOR (µm)

Obteve-se, portanto, que:

- O bloco 7, que registrou a menor resistência à compressão nos ensaios realizados (370 kN), apresenta os maiores valores médios para o tamanho das inclusões da fase de sílica tanto no eixo menor (9,1µm), como no eixo maior (18,0µm). Também apresenta os maiores desvios padrão, no eixo menor (10,3µm) e no eixo maior (19,8µm);
- O bloco 5, que registrou a maior resistência à compressão nos ensaios realizados (840 kN), apresenta os menores valores médios para o tamanho das inclusões da fase de sílica tanto no eixo menor (7,6µm), como no eixo maior (14,8µm). Também apresenta os menores desvios padrão, no eixo menor (8,7µm) e no eixo maior (15,3µm);
- O bloco 2, que registrou uma resistência à compressão próxima da média nos ensaios realizados (560 kN), apresenta valores médios intermediários para o tamanho das inclusões da fase de sílica tanto no eixo menor (8,0µm), como no eixo maior (15,4µm). Também apresenta desvios padrão intermediários, no eixo menor (9,6µm) e no eixo maior (17,2µm);

A partir dos resultados obtidos têm-se as seguintes indicações:

- O tamanho das inclusões da fase de sílica está relacionado de forma direta com a resistência à compressão dos blocos influenciando-a de forma negativa, isto é, quanto maior for esse tamanho, menor a resistência à compressão e vice versa.
- A uniformidade do tamanho das inclusões da fase de sílica está relacionada de forma direta com a resistência à compressão dos blocos influenciando-a de forma positiva, isto é, quanto mais uniformes forem os tamanhos dessas inclusões, maior a resistência à compressão e vice versa.

Além disso, a razão média EIXO MAIOR/EIXO MENOR encontrada para as inclusões da fase de sílica foi de 2,0. Isto significa que as inclusões da fase de sílica, na média, apresentaram uma maior dimensão, aproximadamente igual ao dobro da menor dimensão, caracterizando um formato ligeiramente alongado.

A tabela (4.10) mostra os resultados obtidos para o tamanho dos poros para os blocos 0, 2, 5 e 7 a partir da média dos valores obtidos em cada uma das micrografias realizadas. O bloco 0, cujas amostras foram retiradas antes do ensaio de ruptura à compressão, foi estudado para que se pudesse avaliar se seus poros apresentavam diferenças em relação aos dos blocos cujas amostras foram retiradas após este ensaio (2, 5 e 7).

Tabela 4.10 – Tamanho dos poros para os blocos 0, 2, 5 e 7.

	POROS				
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIO	DESVIO PADRÃO	
BLOCO 0	5,6	139,7	17,4	16,1	EIXO MAIOR (µm)
	2,4	46,7	6,7	5,5	EIXO MENOR (µm)
BLOCO 2	5,4	146,1	20,9	19,9	EIXO MAIOR (µm)
	2,4	37,5	7,2	5,4	EIXO MENOR (µm)
BLOCO 5	5,1	164,2	18,3	18,0	EIXO MAIOR (µm)
	2,4	60,0	6,9	6,0	EIXO MENOR (µm)
BLOCO 7	5,6	169,5	21,9	22,6	EIXO MAIOR (µm)
	2,4	52,9	7,5	6,3	EIXO MENOR (µm)

Obteve-se, portanto, que:

- O bloco 7, que registrou a menor resistência à compressão nos ensaios realizados (370 kN), apresenta os maiores valores médios para o tamanho dos poros tanto no eixo menor (7,5µm), como no eixo maior (21,9µm). Também apresenta os maiores desvios padrão, no eixo menor (6,3µm) e no eixo maior (22,6µm);
- O bloco 5, que registrou a maior resistência à compressão nos ensaios realizados (840 kN), apresenta os menores valores médios para o tamanho dos poros tanto no eixo menor (6,9µm), como no eixo maior (18,3µm). Também apresenta o menor desvio padrão no eixo maior (18,0µm) e um desvio padrão com valor intermediário no eixo menor (6,0µm);

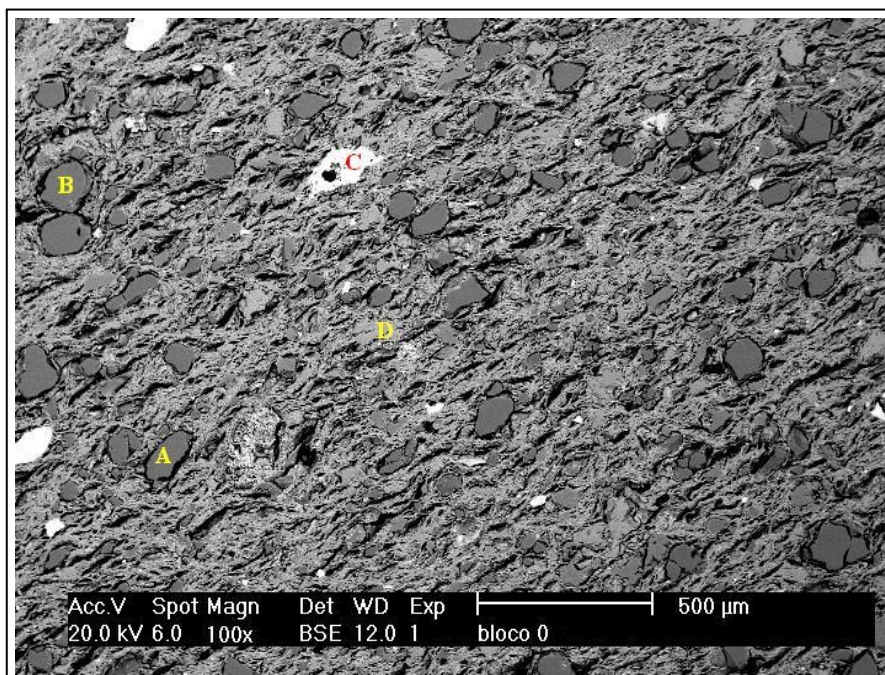
- O bloco 2, que registrou uma resistência à compressão próxima da média nos ensaios realizados (560 kN), apresenta valores médios intermediários para o tamanho dos poros tanto no eixo menor (7,2 μ m), como no eixo maior (20,9 μ m). Também apresenta desvio padrão intermediário no eixo maior (19,9 μ m) e o menor desvio padrão no eixo menor (5,4 μ m);
- O bloco 0 apresenta, quando comparado com os blocos 2, 5 e 7, os menores valores médios para o tamanho dos poros tanto no eixo menor (6,7 μ m), como no eixo maior (17,4 μ m). Também apresenta o menor desvio padrão no eixo maior (16,1 μ m) e um desvio padrão no eixo menor (5,5 μ m) com valor muito próximo do menor que é de (5,4 μ m) no bloco 2;

A partir dos resultados obtidos têm-se as seguintes indicações:

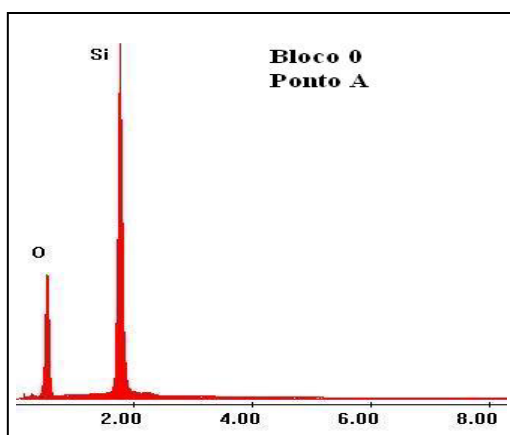
- O tamanho dos poros está relacionado de forma direta com a resistência à compressão dos blocos influenciando-a de forma negativa, isto é, quanto maior for esse tamanho, menor a resistência à compressão e vice versa.
- A uniformidade do tamanho dos poros está relacionada de forma direta com a resistência à compressão dos blocos influenciando-a de forma positiva, isto é, quanto mais uniformes forem os tamanhos desses poros, maior a resistência à compressão e vice versa. Não foi considerada a pequena discrepância ocorrida para os resultados obtidos no desvio padrão do eixo menor entre os blocos 2 e 5.
- Os ensaios de resistência à compressão provocaram um aumento nas dimensões dos poros dos blocos, tanto no eixo menor quanto no eixo maior, bem como uma diminuição na sua uniformidade. O bloco 0 deveria ter apresentado, com base em sua carga de ruptura (810 kN), dimensões e desvio padrão para o tamanho dos poros, semelhantes aos que foram encontradas para o bloco 5 se os ensaios de ruptura não tivessem influência sobre este parâmetro. Portanto, o processo de fissuração ocorrido quando os blocos foram submetidos a um carregamento até a ruptura provocou um aumento permanente do tamanho dos poros como foi observado nos blocos 2, 5 e 7 quando comparados ao bloco 0.

Além disso, a razão média EIXO MAIOR/EIXO MENOR encontrada para os poros foi de 2,8. Isto significa que os poros, na média, apresentaram uma maior dimensão, aproximadamente igual ao triplo da menor dimensão, caracterizando um formato alongado.

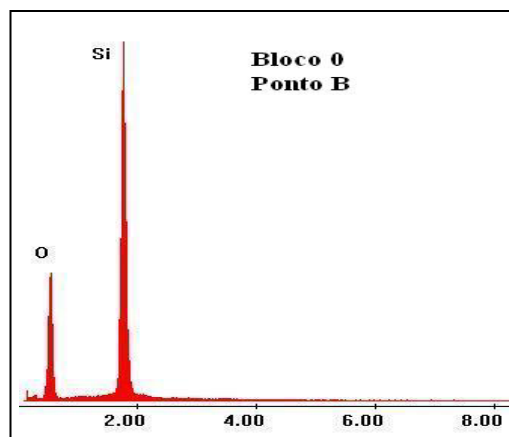
São apresentadas nas figuras (4.14), (4.15), (4.16) e (4.17) as micrografias feitas em microscópio eletrônico de varredura para os blocos 0, 2, 5 e 7 respectivamente, com as indicações dos pontos onde foram realizadas as análises químicas. Também são mostrados os espectros de EDS de cada ponto analisado.



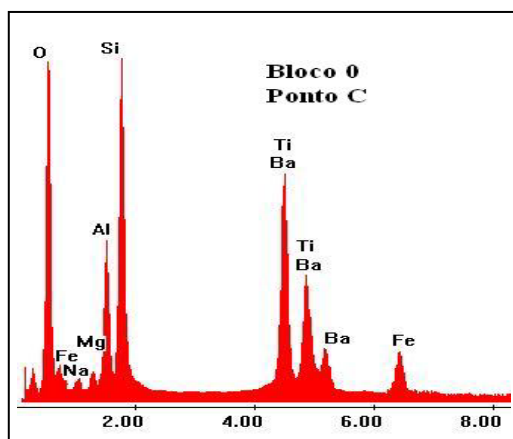
(a)



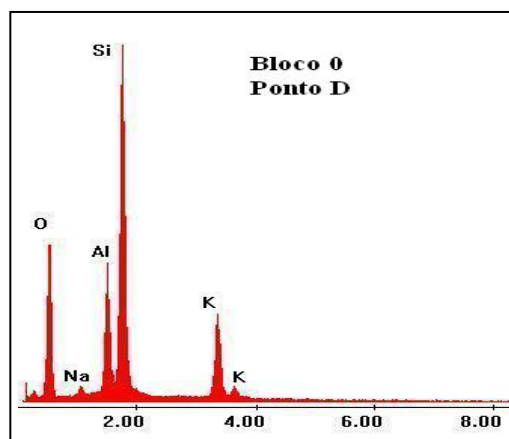
(b)



(c)

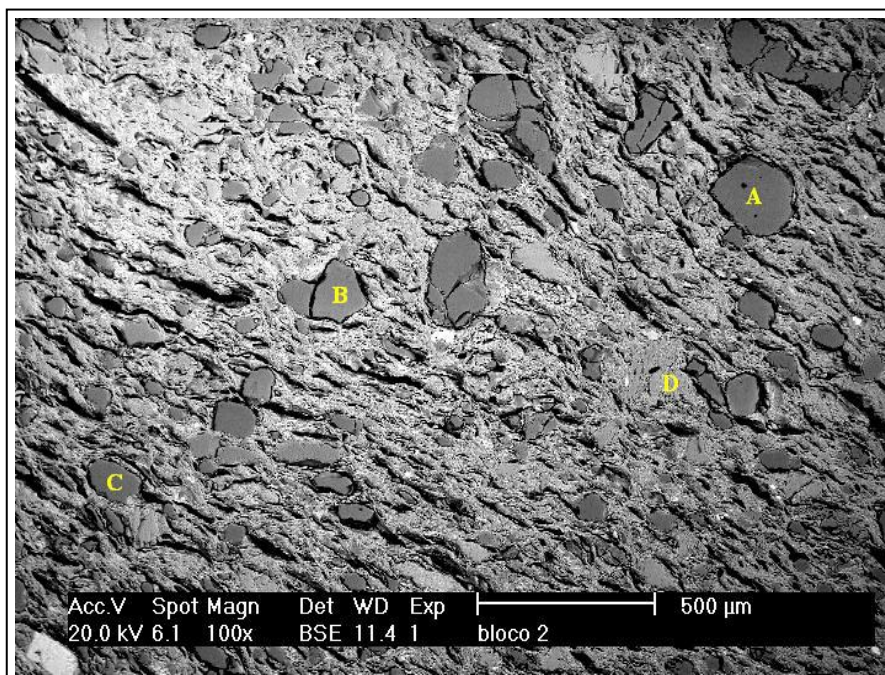


(d)

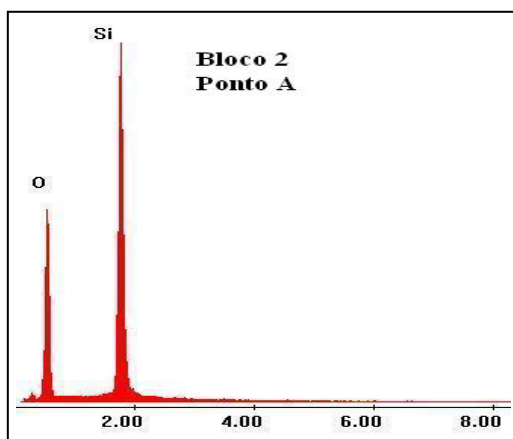


(e)

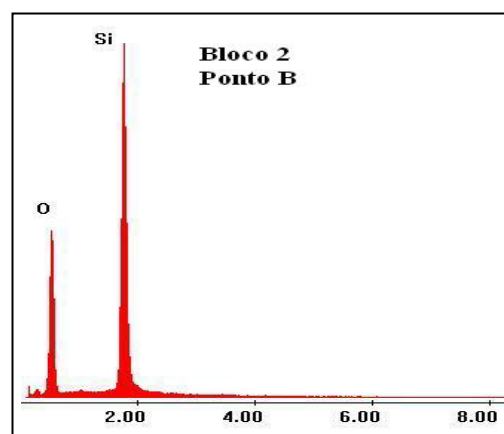
Figura 4.14 – Micrografia do bloco 0 (100X) indicando os pontos onde foram feitas análises de composição química (a). Espectros de EDS do bloco 0 em quatro diferentes pontos. (b) Ponto A; (c) Ponto B; (d) Ponto C; (e) Ponto D.



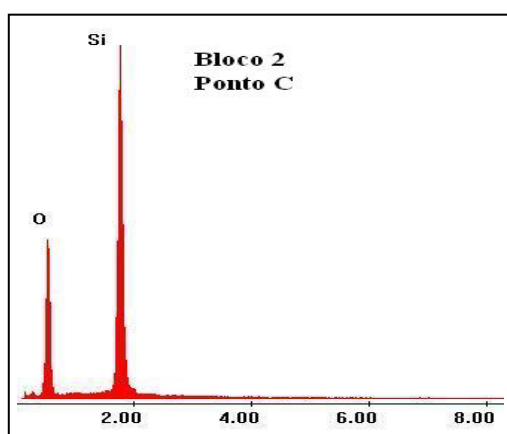
(a)



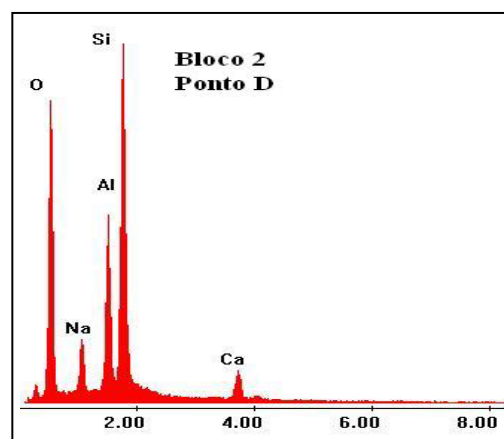
(b)



(c)

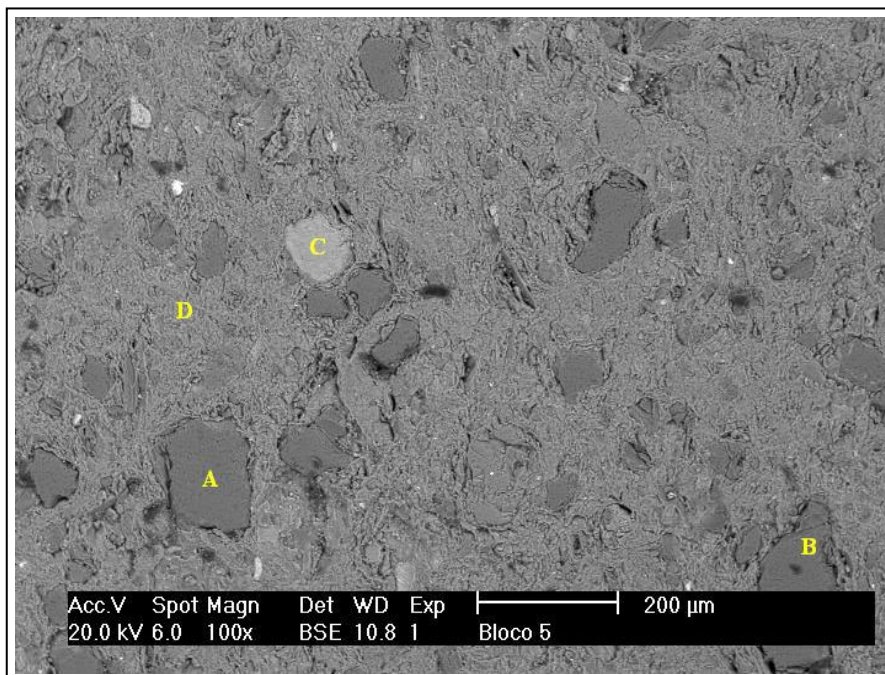


(d)

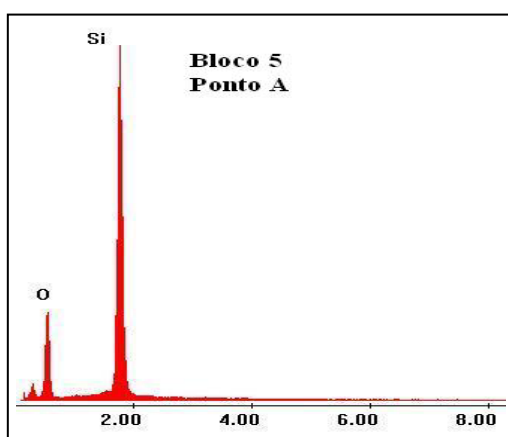


(e)

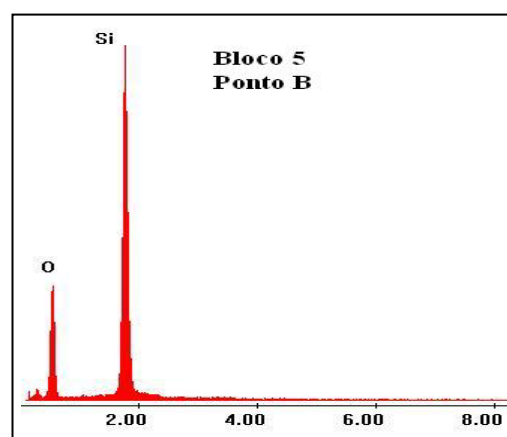
Figura 4.15 – Micrografia do bloco 2 (100X) indicando os pontos onde foram feitas análises de composição química (a). Espectros de EDS do bloco 2 em quatro diferentes pontos. (b) Ponto A; (c) Ponto B; (d) Ponto C; (e) Ponto D.



