



Kraftterra



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Programa de Pesquisa e Pós-Graduação

Curso de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo



Linha de pesquisa: Tecnologia da Construção



Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosa Maria Sposto

Co-orientador: Prof. Dr. Humberto Salazar Amorim Varum

Kraftterra

Desenvolvimento e análise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento para vedação vertical

Tese apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Márcio Albuquerque Buson

Brasília, 11 de novembro de 2009

Buson, Márcio Albuquerque.

KRAFTTERRA: Desenvolvimento e análise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento para vedação vertical.

Márcio Albuquerque Buson. – Brasília: PPG/FAU/UnB, 2009. ~135 p.: 64 il.

Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2009.

Orientador: Rosa Maria Sposto

Co-orientador: Humberto Salazar Amorim Varum

Bibliografia: p. 106 – 113.

1. Arquitetura de Terra. 2. BTC. 3. Kraftterra. 4. Reciclagem. 5. Sacos de cimento. 6. Papel Kraft.

I. Sposto, Rosa Maria, orient. II. Varum, Humberto, co-orient.

III. Título.

CDU.

TERMO DE APROVAÇÃO

Márcio Albuquerque Buson

**KRAFTTERRA: DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE PRELIMINAR DO
DESEMPENHO TÉCNICO DE COMPONENTES DE TERRA COM A
INCORPORAÇÃO DE FIBRAS DE PAPEL KRAFT PROVENIENTES DA
RECICLAGEM DE SACOS DE CIMENTO PARA VEDAÇÃO VERTICAL**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pesquisa e Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília.

Banca de Defesa de Tese

Prof^a. Rosa Maria Sposto – EnC/UnB
(presidente)

Prof. João Fernando Dias – FECIV/UFU
(membro externo a UnB)

Prof. Antonio Alberto Nepomuceno – EnC/UnB
(membro externo)

Prof^a. Raquel Naves Blumenschein – FAU/UnB
(membro interno)

Prof^a. Cláudia Naves David Amorim – FAU/UnB
(membro interno)

Brasília, 11 de novembro de 2009

Aos meus filhos Lucas, Tiago e Letícia, por nunca terem deixado eu me esquecer que a minha presença constante e ativa na vida deles e a deles na minha seria essencial em todas as etapas deste trabalho

À Lúcia, minha eterna namorada e mãe de meus filhos, pelo apoio e ajuda constantes e por ter cuidado tão bem da nossa família durante o estágio de doutorado em Aveiro

Aos preciosos amigos Humberto e Celeste, suas filhas Catarina e Raquel, seus pais, irmãos e amigos que nos acolheram de forma tão maravilhosa em Portugal

Agradecimentos

- À Universidade de Brasília e à Universidade de Aveiro por possibilitarem esta oportunidade de aperfeiçoamento acadêmico, profissional, social, cultural, familiar, pessoal e espiritual
- À Rosa, amiga e orientadora, pela paciência e enorme confiança no meu trabalho
- Ao Humberto, amigo e co-orientador, por acreditar na pesquisa, pelo convite, pelos bons conselhos, por compartilhar suas experiências e pelo exemplo de vida
- Ao Prof. João Fernando Dias, pelas preciosas contribuições durante a defesa da tese, as quais proporcionaram a este trabalho enorme ganho de qualidade
- Aos amigos do Laboratório de Geotecnia da UnB, Prof^a. Izabel Cristina, Alessandro, Vanilson e Ricardo, pela constante atenção, ajuda e suporte técnico
- À Prof^a. Thérèse Hoffman e sua equipe do Laboratório de Materiais Expressivos da UnB, por ensinarem de forma prazerosa o processo de reciclagem de papel
- Aos colegas do Laboratório de Processos de Fabricação da UnB, Artur Rocha e Tenniel Queiroz, pela ajuda e trabalho com o protótipo do triturador de papéis
- Aos Prof. Nuno Lopes e Prof. Paulo Vila Real, pela disponibilidade, apoio, orientações e suporte técnico para a realização do ensaio de resistência ao fogo no Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo - LERF
- Ao Raul Barros, amigo e técnico profissional do Laboratório do DECivil/UA, pela constante disponibilidade, atenção e pela experiência de vida invejável
- Ao Hugo Rodrigues, amigo "faz-tudo" e doutorando do DECivil/UA, pelo incrível vasto conhecimento das coisas e pela alegre e constante disposição em ajudar
- Às colegas Eng. Elsa Neto e Eng. Maria Carlos Figueiredo, do Laboratório do DECivil/UA, pelo sempre eficiente trabalho, conselhos e ajuda
- Ao Eng. António Festas, do Departamento de Engenharia Mecânica da UA, pela pronta ajuda e preciosa eficiência técnica na fabricação de ligações que possibilitaram a realização dos ensaios com as pequenas paredes
- Ao Grupo PORTUCEL SOPORCEL, Fábrica de Pasta de Cacia, pela ajuda, apoio técnico e disponibilização de equipamentos para a reciclagem dos sacos de cimento
- Aos pesquisadores e amigos Eng. António Paulo Mendes Sousa e Eng. José Carlos Teixeira, do Instituto RAIZ de Investigação Florestal da PORTUCEL, pela enorme ajuda, apoio técnico e orientações para a reciclagem dos sacos de cimento
- Às empresas SMAS, CIVILRIA e Construtora Bairrada pelos milhares de sacos de cimentos coletados e entregues na UA para continuidade dos trabalhos
- À Firma Juliões e ao Rui pela grata e carinhosa ajuda na escolha correta e disponibilização do solo para o desenvolvimento da pesquisa em Aveiro
- Ao Luis Rodrigues, mestrando DECivil/UA, esforçado amigo cuja ajuda na execução da parede possibilitou a realização em tempo do ensaio de resistência ao fogo
- Ao Lucas, meu filho e grande companheiro, pela preciosa e divertida ajuda na leitura e registro das medições dos ensaios com as pequenas paredes