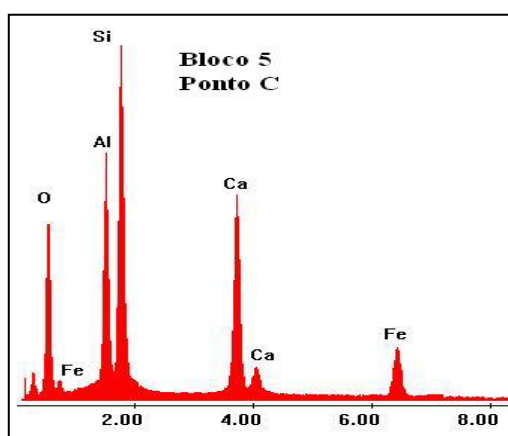
(a)



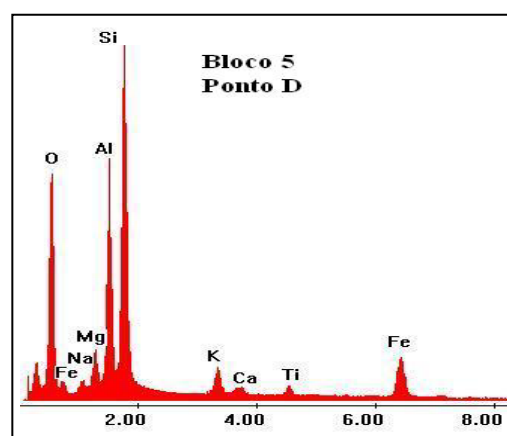
(b)



(c)

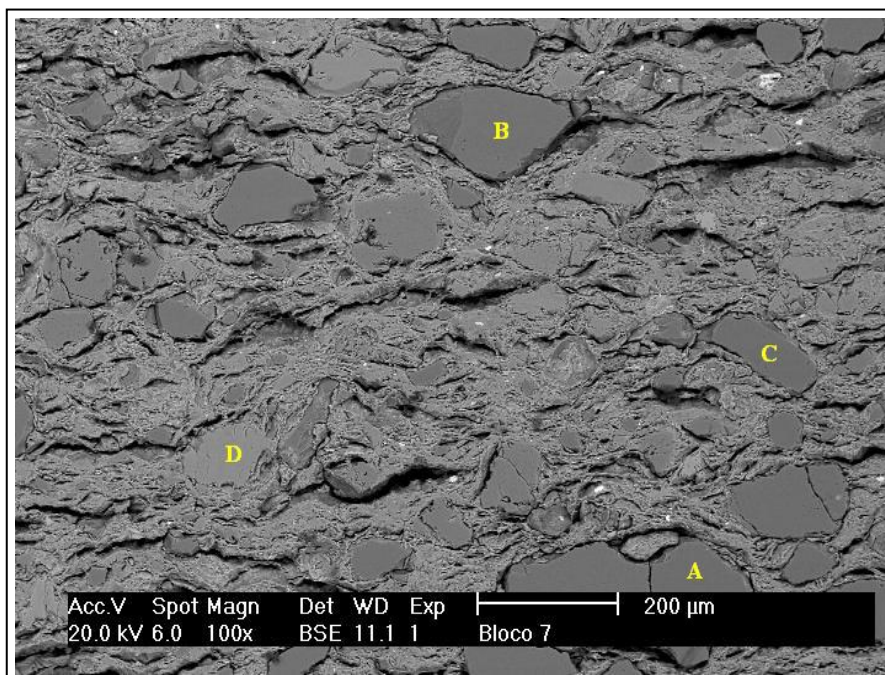


(d)

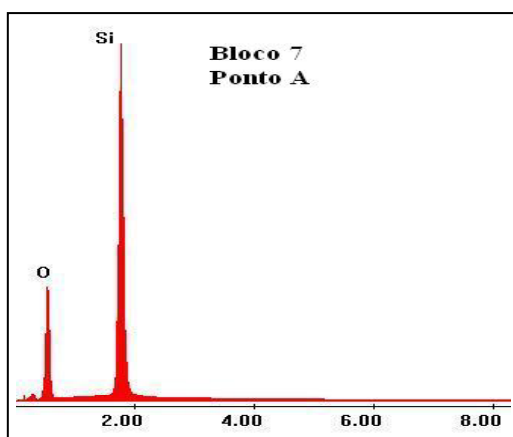


(e)

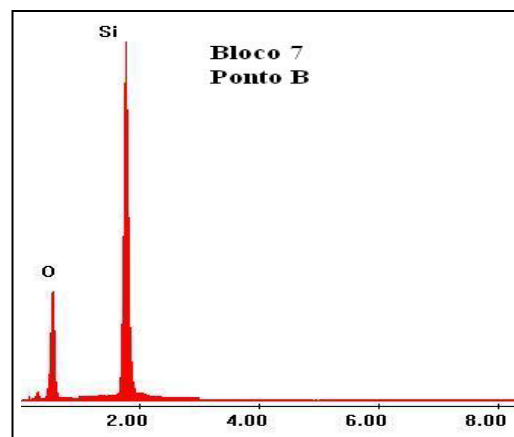
Figura 4.16 – Micrografia do bloco 5 (100X) indicando os pontos onde foram feitas análises de composição química (a). Espectros de EDS do bloco 5 em quatro diferentes pontos. (b) Ponto A; (c) Ponto B; (d) Ponto C; (e) Ponto D.



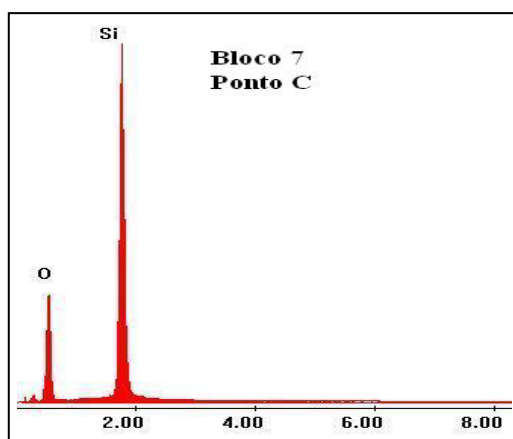
(a)



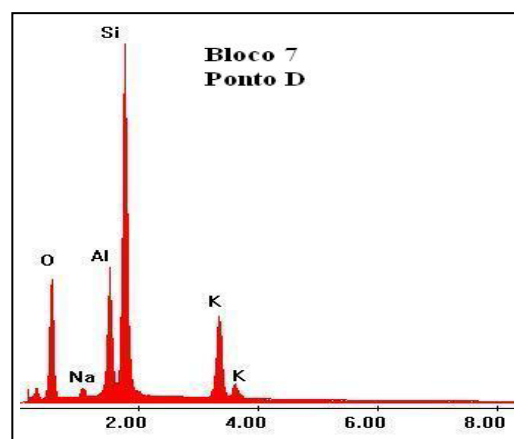
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.17 – Micrografia do bloco 7 (100X) indicando os pontos onde foram feitas análises de composição química (a). Espectros de EDS do bloco 7 em quatro diferentes pontos. (b) Ponto A; (c) Ponto B; (d) Ponto C; (e) Ponto D.

Para o bloco 0, as análises de composição química foram feitas de acordo com a figura (4.14a):

- Fase apresentando uma coloração cinza escuro - foram escolhidos os pontos A e B onde se detectou a presença de O e Si de acordo com os espectros de EDS apresentados nas figuras (4.14b) e (4.14c).
- Locais apresentando uma coloração branca - foi escolhido o ponto C onde se detectou a presença de O, Fe, Na, Mg, Al, Si, Ti e Ba de acordo com o espectro de EDS apresentado na figura (4.14d).
- Fase apresentando uma coloração cinza - foi escolhido o ponto D onde se detectou a presença de O, Na, Al, Si, e K de acordo com o espectro de EDS apresentado na figura (4.14e).

Para o bloco 2, as análises de composição química foram feitas de acordo com a figura (4.15a):

- Fase apresentando uma coloração cinza escuro - foram escolhidos os pontos A, B e C onde se detectou a presença de O e Si de acordo com os espectros de EDS apresentados nas figuras (4.15b), (4.15c) e (4.15d).
- Fase apresentando uma coloração cinza - foi escolhido o ponto D onde se detectou a presença de O, Na, Al, Si, e Ca de acordo com o espectro de EDS apresentado na figura (4.15e).

Para o bloco 5, as análises de composição química foram feitas de acordo com a figura (4.16a):

- Fase apresentando uma coloração cinza escuro - foram escolhidos os pontos A e B onde se detectou a presença de O e Si de acordo com os espectros de EDS apresentados nas figuras (4.16b) e (4.16c).
- Local apresentando uma coloração cinza claro - foi escolhido o ponto C onde se detectou a presença de O, Fe, Al, Si, e Ca de acordo com o espectro de EDS apresentado na figura (4.16d).
- Fase apresentando uma coloração cinza - foi escolhido o ponto D onde se detectou a presença de O, Fe, Na, Mg, Al, Si, K, Ca e Ti de acordo com o espectro de EDS apresentado na figura (4.16e).

Para o bloco 7, as análises de composição química foram feitas de acordo com a figura (4.17a):

- Fase apresentando uma coloração cinza escuro - foram escolhidos os pontos A, B e C onde se detectou a presença de O e Si de acordo com os espectros de EDS apresentados nas figuras (4.17b), (4.17c) e (4.17d).
- Fase apresentando uma coloração cinza - foi escolhido o ponto D onde se detectou a presença de O, Na, Al, Si, e K de acordo com o espectro de EDS apresentado na figura (4.17e).

Segundo as análises químicas realizadas pôde-se constatar:

- A existência de uma matriz (região cinza) composta basicamente por O, Na, Al, Si que foram detectados em todos os blocos e K que só não foi encontrado na matriz do bloco 2. O elemento Ca que foi encontrado na matriz dos blocos 2 e 5 pode ser considerado como possível na matriz. O Fe, Mg e Ti foram encontrados apenas na matriz do bloco 7, podendo ser considerados como impurezas desta fase.
- Uma grande quantidade de inclusões (região cinza escuro) dentro da matriz compostas de O e Si que foram detectados em todas as análises realizadas.

4.2 Ensaio das argamassas

A areia utilizada para o preparo das argamassas apresentou um módulo de finura de 2,5 e um teor de material pulverulento de 4,5%.

Na tabela (4.11) apresenta-se a identificação de cada corpo de prova de argamassa de acordo com o traço utilizado, bem como os valores médios obtidos para o diâmetro de cada um.

Tabela 4.11 – Diâmetro médio dos corpos de prova de argamassa.

Traço	Corpo de Prova	Diâmetro (mm)
T1	T1A	50,2
	T1B	50,0
	T1C	50,0
	T1D	50,2
T2	T2A	50,0
	T2B	50,1
	T2C	50,1
	T2D	50,2
T3	T3A	50,0
	T3B	50,0
	T3C	49,9
	T3D	49,9

4.2.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos para a resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa são apresentados na tabela (4.12).

Tabela 4.12 – Resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa.

Corpo de Prova	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
T1A	14,9	15,4	2,4	15,4
T1B	(*)			
T1C	13,4			
T1D	18,0			
T2A	8,2	9,4	0,9	9,6
T2B	9,7			
T2C	10,3			
T2D	9,5			
T3A	4,8	4,7	0,2	5,1
T3B	4,9			
T3C	4,5			
T3D	4,5			

(*) Corpo de Prova descartado.

O corpo de prova T1B foi inutilizado devido a um problema na operação da máquina de compressão durante o ensaio.

4.3 Ensaio dos prismas

4.3.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos para a resistência à compressão dos prismas na área bruta são apresentados na tabela (4.13).

Tabela 4.13 – Resistência à compressão dos prismas na área bruta.

Corpo de Prova	Resistência à Compressão (Mpa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
P1A	9,7	9,7	1,2	12,0
P1B	10,9			
P1C	8,5			
P2A	7,5	7,8	0,3	3,5
P2B	8,0			
P2C	7,9			
P3A	5,2	5,1	0,4	7,8
P3B	5,4			
P3C	4,7			

Pode-se avaliar a dispersão dos valores de resistência à compressão de prismas através do coeficiente de variação. Segundo ASTROZA apud OLIVEIRA (1990), os coeficientes de variação inferiores a 10% podem ser considerados excelentes, entre 10 e 15% são considerados bons e entre 15 e 20% regulares. Valores acima de 20% excedem o limite considerado aceitável para este tipo de amostragem. Como se pode observar na tabela (4.13), o resultado de dispersão obtido para os prismas executados com o traço 1 de argamassa foi bom enquanto que os dos traços 2 e 3 foi excelente.

No gráfico da figura (4.18) está representada a relação entre resistência à compressão dos prismas e a resistência à compressão das argamassas.

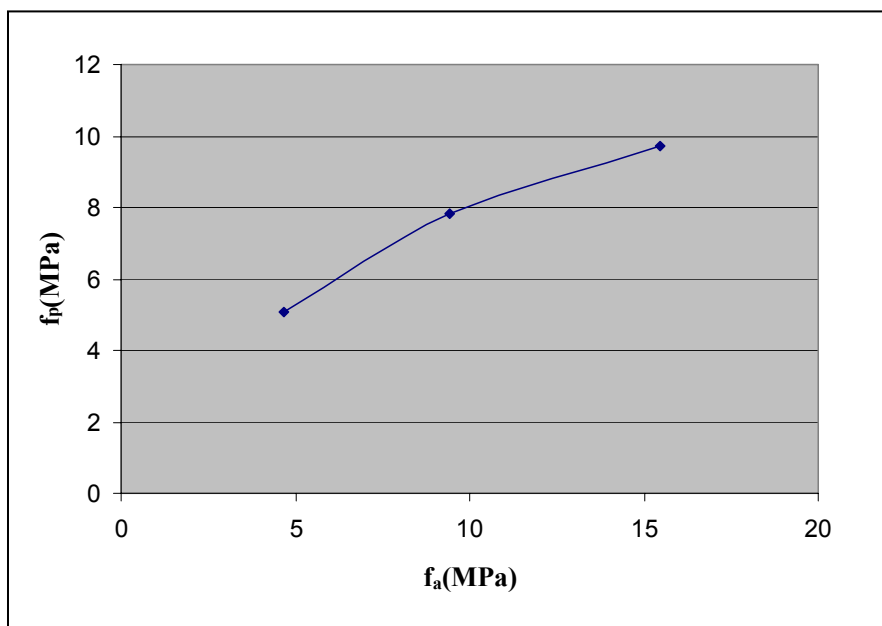


Figura 4.18 – Curva f_p x f_a para os três traços de argamassa utilizados.

A Expressão que melhor representou esta relação foi uma função polinomial do segundo grau apresentada na equação (4.1).

$$f_p = -0,02 \cdot f_a^2 + 0,90 \cdot f_a + 1,38 \quad (4.1)$$

Os resultados demonstraram que quanto mais fraca a argamassa utilizada, menor foi a resistência à compressão dos prismas (dentro do intervalo de traços ensaiados).

Isto ocorreu pelo fato de que quando bloco e argamassa trabalham em conjunto, sob compressão, a argamassa deforma-se mais transversalmente e quanto mais fraca a argamassa maior é a sua deformação transversal. De forma simplificada, em uma parede com blocos e argamassa a solicitação dos componentes dá-se como no esquema apresentado na figura (2.5). Como se pode observar, o bloco fica submetido, entre outras, a uma tensão de tração perpendicular (σ_{xb}) aos planos preferenciais de ruptura o que potencializa e acelera a formação e separação entre esses planos com a conseqüente ruptura do bloco. Isto fez com que o bloco (dentro do prisma) rompesse com um nível de cargas de compressão menor quando foram utilizadas argamassas menos resistentes, uma vez que as rupturas de todos os prismas ensaiados se deram nos blocos.

As figuras (4.19) e (4.20) mostram a ruptura de prismas pelo bloco através da formação de grandes trincas verticais, com a separação de grandes pedaços e muitas vezes com a descamação de outros menores, sempre ao longo da altura e na direção de extrusão, deixando clara a formação de planos de ruptura. Os prismas de blocos

cerâmicos se mostraram, portanto, muito sensíveis às deformações da argamassa. Isto se deve ao formato e disposição interna dos poros vista no item 4.1.3.



Figura 4.19 – Início de ruptura do prisma pelos blocos. Formação de trinca vertical ao longo da direção de extrusão (1) e desprendimento de pequenos pedaços (2).



Figura 4.20 – Ruptura do prisma pela formação de plano de ruptura provocada pela tração no bloco com o desprendimento de um grande pedaço.

A tabela (4.14) apresenta a influência que o aumento da resistência à compressão das argamassas trouxe para a resistência à compressão dos prismas. Foram feitas comparações entre as resistências das argamassas e dos prismas obtidas para todos os traços utilizados.

Tabela 4.14 – Influência da resistência à compressão das argamassas na resistência à compressão dos prismas.

Traços comparados	Crescimento da resistência da argamassa (%)	Crescimento da resistência do prisma (%)
T2 e T1	63,4	24,3
T3 e T2	102,0	53,4
T3 e T1	230,1	90,7

Observa-se que o aumento da resistência à compressão das argamassas não provocou um aumento da mesma grandeza na resistência à compressão dos prismas. Teve-se uma transferência média de aumento de resistência de 43% evidenciando o papel secundário da resistência das juntas de argamassa para resistência à compressão dos prismas.

Na tabela (4.15) as tensões de trabalho das argamassas, no momento da ruptura dos prismas, são comparadas com a resistência à compressão obtida para cada traço de argamassa.

Tabela 4.15 – Fator de majoração da resistência à compressão da argamassa.

Traço da argamassa	Resistência à compressão da argamassa (MPa)	Tensão da argamassa no momento da ruptura do prisma (MPa)	Fator de majoração da resistência à compressão da argamassa
T1	15,4	24,1	1,6
T2	9,4	19,4	2,0
T3	4,7	12,6	2,7

Pode-se observar que o confinamento lateral da junta de argamassa pelos blocos, no prisma, provocou um aumento significativo na resistência à compressão da argamassa. Para o traço T1 obteve-se um aumento de 60%, para o traço T2 o aumento foi de 100% e para o traço T3 de 170%. A diminuição do fator de majoração da argamassa com o aumento da sua resistência à compressão é um indicador de ruptura do prisma pelo bloco. Isto ocorre, pois as argamassas mais resistentes exigem maiores forças de confinamento lateral para terem a sua resistência majorada. O confinamento

lateral que o bloco pode exercer sobre a argamassa está limitado à resistência à tração transversal do bloco. Como não se aumentou a resistência do bloco, não houve aumento da capacidade de confinamento e, portanto, os blocos romperam, por tração, antes de conseguirem majorar a resistência à compressão da argamassa.

Como todas as rupturas de prismas ocorreram pelos blocos, ainda se poderiam obter maiores fatores de majoração da resistência à compressão da argamassa, caso fossem utilizados blocos mais resistentes ou uma argamassa mais fraca que a do traço T3.

Na tabela (4.16) são mostrados os resultados da eficiência dos prismas para cada um dos traços utilizados.

Tabela 4.16 – Eficiência dos prismas.

Traço	Eficiência do prisma (f_p/f_b)
T1	0,67
T2	0,54
T3	0,35

Os valores mostram uma perda significativa da eficiência do prisma com a diminuição da resistência à compressão da argamassa. Também se observa o fato importantíssimo da obtenção do fator de eficiência do prisma muito baixo para o traço T3.

Na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos deve-se, portanto, trabalhar com argamassas mais resistentes, para que se possam conseguir os maiores fatores de eficiência do prisma possíveis. Evidentemente que, a partir de um determinado valor de resistência de argamassa, não se conseguirá mais aumentos na resistência e na eficiência dos prismas. Este limite existe, pois sempre teremos para a argamassa, deformações transversais maiores do que no bloco cerâmico. Estas deformações transversais da argamassa fazem surgir tensões de tração no bloco, provocando a sua ruptura com uma carga inferior àquela que o romperia quando trabalhando isoladamente (eficiência do prisma ≤ 1). A maior eficiência do prisma encontrada foi com a utilização do traço T1 que apresentou uma resistência um pouco superior (15,4 MPa) à do bloco na área bruta (14,4 MPa).

CAVALHEIRO E GOMES (2002) apresentam uma série de resultados de ensaios de prismas de blocos cerâmicos estruturais onde os maiores valores de eficiência do prisma foram alcançados quando a resistência à compressão da argamassa é aproximadamente igual ou um pouco superior à resistência à compressão do bloco na

área bruta. MOHAMAD et al. (2002b) também chega a esta conclusão trabalhando, entretanto, com blocos de concreto.

Deve-se procurar, portanto, retardar o aparecimento dos planos de ruptura no bloco cerâmico com a diminuição da deformação transversal da argamassa. Sugere-se que isto seja feito com a utilização de traços que gerem argamassas com resistência à compressão igual à resistência à compressão do bloco na área bruta.

É fundamental se frisar que, devido ao formato e à disposição dos poros, na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos existe a possibilidade de se obterem fatores de eficiência do prisma muito baixos, quando se usam argamassas muito fracas. Este fato extremamente perigoso exige que se faça um controle rigoroso das argamassas utilizadas a fim de se evitarem acidentes graves e inesperados em obras onde se utilizam blocos cerâmicos estruturais.

Deduz-se que para se obter um comportamento menos frágil para a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, isto é, onde a ruptura se dá na junta de argamassa ou simultaneamente na junta e no bloco, ter-se-ia que trabalhar (propositalmente) com argamassas de resistências muito baixas. Estas baixas resistências implicariam em fatores de eficiência do prisma muito baixos e, portanto, com um aproveitamento muito ruim da resistência dos blocos. Para que uma parede pudesse resistir a uma determinada solicitação de compressão seria necessária a utilização de blocos que resistissem a solicitações muito maiores. Esta é uma condição extremamente desfavorável ou até inviável do ponto de vista econômico. Portanto, na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos se estará sempre trabalhando em um regime de ruptura frágil o que ressalta a importância da utilização de armaduras construtivas.

4.4 Ensaio dos prismas contrafiados

4.4.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos para a resistência à compressão dos prismas contrafiados na área bruta são apresentados na tabela (4.17).

Tabela 4.17 – Resistência à compressão dos prismas contrafiados na área bruta.

Traço	Corpo de Prova	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
T1	pcf1A	7,3	8,0	0,7	9,2
	pcf1B	8,8			
	pcf1C	7,8			
T2	pcf2A	5,2	5,7	0,6	10,6
	pcf2B	5,6			
	pcf2C	6,4			
T3	pcf3A	3,5	3,6	0,2	5,0
	pcf3B	3,5			
	pcf3C	3,8			

Como se pode observar, os resultados obtidos apresentaram pequena dispersão com coeficientes de variação menores do que 11%. Isto demonstra uma homogeneidade no processo de confecção dos prismas contrafiados garantindo uma boa confiabilidade nos resultados.

No gráfico da figura (4.21) está representada a relação entre resistência à compressão dos prismas contrafiados e a resistência à compressão das argamassas.

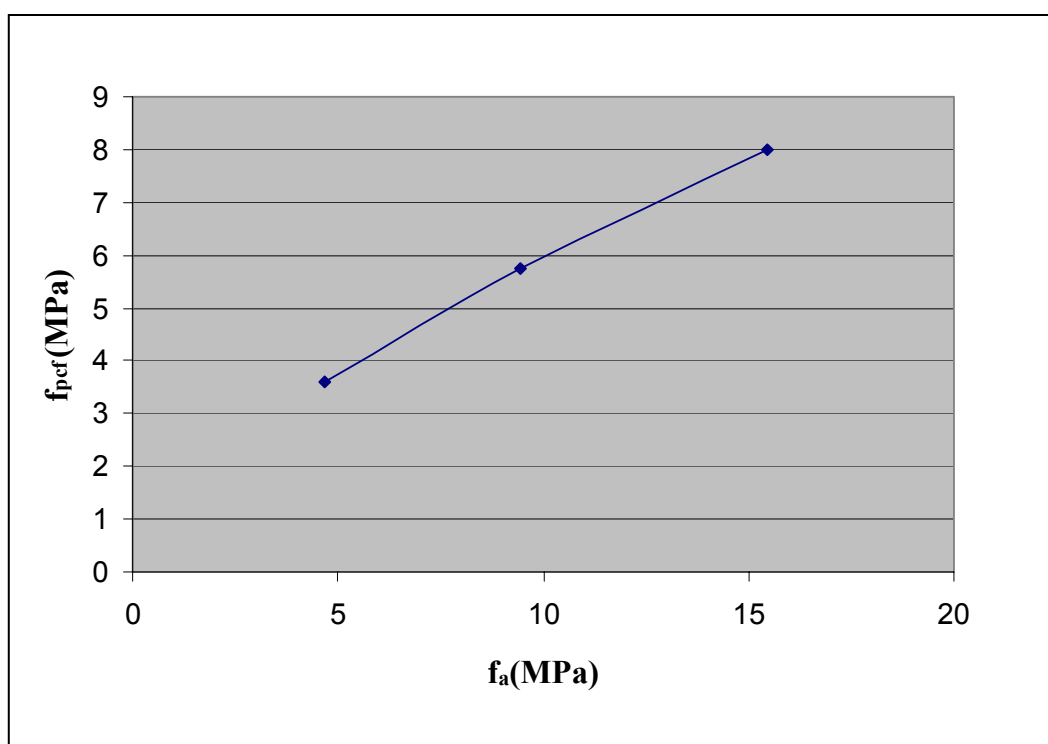


Figura 4.21 – Curva f_{pcf} x f_a para os três traços de argamassa utilizados.

A Expressão que melhor representou esta relação foi uma função polinomial do segundo grau apresentada na equação (4.2).

$$f_{pcf} = -0,006 \cdot f_a^2 + 0,531 \cdot f_a + 1,267 \quad (4.2)$$

Os prismas contrafiados se comportaram de maneira semelhante aos prismas. Os resultados confirmaram que quanto mais fraca a argamassa utilizada, menor a resistência à compressão dos prismas contrafiados (dentro do intervalo de traços ensaiados). Verificou-se que as rupturas também ocorreram por tração nos blocos devido às maiores deformações transversais das juntas de argamassa. Pode-se deduzir então, que a ruptura nos prismas contrafiados se deu através do mesmo mecanismo discutido anteriormente para os prismas.

A figuras (4.22) mostra um prisma contrafiado rompido pelo bloco através da formação de grandes trincas verticais, ao longo da altura e na direção de extrusão. Isto, mais uma vez, deixa claro a formação dos planos de ruptura devido ao formato e disposição dos poros nos blocos. Assim como os prismas, os prismas contrafiados também se mostraram, muito sensíveis às deformações transversais da argamassa.



Figura 4.22 – Ruptura de um prisma contrafiados. Formação de trincas verticais ao longo da direção de extrusão (1) e desprendimento de pequenos pedaços (2).

A tabela (4.18) apresenta a influência que o aumento da resistência à compressão das argamassas trouxe para a resistência à compressão dos prismas contrafiados.

Tabela 4.18 – Influência da resistência à compressão das argamassas na resistência à compressão dos prismas contrafiados.

Traços comparados	Crescimento da resistência da argamassa (%)	Crescimento da resistência dos prismas contrafiados (%)
T2 e T1	63,4	39,4
T3 e T2	102,0	58,5
T3 e T1	230,1	120,9

Observa-se que o aumento da resistência à compressão das argamassas não provocou um aumento da mesma grandeza na resistência à compressão dos prismas contrafiados. Teve-se uma transferência média de aumento de resistência de 57% evidenciando, o papel secundário, entretanto maior que nos prismas, das juntas de argamassa para resistência à compressão dos prismas contrafiados.

No gráfico da figura (4.23) está representada a relação entre resistência à compressão dos prismas contrafiados e a resistência à compressão dos prismas.

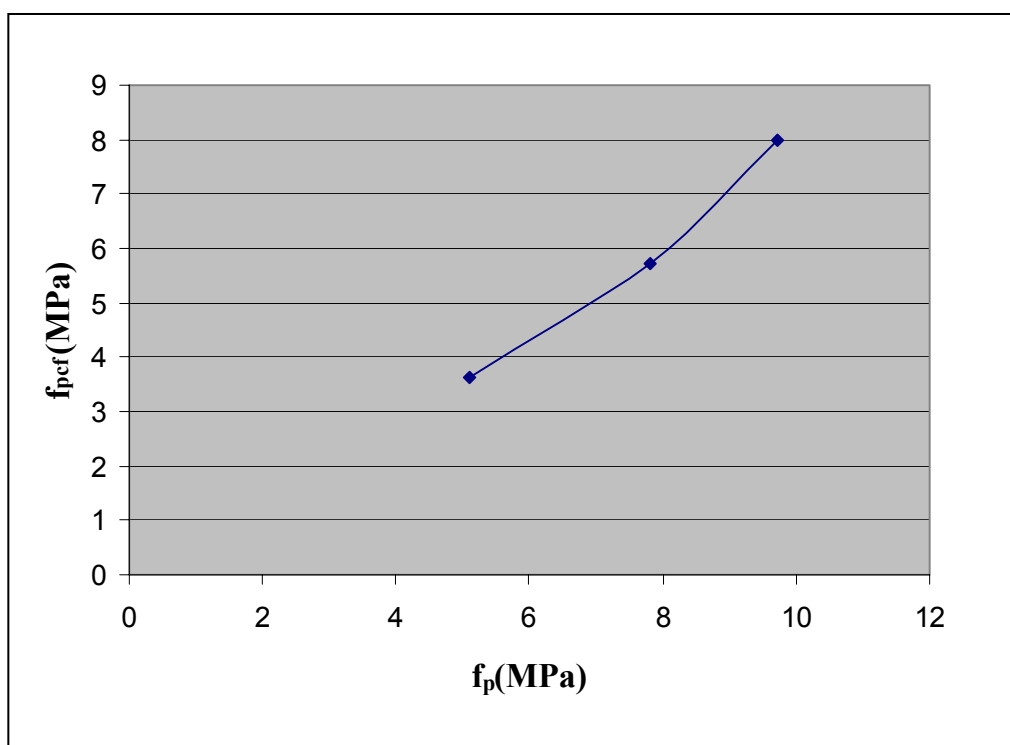


Figura 4.23 – Curva $f_{pcf} \times f_p$ para os três traços de argamassa utilizados.

A Expressão que melhor representou esta relação foi uma função polinomial do segundo grau, apresentada na equação (4.3).

$$f_{pcf} = 0,09 \cdot f_p^2 - 0,37 \cdot f_p + 3,19 \quad (4.3)$$

Segundo GALLEGOS (1991), a resistência de uma parede real equivale a 70% da resistência do prisma elaborado com os mesmos materiais. Este dado é aceito como um consenso geral. Utilizando-se uma função linear que passa pela origem para representar a curva da figura (4.23) temos a equação (4.4), com coeficiente de correlação $R^2=0,96$.

$$f_{pcf} = 0,78 \cdot f_p \quad (4.4)$$

Através da equação (4.4), tem-se para a razão f_{pcf}/f_p o valor de 0,78. Isto indica a validade de se utilizarem os prismas contrafiados para avaliar o comportamento de paredes reais de blocos cerâmicos estruturais. Este fato é de fundamental importância uma vez que o ensaio de paredes em tamanho natural é bastante oneroso, exigindo a utilização equipamentos de grande porte. Segundo a NBR 8949 (1985), uma parede para ensaio à compressão simples deve ter 120cm comprimento por 260cm de altura. Também se pôde confirmar a importância e validade dos prismas para se prever o comportamento das paredes uma vez que a partir dos valores de f_p e da razão (constante) f_{pcf}/f_p , se pode chegar à estimativa de f_{pcf} . Portanto, na grande maioria dos casos, se precisará apenas ensaiar prismas de blocos cerâmicos estruturais.

Na tabela (4.19) são mostrados os resultados da razão entre a resistência à compressão dos prismas contrafiados e a resistência à compressão dos blocos para cada um dos traços utilizados.

Tabela 4.19 – Razão entre as resistências à compressão dos prismas contrafiados e dos blocos.

Traço	f_{pcf}/f_b
T1	0,55
T2	0,40
T3	0,25

Os valores de f_{pcf}/f_b mostram uma perda significativa da eficiência dos prismas contrafiados com a diminuição da resistência à compressão da argamassa. Também foi

obtido, um valor muito baixo para o traço de argamassa T3, confirmando o perigo que representa a utilização de argamassas muito fracas com blocos cerâmicos estruturais.

A figura (4.24) ilustra de forma global as variações de resistência à compressão axial obtidas para os blocos, prismas e prismas contrafiados, para cada um dos três traços de argamassa utilizados. Pode-se verificar de forma clara, a queda de resistência ocorrida de blocos para prismas e de prismas para prismas contrafiados. O valor de f_b está representado por uma reta paralela ao eixo horizontal. A resistência à compressão do prisma (f_p) e dos prismas contrafiados (f_{pcf}) são duas curvas quase paralelas evidenciando a relação constante entre essas duas grandezas que caem com a diminuição da resistência da argamassa.

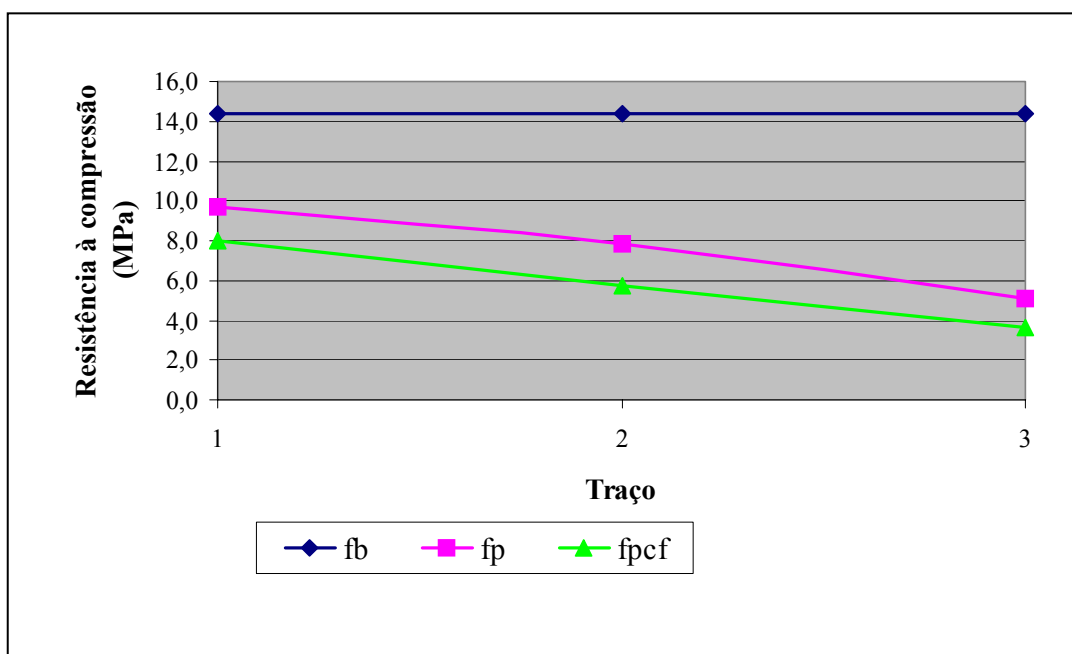


Figura 4.24 – Relações entre a resistência à compressão dos blocos, prismas e prismas contrafiados, com os traços de argamassa.

5 Conclusões

Foram apresentados ao longo dos capítulos 1, 2 3 e 4, uma série de estudos, ensaios e resultados realizados para a caracterização de blocos cerâmicos estruturais. Procurou-se entender e justificar o comportamento desses blocos quando submetidos a ações de compressão. Isto foi feito através do estudo de características na microestrutura dos blocos que são determinantes no processo de sua ruptura à compressão. Também foram encontradas relações importantes entre as propriedades dos blocos, da argamassa, dos prismas e dos prismas contrafiados. A seguir são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

5.1 Blocos cerâmicos estruturais

5.1.1 Características geométricas

Observou-se, com relação aos valores médios dos comprimentos das faces dos blocos cerâmicos estruturais (largura, altura e comprimento), que apenas a altura ficou dentro dos limites exigidos. Esta falta de precisão dimensional invalida o conceito de modulação, que é fundamental na alvenaria estrutural, levando à necessidade de ajustes na junta de argamassa e no revestimento para compensar a imprecisão dos blocos. Isto implica em um maior consumo de materiais, um pior desempenho estrutural do sistema e um aumento do peso total da estrutura. Com relação ao desvio em relação ao esquadro e planeza das faces, todos os blocos atenderam os limites exigidos.

Os blocos cerâmicos estruturais apresentaram uma área líquida de 155,9 cm² e uma área bruta de 386,3 cm². A razão “área líquida / área bruta” foi 0,40 e os blocos podem, portanto, ser classificados como blocos cerâmicos estruturais de paredes vazadas. Pode-se também recomendar, na elaboração de projetos de alvenaria estrutural que utilizem os blocos estudados, o uso do valor de 0,40 para a razão “área líquida / área bruta”.

5.1.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão média, na área bruta, encontrada para os blocos cerâmicos estruturais foi de 14,4 MPa, entretanto, o coeficiente de variação de 23,0% obtido, indica falta de homogeneidade dos blocos estudados.

5.1.3 Caracterização da microestrutura

Os blocos cerâmicos estruturais investigados apresentam uma microestrutura com as seguintes características:

- Uma matriz onde se detectou a presença de O, Na, Al, Si, K, Ca, Mg, Fe e Ti;
- Inclusões de diversos tamanhos em sua grande maioria composta por O e Si;
- Poros achatados orientados de acordo com a direção de extrusão e paralelamente ao comprimento dos blocos.

O formato e disposição dos poros caracterizam uma estrutura interna que favorece a formação de um conjunto de planos preferenciais de ruptura ao longo da direção de extrusão e paralelos ao comprimento dos blocos, quando estes são submetidos à compressão.

A ruptura dos blocos ocorreu pela separação de camadas ou planos de ruptura que se formaram ao longo da altura, na direção de extrusão e paralelamente ao comprimento dos blocos, quando os blocos foram submetidos à compressão.

A formação dos planos preferenciais de ruptura devida ao formato e disposição dos poros encontrados explica porque os blocos cerâmicos apresentam eficiências bem menores que os blocos de concreto, quando inseridos no contexto de um prisma (f_p/f_b) ou de uma parede (f_{par}/f_b).

O formato e a disposição dos poros não foram alterados pelo processo de carregamento. Isto confirma a característica frágil dos blocos.

A partir do estudo metalográfico dos blocos cerâmicos estruturais ficou indicado que:

- A matriz encontrada na microestrutura dos blocos está relacionada de forma direta com a resistência à compressão desses blocos, influenciando-a de forma positiva.
- A fase de sílica encontrada na microestrutura dos blocos está relacionada de forma direta com a resistência à compressão desses blocos, influenciando-a de forma negativa.
- A quantidade da fase de poros encontrada na microestrutura dos blocos está relacionada de forma secundária com a resistência à compressão desses blocos, influenciando-a de forma negativa.
- O tamanho das inclusões da fase de sílica dos blocos está relacionado de forma direta com a resistência à compressão desses blocos, influenciando-a de forma negativa.

- A uniformidade do tamanho das inclusões da fase de sílica dos blocos está relacionada de forma direta com a resistência à compressão desses blocos, influenciando-a de forma positiva.
- O tamanho dos poros dos blocos está relacionado de forma direta com a resistência à compressão desses blocos, influenciando-a de forma negativa.
- A uniformidade do tamanho dos poros dos blocos está relacionada de forma direta com a resistência à compressão desses blocos, influenciando-a de forma positiva.
- Os ensaios de resistência à compressão provocam um aumento nas dimensões dos poros dos blocos, tanto no eixo menor quanto no eixo maior, bem como uma diminuição na sua uniformidade.

Os blocos apresentam inclusões de sílica com um formato ligeiramente alongado, de acordo com a razão média EIXO MAIOR/EIXO MENOR de 2,0 encontrada para essas inclusões.

Os blocos apresentam poros com um formato alongado, de acordo com a razão média EIXO MAIOR/EIXO MENOR de 2,8 encontrada para esses poros.

5.2 Prismas

Pôde-se concluir que quanto mais fraca a argamassa utilizada, menor foi a resistência à compressão dos prismas. Isto ocorre pelo fato de que quando bloco e argamassa trabalham em conjunto, sob compressão, a argamassa deforma-se mais transversalmente e quanto mais fraca a argamassa maior é a sua deformação transversal. Essa deformação da argamassa provoca o surgimento prematuro de tensões de tração transversais, no bloco, o que potencializa e acelera a formação e separação de planos preferenciais de ruptura, fazendo com que o bloco (dentro do prisma) rompa.

O aumento da resistência à compressão das argamassas não provocou um aumento da mesma grandeza na resistência à compressão dos prismas. Teve-se uma transferência média de aumento de resistência de 43% evidenciando o papel secundário das juntas de argamassa para resistência à compressão dos prismas.

O confinamento lateral da junta de argamassa pelos blocos, no prisma, provocou um aumento significativo na resistência à compressão da argamassa. Para o traço T1 obteve-se um aumento de 60%, para o traço T2 o aumento foi de 100% e para o traço T3 de 170%. Como todas as rupturas de prismas ocorreram pelos blocos, ainda se poderiam obter fatores maiores de majoração da resistência à compressão da argamassa,

caso fossem utilizados blocos mais resistentes ou uma argamassa mais fraca que a do traço T3.

Houve uma perda significativa da eficiência do prisma (f_p/f_b) com a diminuição da resistência à compressão da argamassa. Devido ao formato e à disposição dos poros na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, existe a possibilidade de se obterem fatores de eficiência do prisma muito baixos, quando se usam argamassas muito fracas. Este fato extremamente perigoso exige que se faça um controle rigoroso das argamassas utilizadas a fim de se evitarem acidentes graves e inesperados em obras onde se utilizam blocos cerâmicos estruturais.

Deve-se procurar retardar o aparecimento dos planos de ruptura no bloco cerâmico com a diminuição da deformação transversal da argamassa. Sugere-se que isto seja feito com a utilização de traços que gerem argamassas com resistência à compressão igual à resistência à compressão do bloco na área bruta.

Na alvenaria estrutural de blocos cerâmicos se estará sempre trabalhando em um regime de ruptura frágil. Para se obter um comportamento menos frágil, ter-se-ia que trabalhar (propositalmente) com argamassas de resistências muito baixas. Estas baixas resistências implicariam em fatores de eficiência do prisma (f_p/f_b) muito baixos e, portanto, com um aproveitamento muito ruim da resistência dos blocos. Para que uma parede pudesse resistir a uma determinada solicitação de compressão seria necessária a utilização de blocos que resistissem a solicitações muito maiores. Esta é uma condição extremamente desfavorável ou até inviável do ponto de vista econômico.

5.3 Prismas contrafiados

Houve uma variação da resistência à compressão dos prismas contrafiados de acordo com o traço de argamassa utilizado. Quanto mais fraco o traço de argamassa, menor foi a resistência à compressão dos prismas contrafiados. Verificou-se que as rupturas também ocorreram por tração nos blocos devido às maiores deformações transversais das juntas de argamassa. Pode-se concluir, que a ruína nos prismas contrafiados se deu através do mesmo mecanismo de ruptura encontrado para os prismas.

O aumento da resistência à compressão das argamassas não provocou um aumento da mesma grandeza na resistência à compressão dos prismas contrafiados. Teve-se uma transferência média de aumento de resistência de 57% evidenciando o papel secundário, entretanto maior que nos prismas, das juntas de argamassa para resistência à compressão dos prismas contrafiados.

A função linear passando pela origem que melhor representou a variação da resistência à compressão dos prismas contrafiados em função da resistência à compressão dos prismas foi a seguinte:

$$f_{pcf} = 0,78 \cdot f_p$$

O resultado de 0,78 obtido para a razão f_{pcf}/f_p indica a validade de se utilizarem os prismas contrafiados e/ou os prismas, para avaliar o comportamento de paredes reais de blocos cerâmicos estruturais.

Houve uma perda significativa da eficiência dos prismas contrafiados (f_{pcf}/f_b) com a diminuição da resistência à compressão da argamassa. Também foram obtidos fatores de eficiência dos prismas contrafiados muito baixos, quando se usaram argamassas de baixa resistência à compressão, confirmando o perigo que representa a utilização de argamassas muito fracas com blocos cerâmicos estruturais.

5.4 Sugestões para pesquisas futuras

Repetir o trabalho que foi realizado, porém, utilizando blocos cerâmicos estruturais provenientes de outras cerâmicas do estado do Ceará e de outros estados brasileiros. Deve-se procurar identificar se as características encontradas na microestrutura dos blocos estudados podem ser generalizadas para os blocos cerâmicos principalmente no que diz respeito ao formato e à disposição dos poros. Com isto, será possível apontar fatores positivos e negativos do processo de fabricação. Pode-se identificar, por exemplo, se existe alguma diferença nas características dos poros, ligada ao sistema de extrusão utilizado (pistão, cilindros e hélice). É importante, também, que se investigue a existência ou não de problemas como a falta de precisão dimensional e grande variabilidade dos resultados que foram encontrados nos ensaios realizados.

Estudar e implementar alterações no processo de fabricação dos blocos cerâmicos estruturais, principalmente na etapa da extrusão, visando evitar a formação de poros com o formato e disposição que favoreçam a formação de planos preferenciais de ruptura. Analisar a microestrutura e ensaiar os blocos produzidos com estas modificações para comprovar ou não melhorias nas suas propriedades, principalmente na resistência à compressão.

Repetir o trabalho que foi realizado utilizando blocos de concreto estruturais. Estudar a microestrutura dos blocos de concreto visando determinar características que

possam ser determinantes no processo de sua ruptura à compressão, principalmente o formato e a disposição dos poros.

Estudar a microestrutura da interface do graute com o bloco cerâmico estrutural e do graute com o bloco de concreto estrutural objetivando identificar fatores que possam ser determinantes para o bom funcionamento desta ligação.

Elaborar um modelo numérico, fundamentado na mecânica da fratura, para avaliar a formação e propagação das trincas com a posterior formação dos planos de ruptura nos blocos. Este modelo deve se basear no formato e disposição dos poros que foram encontrados para os blocos cerâmicos estruturais. Desta forma se poderá ter um modelo numérico de avaliação do mecanismo de ruptura e da resistência à compressão dos blocos cerâmicos estruturais, baseado nas características da sua microestrutura.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Paredes de Alvenaria estrutural ensaio à compressão simples – Método de ensaio - NBR 8949. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto* - NB 1228 (NBR 10837). Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Determinação da resistência à compressão* – MB 1168 (NBR 7184). Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão* - NBR 13279. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão* - NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação* - NBR 8522. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Bloco cerâmico para alvenaria estrutural – Especificação* - NBR XX02/2003 – REV. 16. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Bloco cerâmico para alvenaria estrutural e de vedação – Método de Ensaio* - NBR XX03/2003 – REV. 23. Rio de Janeiro, 2004.

BAUER, L. A. F. *Materiais de construção*. Vol. 2, Livros Técnicos e Científicos Editora, 4ª ed., Rio de Janeiro, 1992.

CAPUTO, H. P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. Vol. 1, Livros Técnicos e Científicos Editora, 6ª ed., Rio de Janeiro, 1988.

CARASEK, H. *Estudo experimental de Alvenaria Estrutural – Resistência à compressão e resistência de aderência*. Porto Alegre, 1990. Dissertação de mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CAVALHEIRO, O. P.; GOMES, N. S. *Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados: resultados de ensaios de elementos e redutores de resistência à compressão*; pp. 411–419. In: Proceedings of the VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries. Belo Horizonte, MG, 2002.

DUARTE, R. B. *Recomendações para o Projeto e Execução de Edifícios de Alvenaria Estrutural*. ANICER, Porto Alegre, 1999.

ENRIQUE, J. E.; OCHANDIO, E.; GAZULLA, M. F. *Chemical Analysis*; pp. 549–556. In: Ceramics and Glasses, Engineered Materials Handbook, Vol. 4. ASM International, Materials Park, Ohio, 1991.

GALLEGOS, H. *Albañilería Estructural*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 3ª ed., Lima, Peru, 1991.

GALLEGOS, H. *Construcción de la mampostería*; Vol 1, pp. 33-71. Anais do COM. PAT., 1993.

GOLDSTEIN, J. I.; NEWBURY, D. E.; ECHLIN, P.; JOY, D. C.; LYMAN, C. E.; LIFSHIN, E.; SAWYER, L.; MICHAEL, J. R. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 3ª ed., New York, 2003.

HILSDORF, H. K. *Investigation into the failure mechanisms of brick masonry under axial compression*. Designing, Engineering and Construction with masonry products. Houston, Gulf Publishing CO., 1969.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. *Introduction to ceramics*. John Wiley & Sons, 2^a ed., 1976.

KIRABIRA, J. B. *Characterization of Ugandan raw-minerals for firebricks - before and after sintering*. Licentiate thesis, Royal Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering Division of Mechanical Metallurgy, Stockholm, 2003.

MOHAMAD, G.; ROMAN, H. R.; SAGAVE, A. M. (2002a) *Estudo do comportamento triaxial de argamassas*; pp. 59–65. In: Proceedings of the VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries. Belo Horizonte, MG, 2002.

MOHAMAD, G.; ROMAN, H. R.; SAGAVE, A. M. (2002b) *Comportamento mecânico na ruptura de prismas e blocos de concreto*; pp. 119–124. In: Proceedings of the VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries. Belo Horizonte, MG, 2002.

OLIVEIRA, R. A.; GUIMARÃES, G. N. *Análise da resistência de Prismas de blocos de concreto fabricados no estado de Goiás submetidos à compressão simples*; pp. 77–86. In: Proceedings of the VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries. Belo Horizonte, MG, 2002.

PRUDÊNCIO JR., L. R.; OLIVEIRA, A. L.; BEDIN C. A. *Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto*. Florianópolis, 2002.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. *Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural*. Pini, São Paulo, 2003.

SOARES, S. R.; CASTILHOS JUNIOR, A. B.; MARTINS, A.; BREITENBACH, F. E.; PEREIRA, S. W.; BALDO, W. S. *Análise do ciclo de vida de produtos (revestimentos, blocos e telhas) do setor cerâmico da indústria de construção civil – Panorama do setor*. Santa Catarina, 2002.

STEVENSON, W. J.; *Estatística Aplicada à Administração*. Haper & Row do Brasil, São Paulo, 1981.

VOORT, G. F. V. *Metallography, principles and practice*. McGraw-Hill, Inc., New York, 1984.

ANEXOS

ANEXO A

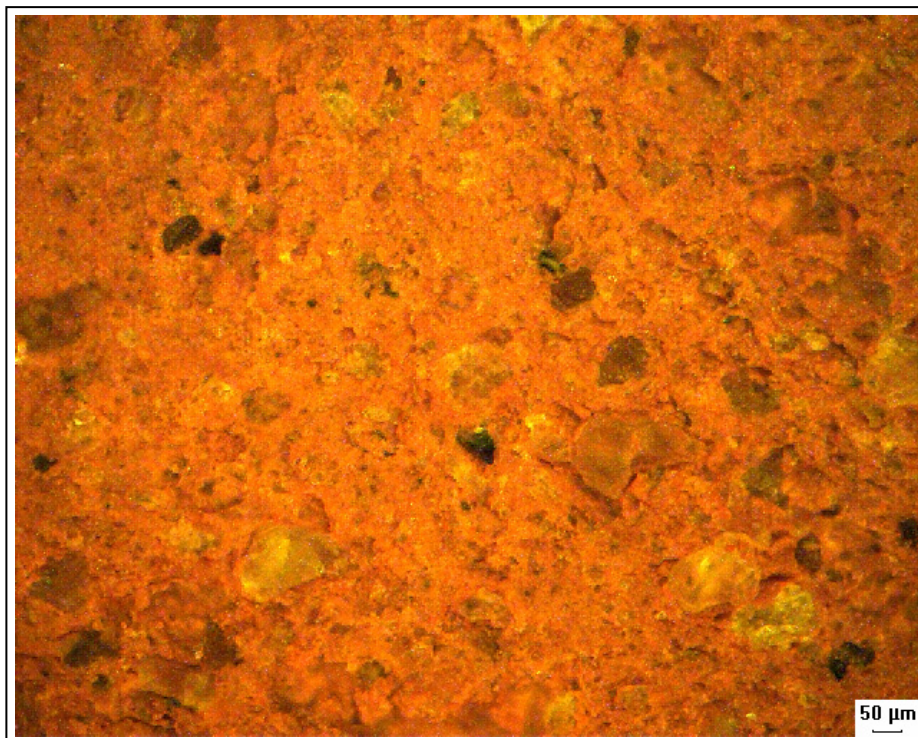


Figura A1 - Micrografia 1 do bloco 0, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

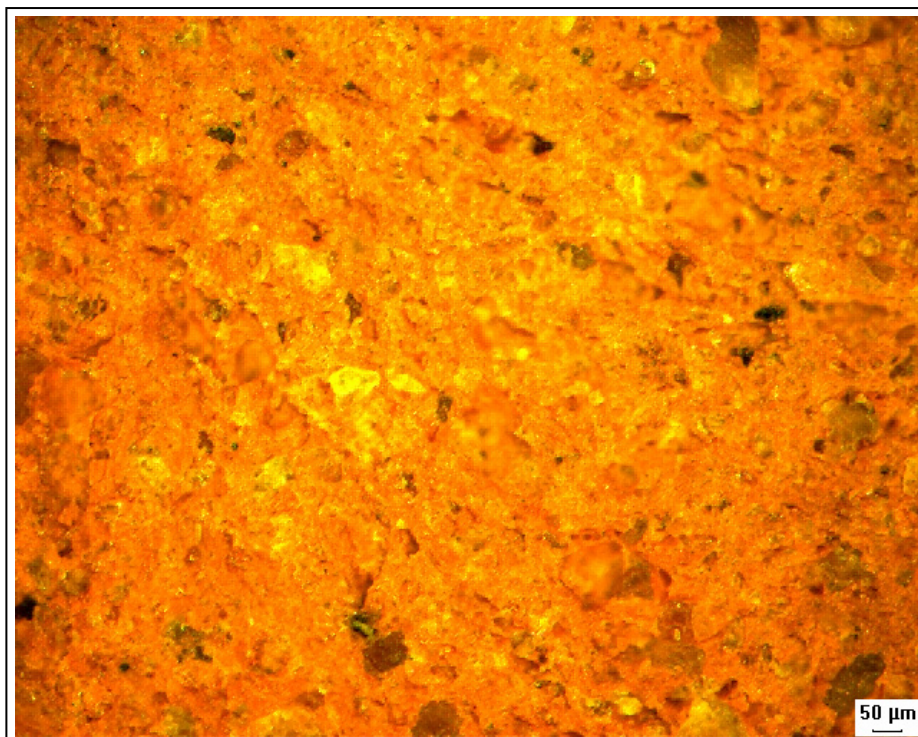


Figura A2 - Micrografia 2 do bloco 0, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

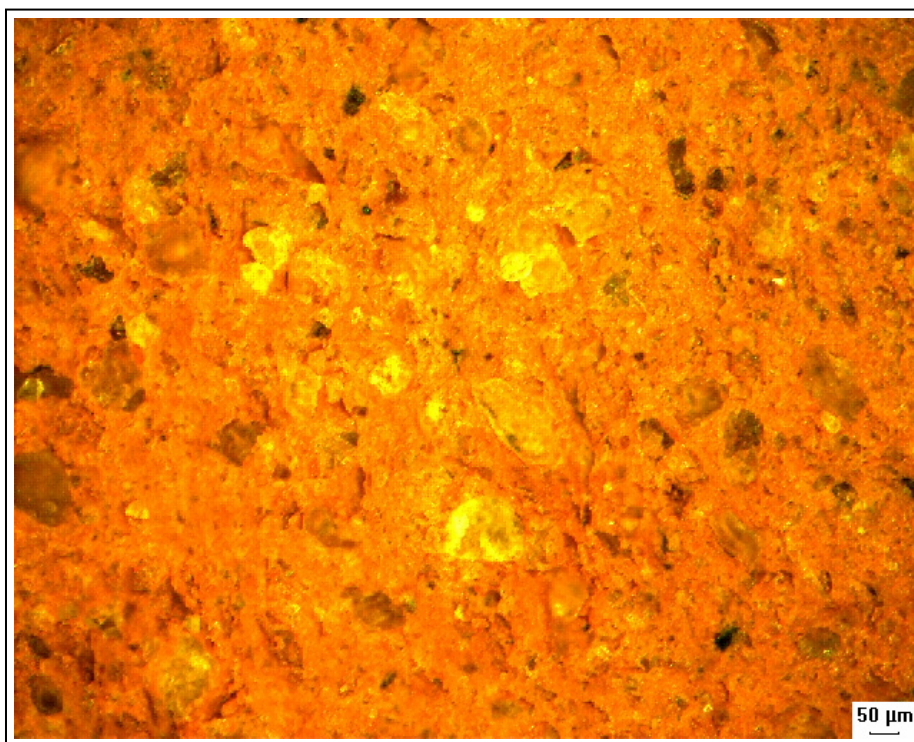


Figura A3 – Micrografia 3 do bloco 0, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

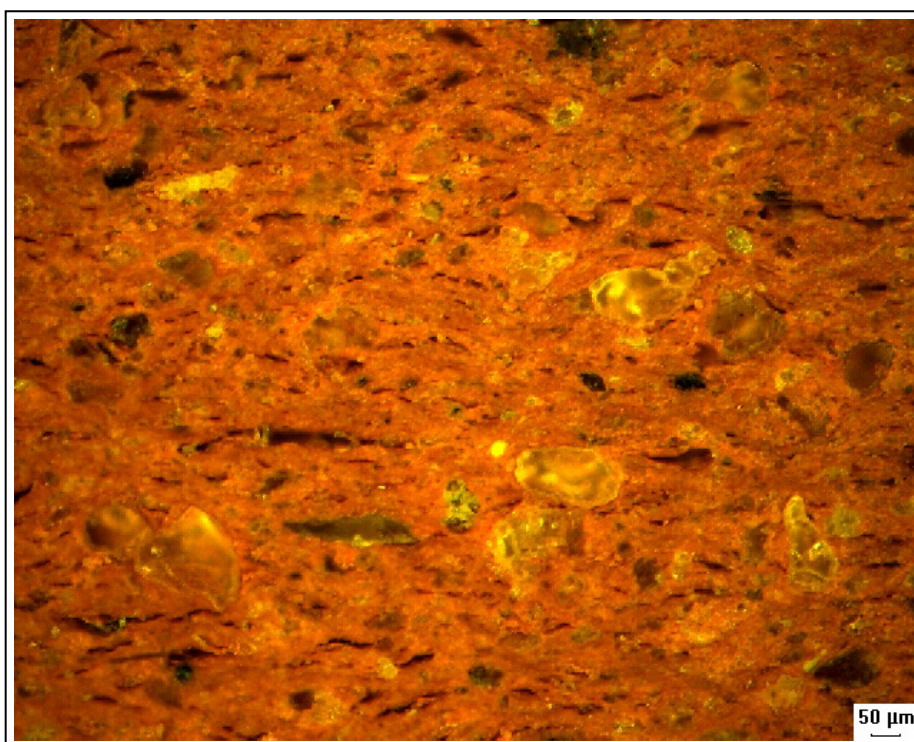


Figura A4 - Micrografia 1 do bloco 0, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

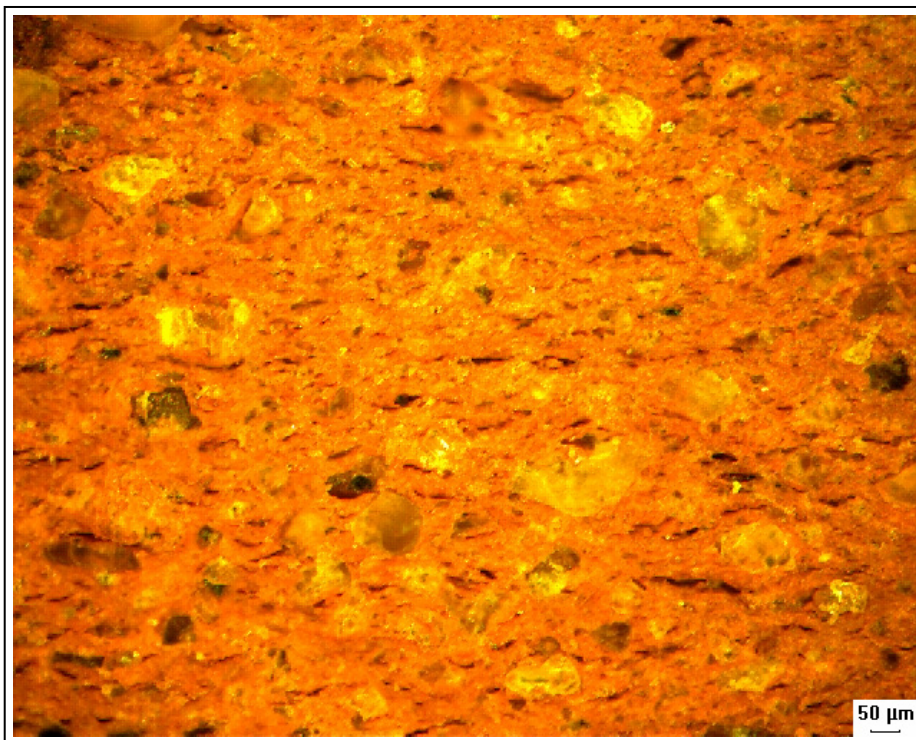


Figura A5 - Micrografia 2 do bloco 0, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

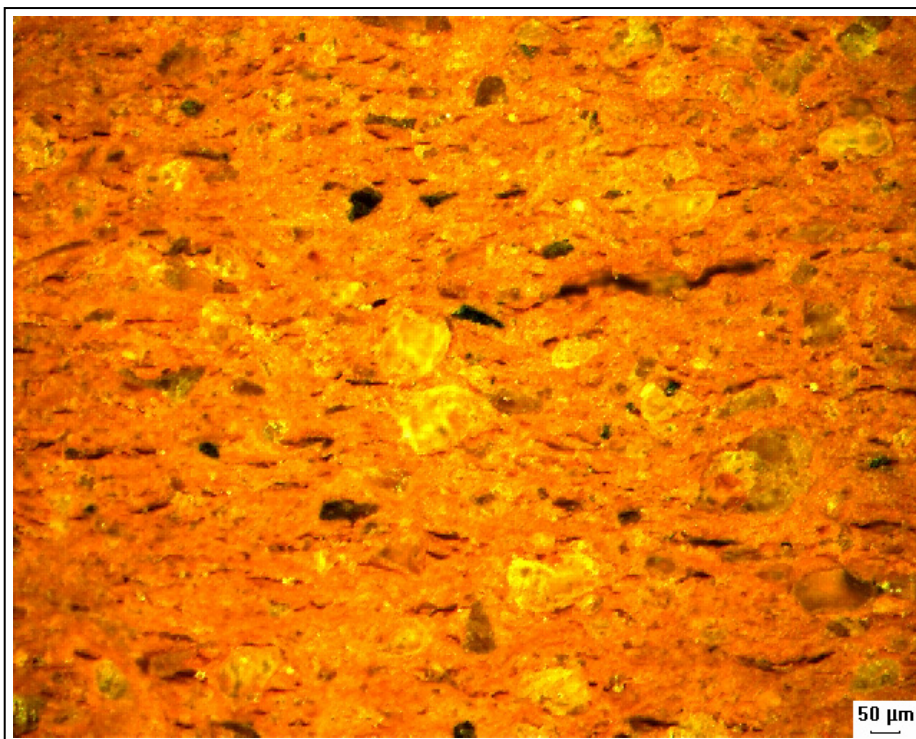


Figura A6 - Micrografia 3 do bloco 0, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

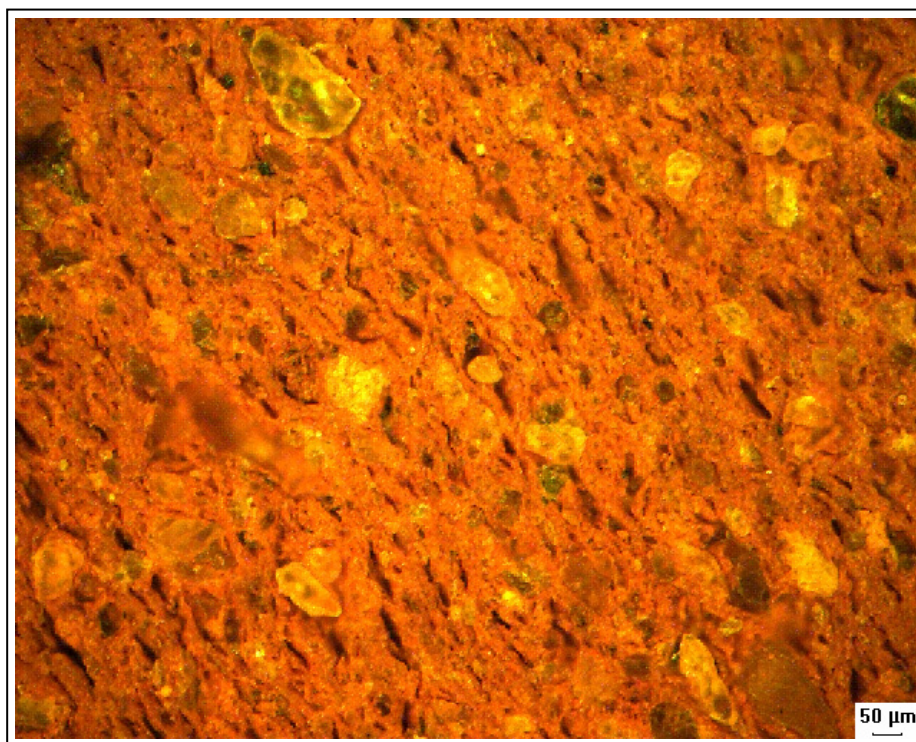


Figura A7 - Micrografia 1 do bloco 0, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

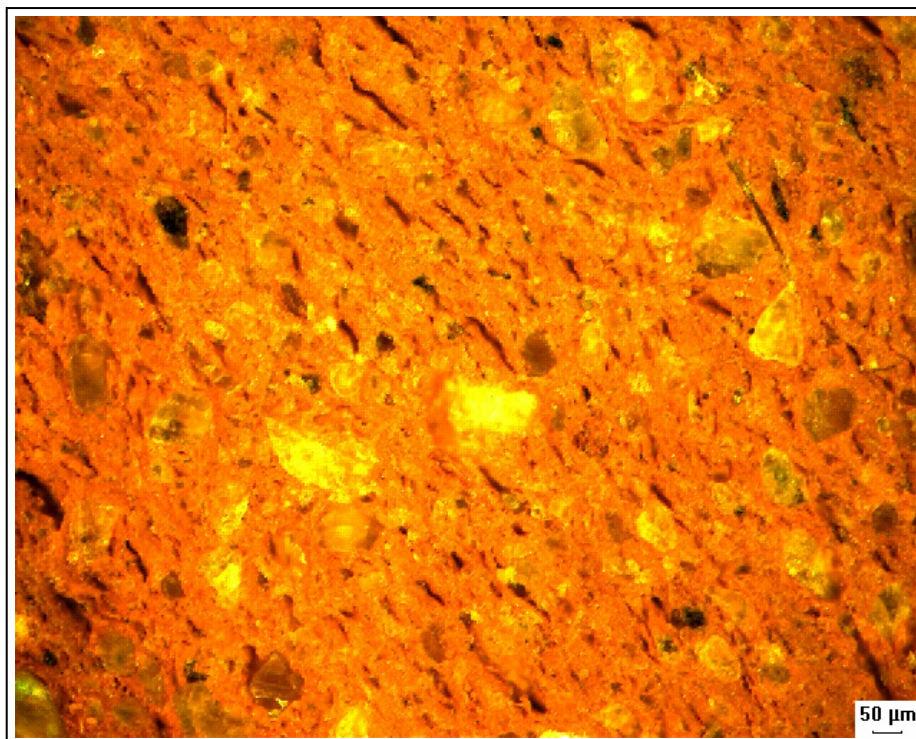


Figura A8 - Micrografia 2 do bloco 0, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

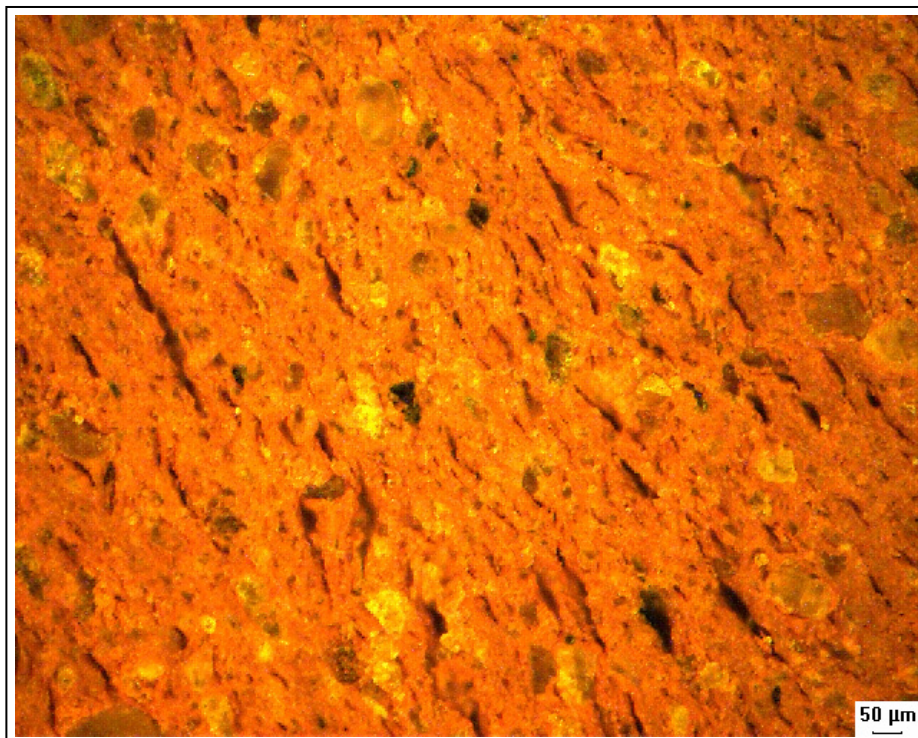


Figura A9 - Micrografia 3 do bloco 0, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

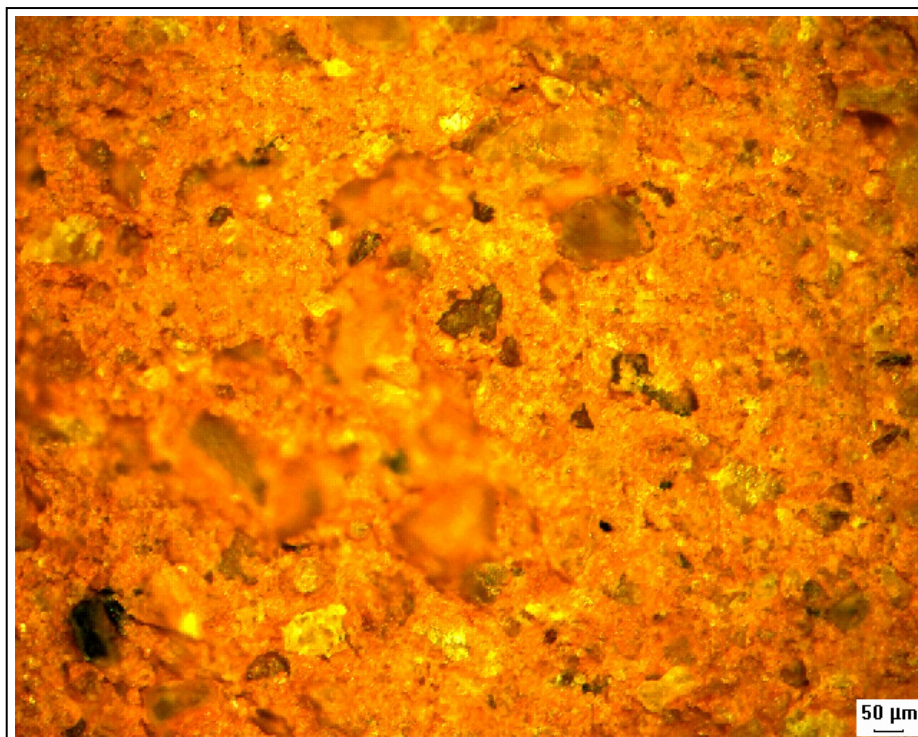


Figura A10 - Micrografia 1 do bloco 2, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

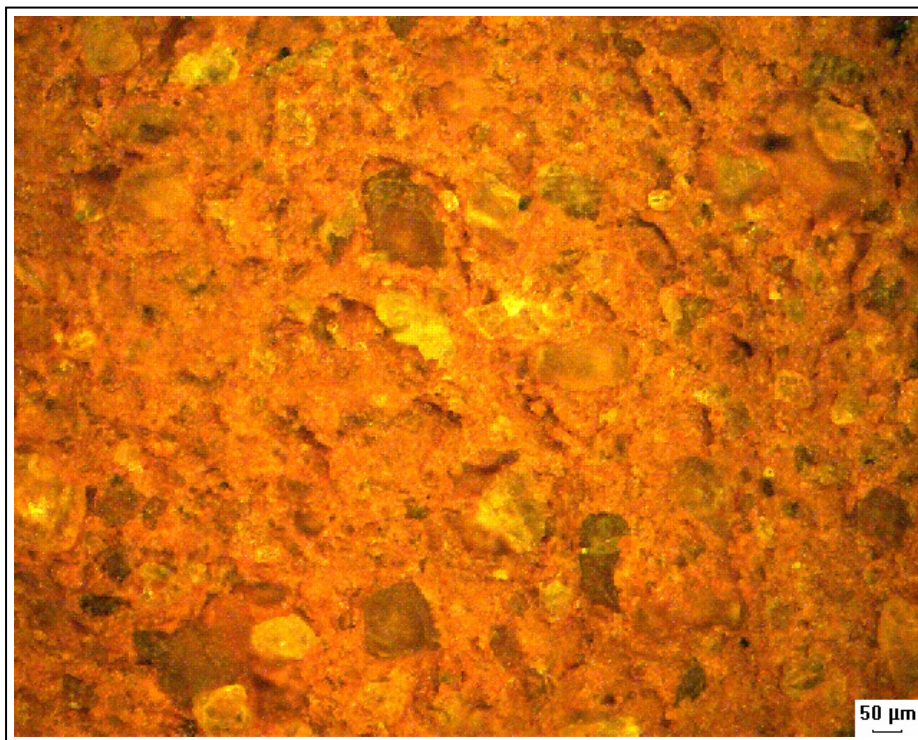


Figura A11 - Micrografia 2 do bloco 2, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

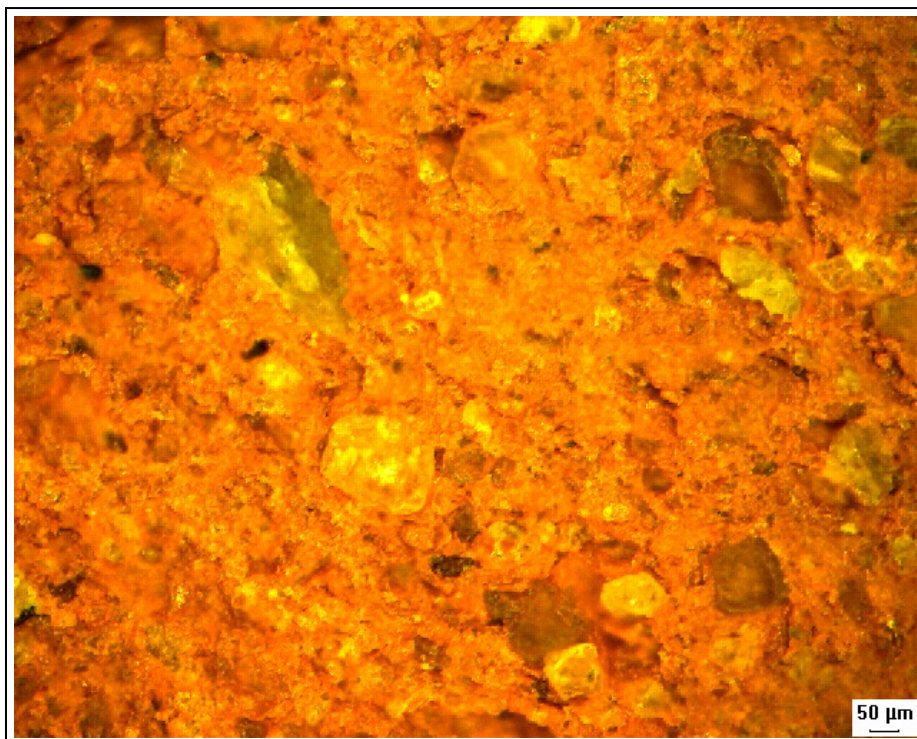


Figura A12 – Micrografia 3 do bloco 2, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

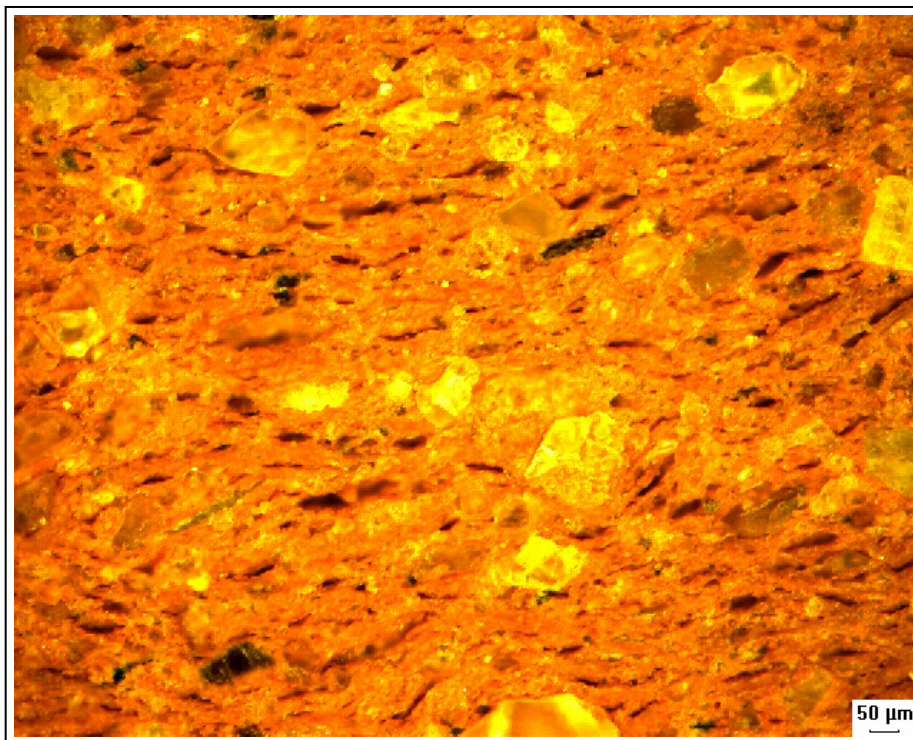


Figura A13 - Micrografia 1 do bloco 2, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

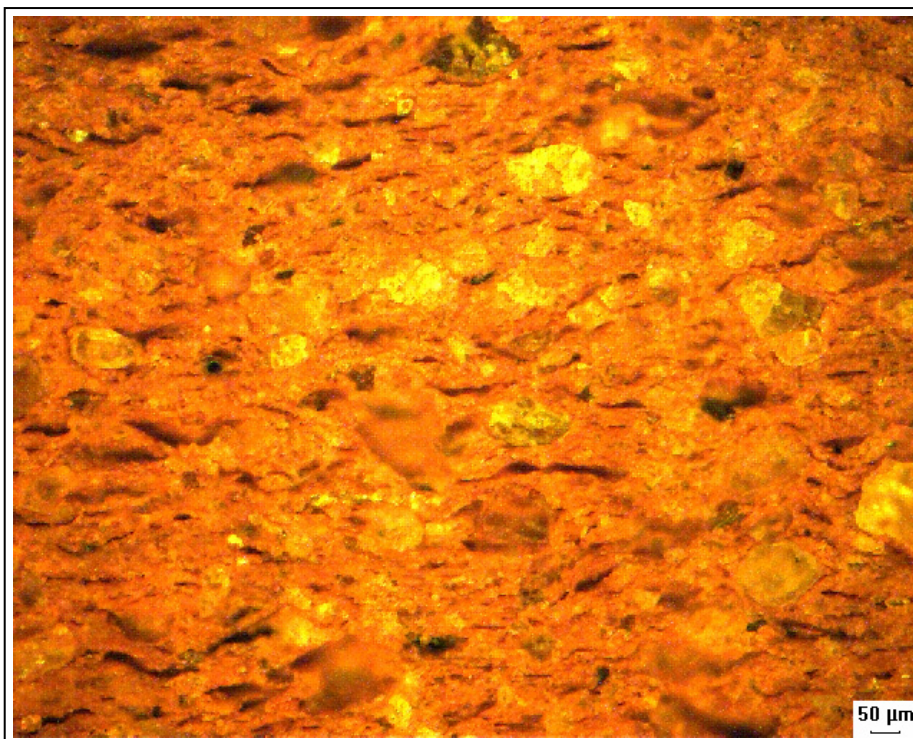


Figura A14 - Micrografia 2 do bloco 2, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

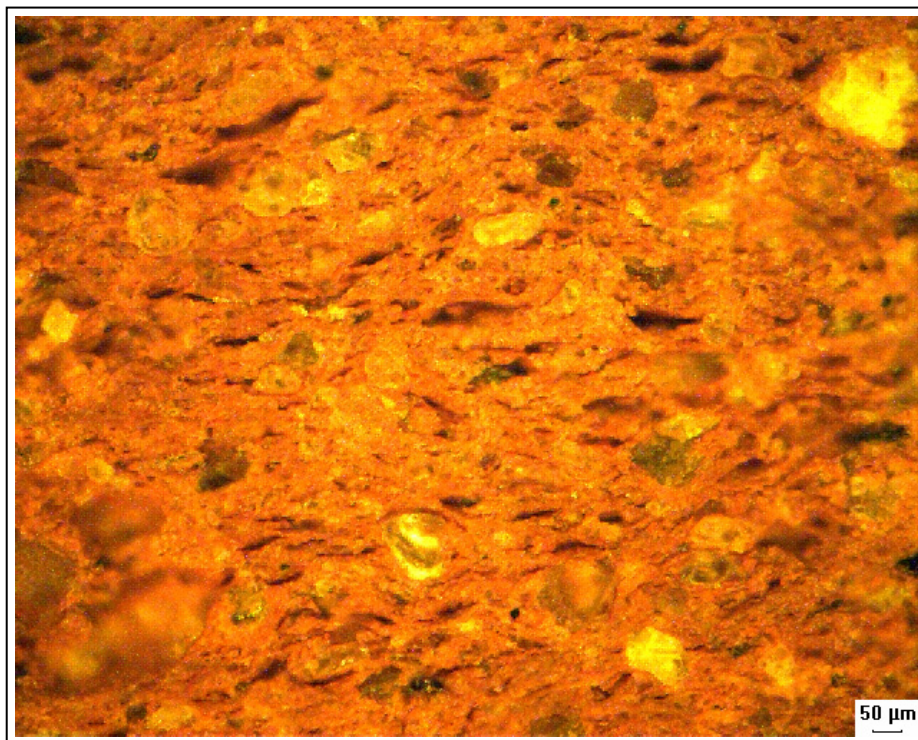


Figura A15 - Micrografia 3 do bloco 2, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

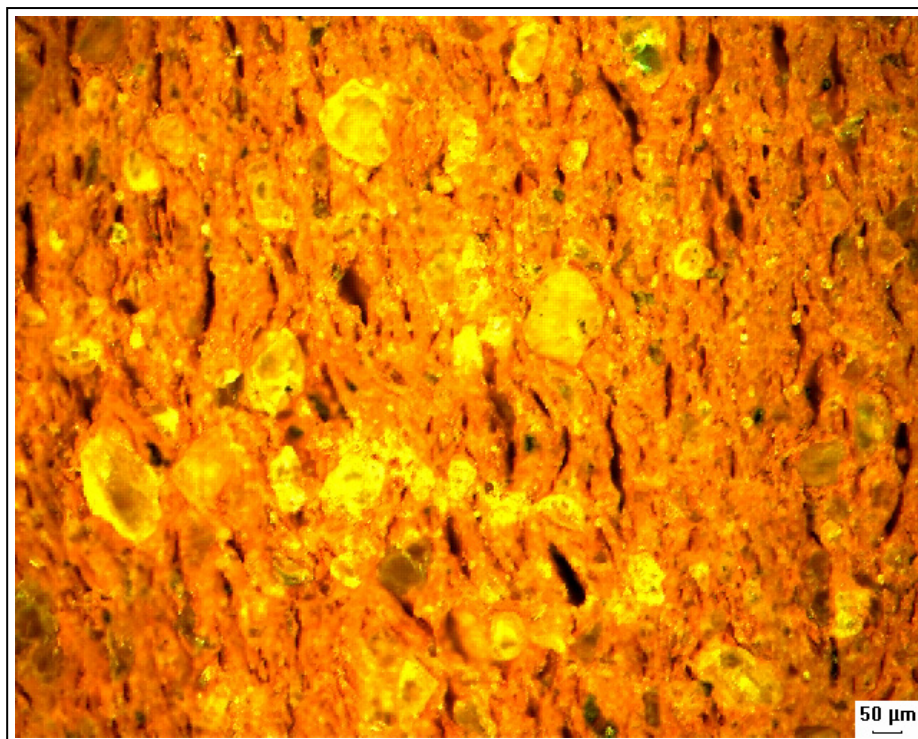


Figura A16 - Micrografia 1 do bloco 2, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

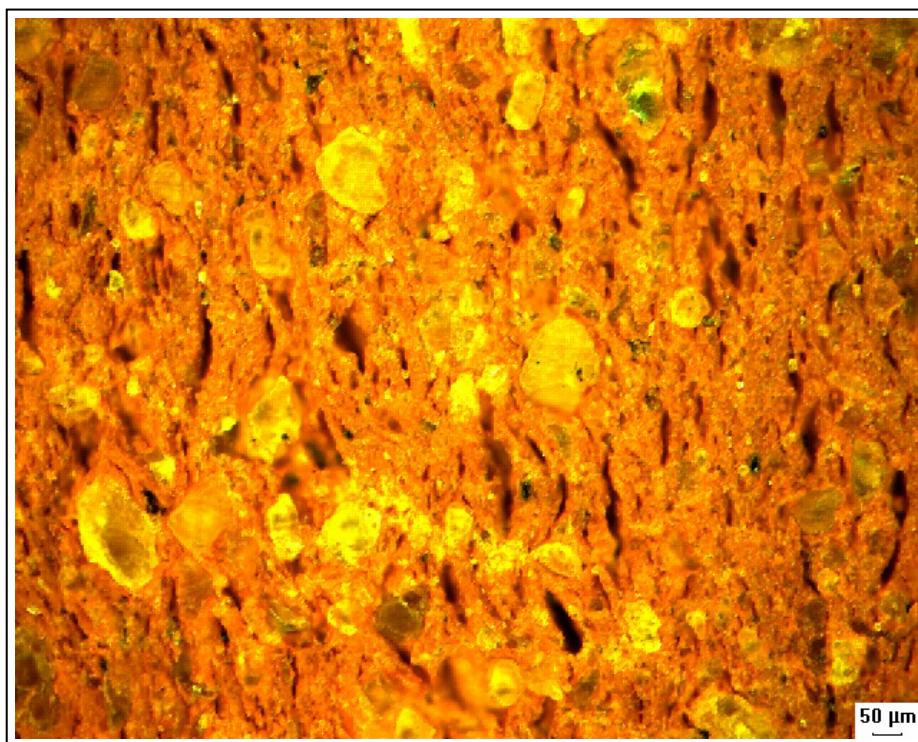


Figura A17 - Micrografia 2 do bloco 2, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

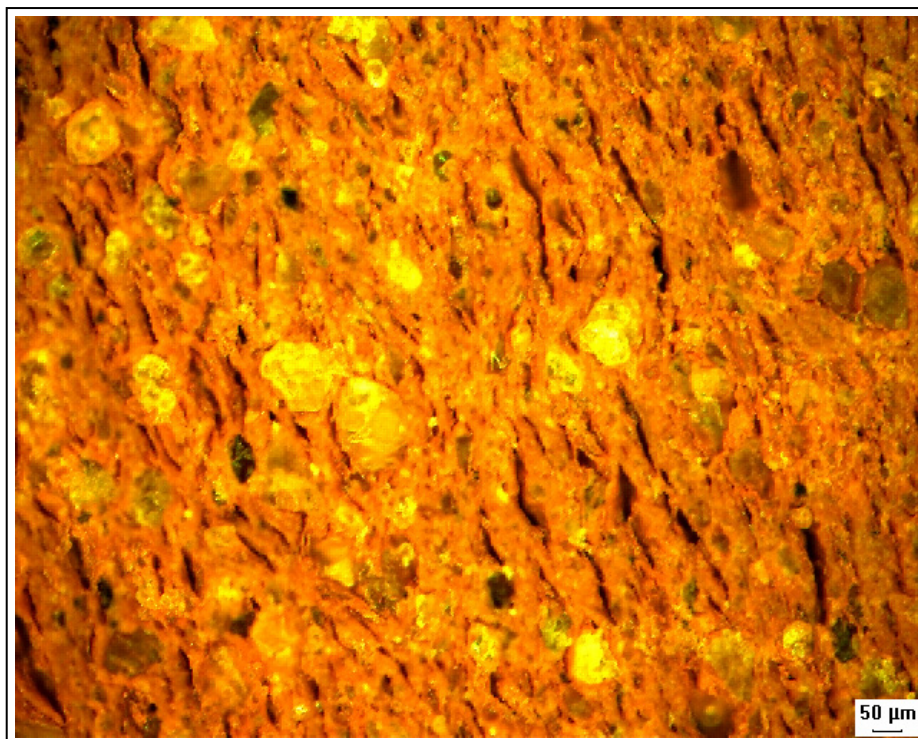


Figura A18 - Micrografia 3 do bloco 2, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

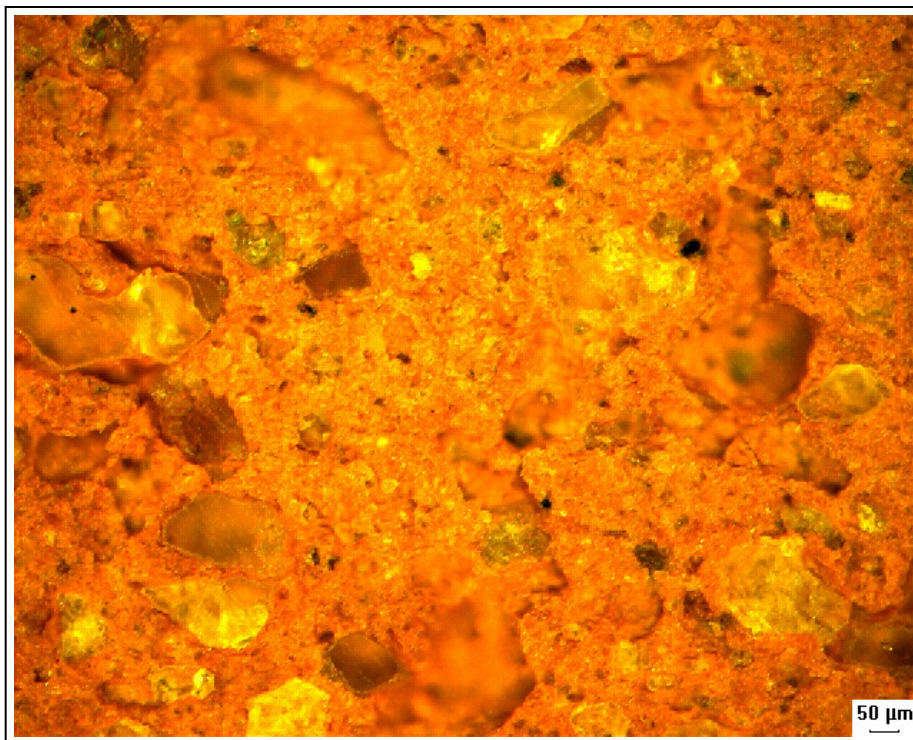


Figura A19 - Micrografia 1 do bloco 5, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

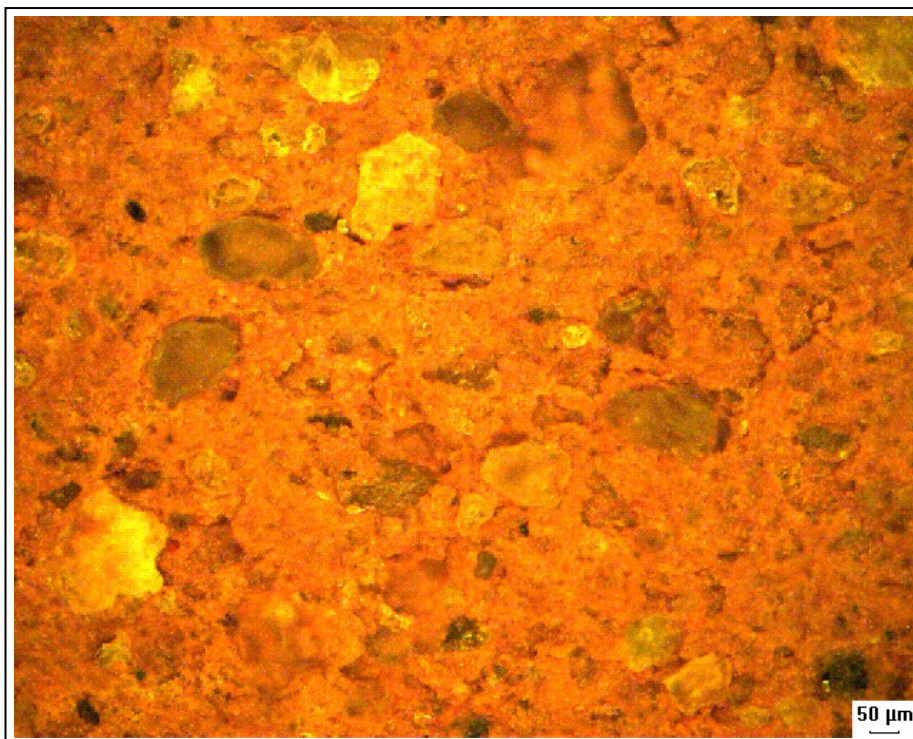


Figura A20 - Micrografia 2 do bloco 5, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

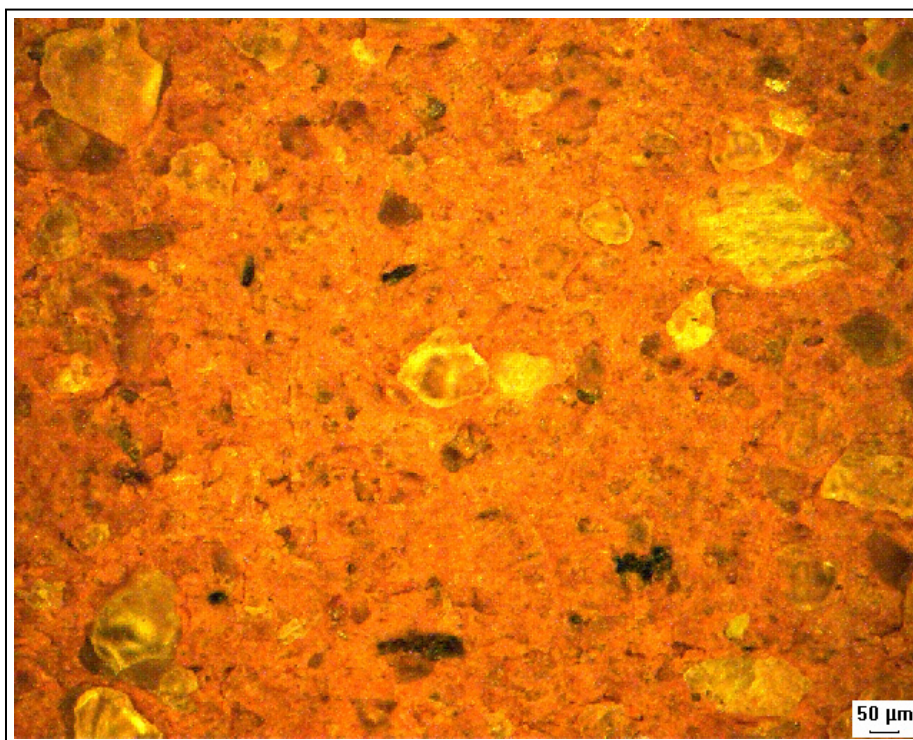


Figura A21 – Micrografia 3 do bloco 5, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

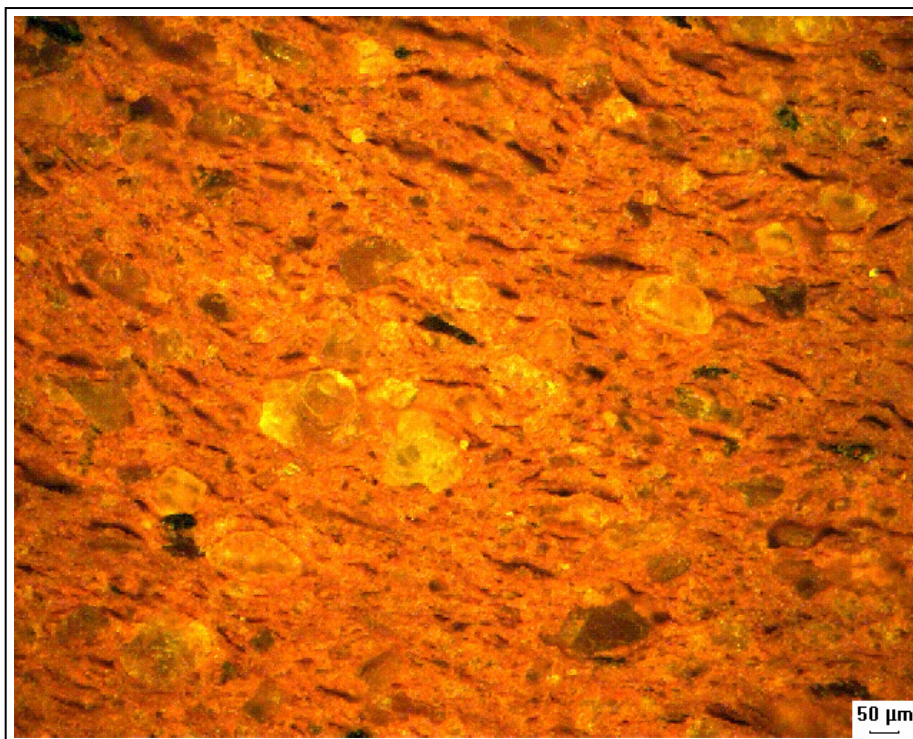


Figura A22 - Micrografia 1 do bloco 5, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

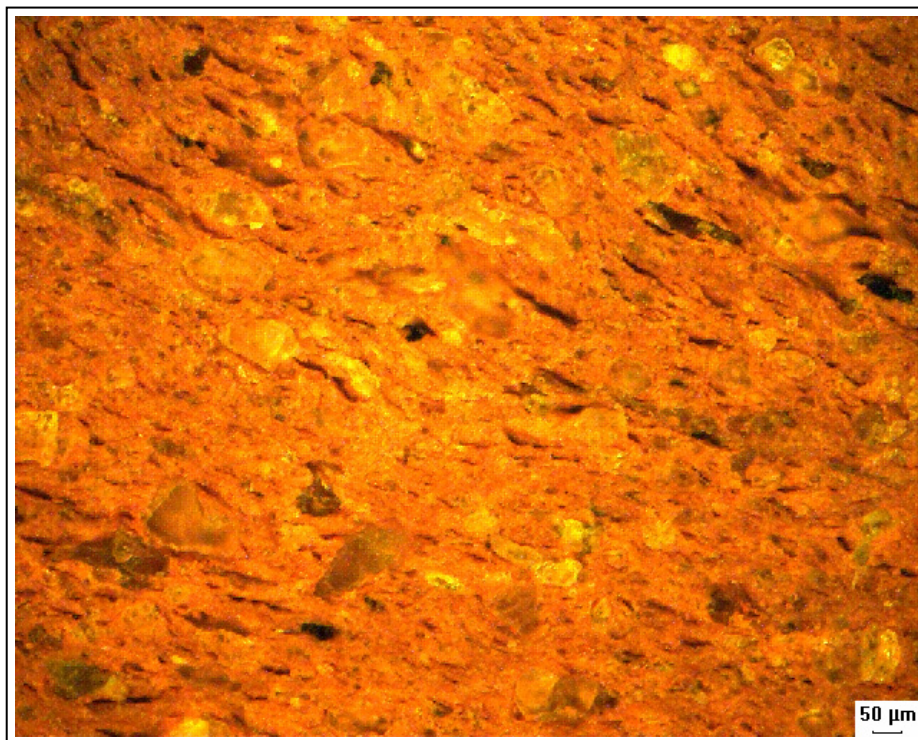


Figura A23 - Micrografia 2 do bloco 5, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

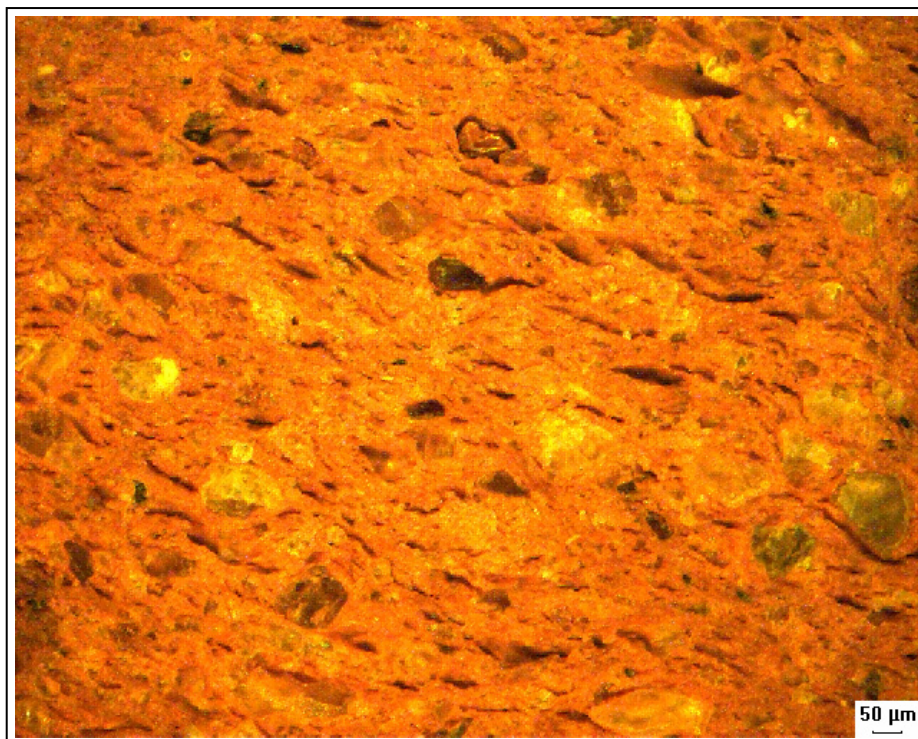


Figura A24 - Micrografia 3 do bloco 5, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

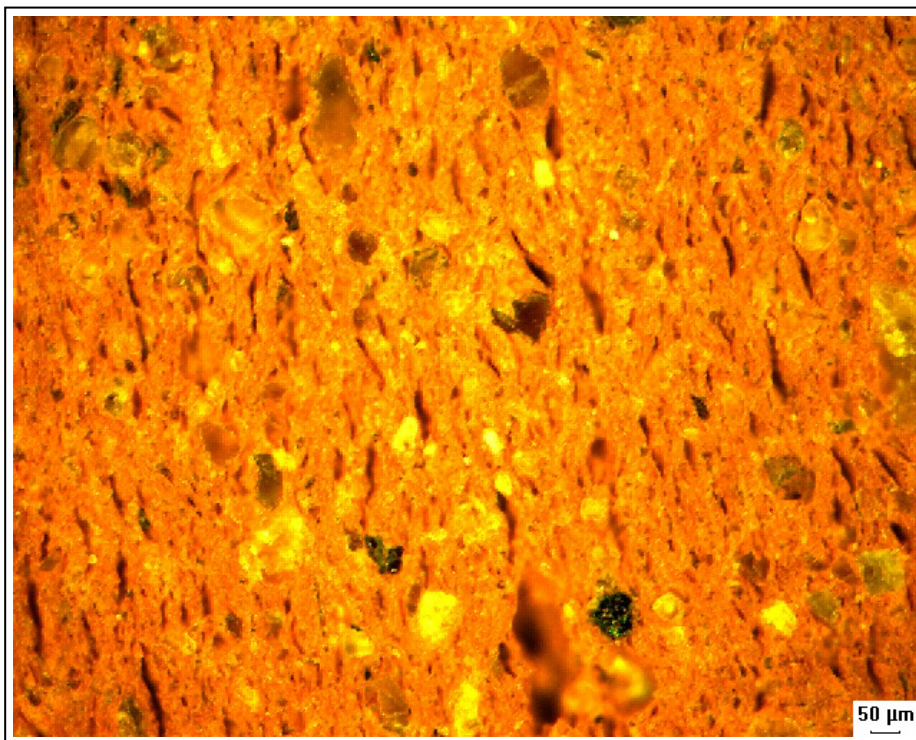


Figura A25 - Micrografia 1 do bloco 5, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

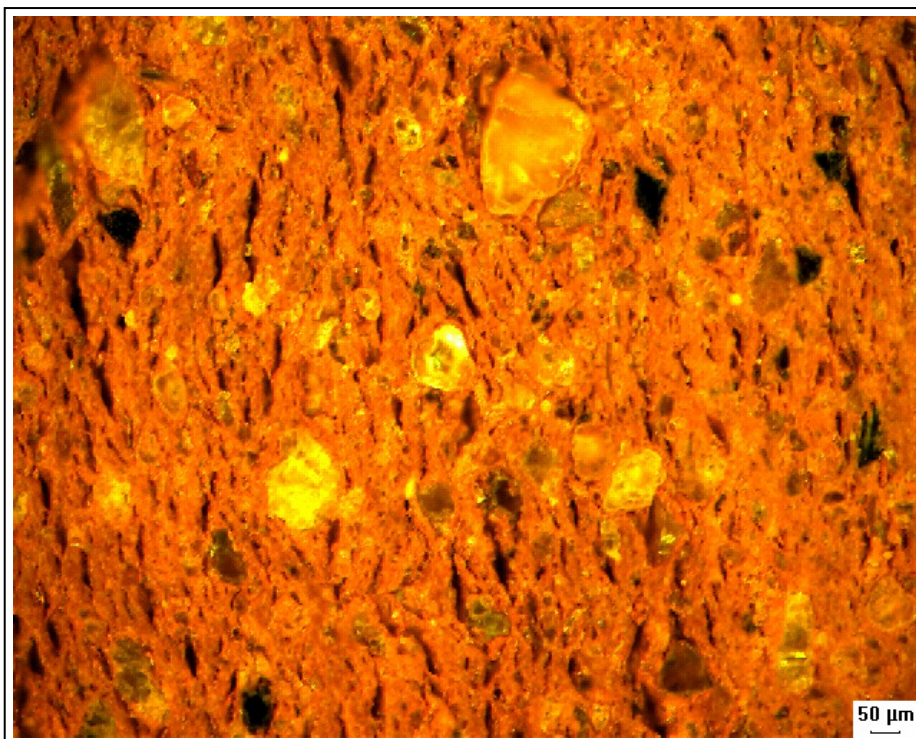


Figura A26 - Micrografia 2 do bloco 5, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

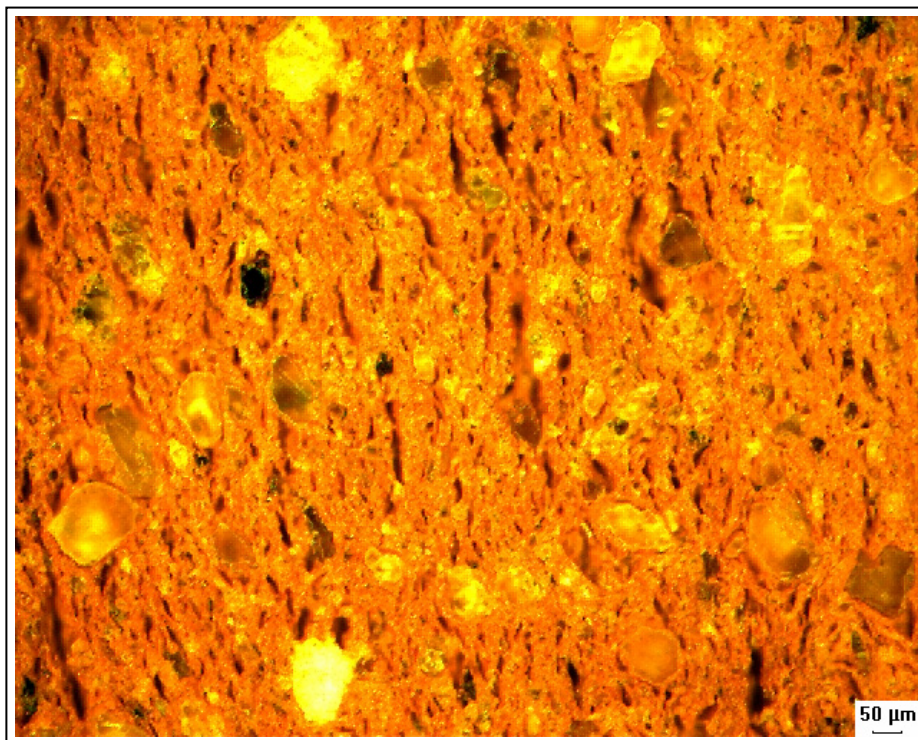


Figura A27 - Micrografia 3 do bloco 5, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

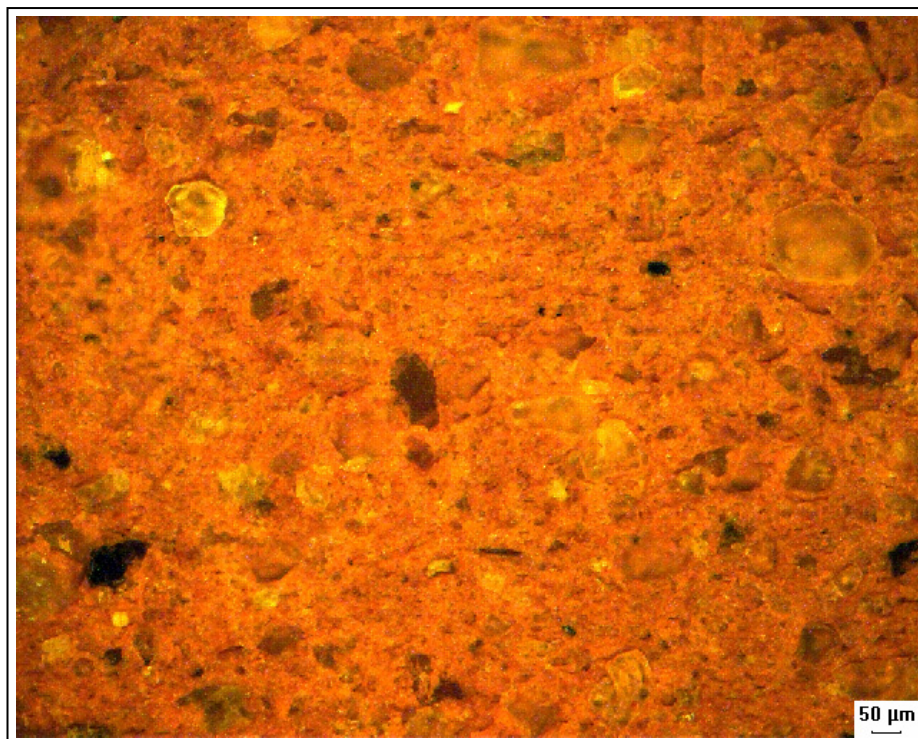


Figura A28 - Micrografia 2 do bloco 7, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.



Figura A29 – Micrografia 3 do bloco 7, corte AA, em campo escuro com um aumento de 100X.

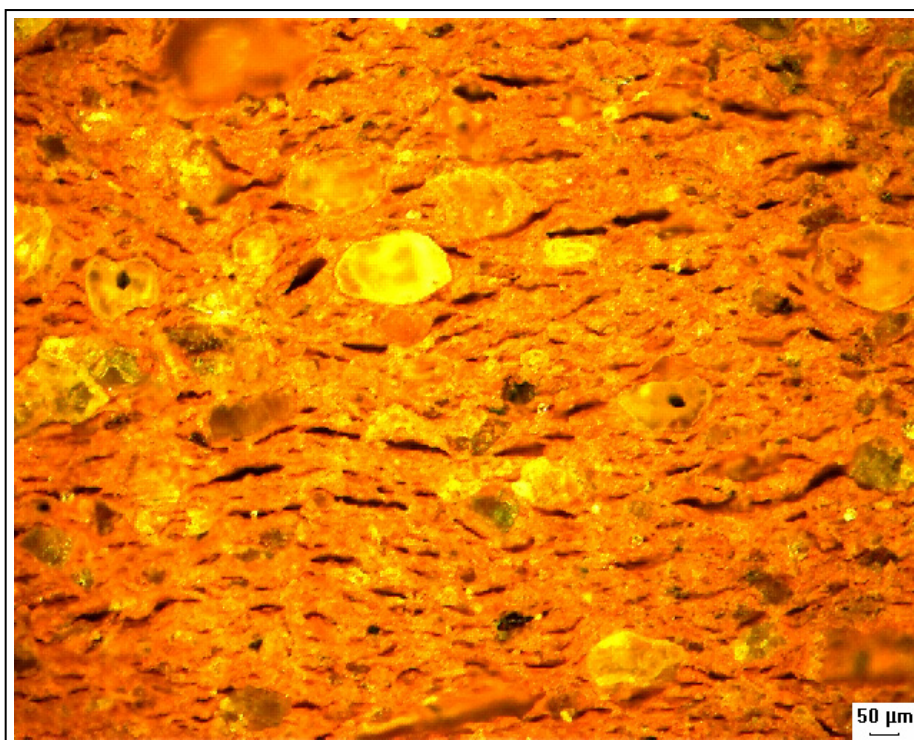


Figura A30 - Micrografia 1 do bloco 7, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

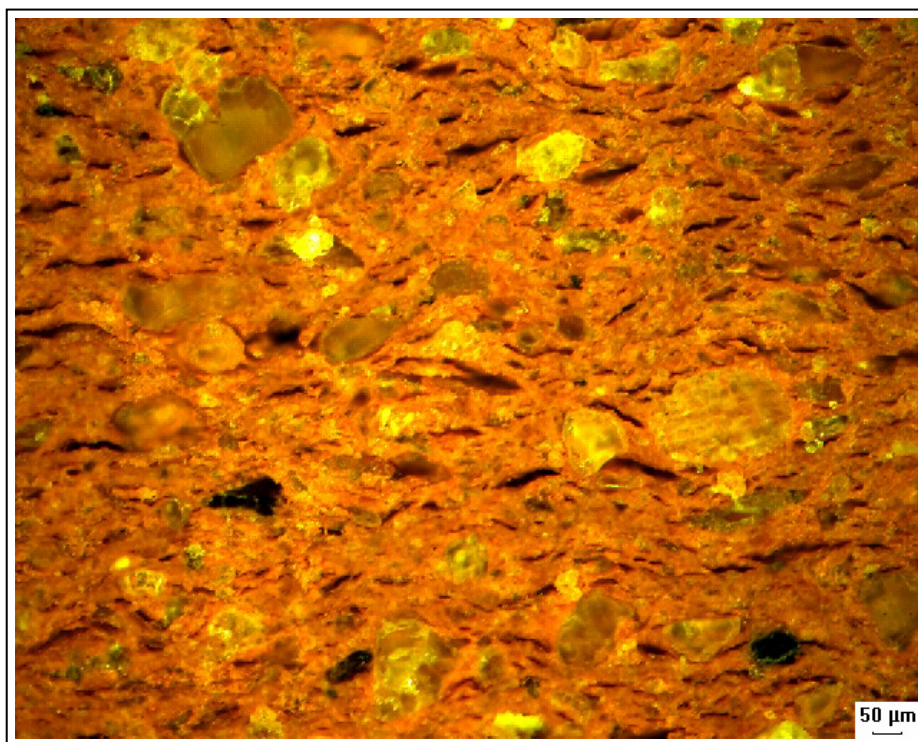


Figura A31 - Micrografia 3 do bloco 7, corte BB, em campo escuro com um aumento de 100X.

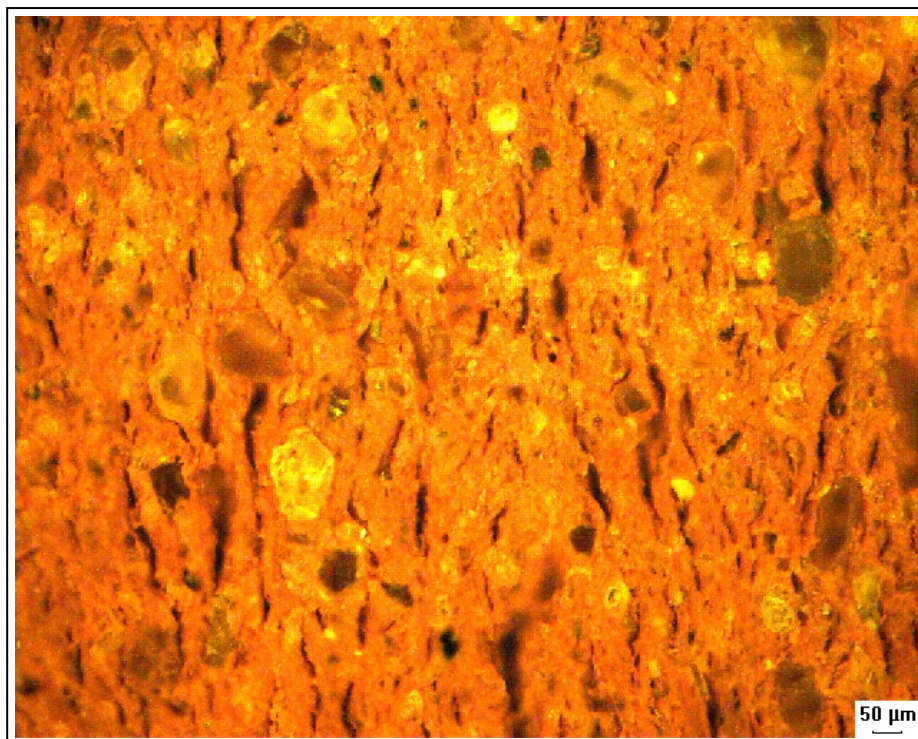


Figura A32 - Micrografia 1 do bloco 7, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

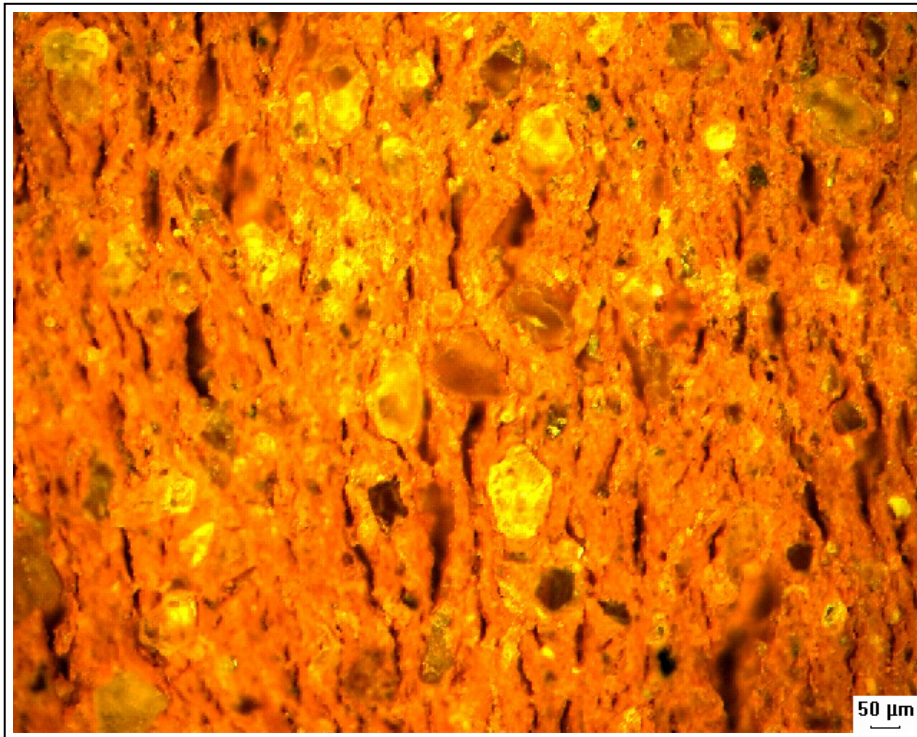


Figura A33 - Micrografia 3 do bloco 7, corte CC, em campo escuro com um aumento de 100X.

ANEXO B



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS
ALUNO: Engº Carlos Eduardo de França Villar
ORIENTADOR: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís Alberto de Melo Carvalho

LEVANTAMENTO DE SISTEMAS PRODUTIVOS DE BLOCOS CERÂMICOS ESTRUTURAIIS

PRODUTOR: JACERAMA JAGUARUANA CERÂMICA LTDA LOCAL: Filia/Fortaleza DATA: 9/3/2005

1) PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA:

A argila é estocada depois da extração (sazonamento ou apodrecimento)?

SIM
 NÃO Duração do sazonoamento: meses

Número de argilas utilizadas na preparação da massa de fabricação dos tijolos?

A argila é misturada a uma argila pré-queimada e moída ("grog") para a diminuição da retração na queima ?

SIM
 NÃO

Tipo de mistura utilizada para a homogeneização da massa ?

MECÂNICA
 MANUAL

2) CONFORMAÇÃO

Sistema utilizado para a extrusão ?

PISTÃO
 CILINDRO
 HÉLICE

É utilizado sistema de desaeração (vácuo) ?

SIM
 NÃO

3) TRATAMENTO TÉRMICO

Tipo de secagem empregada ?

NATURAL
 ESTUFA

Caso se utilize estufa, qual a fonte de calor utilizada ?

AR LIVRE
 CALOR DE RECUPERAÇÃO DOS FORNOS
 FORNALHA

PERÍODO DE DURAÇÃO DA SECAGEM ?

DIAS

Tipo de forno utilizado na queima?

<input type="checkbox"/> De Meda	<input type="checkbox"/> De Cuba
<input checked="" type="checkbox"/> Intermitente comum	<input checked="" type="checkbox"/> Semicontínuo
<input type="checkbox"/> Intermitente de chama invertida	<input checked="" type="checkbox"/> Hoffmann
<input type="checkbox"/> De Mufia	<input type="checkbox"/> De Túnel
<input type="checkbox"/> Combinado	<input type="checkbox"/> outro - especifique: <input type="text"/>

Combustível utilizado na queima?

Temperatura da queima?

°C (GRAUS CELSIUS)

Tempo da queima?

HORAS

Como é feita a medida e o controle da temperatura de queima.