Dedicatória _____	I
Agradecimentos _____	ii
Índice _____	iii
Lista de Figuras _____	v
Lista de Anexos _____	viii
Lista de Tabelas _____	ix
Resumo/ Abstract _____	x
1. Elementos para compreensão do trabalho	1
1.1 Introdução _____	1
1.2 Hipótese _____	7
1.3 Objetivos _____	7
1.4 Estrutura da tese _____	8
2. Aproveitamento de resíduos e materiais com fibras	10
2.1 Aproveitamento dos resíduos sólidos _____	10
2.2 Materiais reforçados com fibras _____	13
3. Blocos de terra compactada - BTCs	19
3.1 Produção de BTCs _____	19
3.2 Solos para BTCs _____	26
4. Materiais e métodos	30
4.1 Reciclagem dos sacos de cimento _____	30
4.2 Escolha e caracterização dos solos _____	36
4.3 Processo de preparo e mistura do Kraftterra _____	40
4.4 Proporções e traços _____	44
4.5 Absorção de água - CPs _____	44
4.6 Resistência à compressão simples - CPs _____	45
4.7 Processo de produção dos BTCs _____	47
4.8 Resistência à compressão simples - BTCs _____	49
4.9 Envelhecimento acelerado - BTCs _____	51
4.10 Absorção de água por imersão - BTCs _____	53
4.11 Processo de produção de elementos de vedação _____	54
4.12 Resistência à compressão simples - paredes _____	57
4.13 Resistência à compressão diagonal - paredes _____	60
4.14 Resistência ao fogo - paredes _____	62
5. Apresentação e análise de resultados	66
5.1 Caracterização dos solos _____	66
5.2 Retração linear - CPs _____	66
5.3 Absorção de água - CPs _____	68

5.4	Resistência à compressão simples – CPs _____	69
5.5	Resistência à compressão simples - BTCs _____	79
5.6	Envelhecimento acelerado - BTCs _____	81
5.7	Absorção de água por imersão - BTCs _____	83
5.8	Resistência à compressão simples - paredes _____	85
5.9	Resistência à compressão diagonal - paredes _____	89
5.10	Resistência ao fogo paredes _____	93
6.	Conclusões principais	101
7.	Estudos futuros e recomendações	104
	Referências Bibliográficas	106
	Anexos	114

Lista de Figuras

Fig. 1	Prensa CINVA-RAM (fonte: Barbosa et al. 2002).	19
Fig. 2	Misturador para solos com pás que evitam a formação de grumos.	25
Fig. 3	Tipos variados de BTCs. Fonte: Buson (2007).	26
Fig. 4	Trituração do papel em liquidificador industrial (esq.); Kraft fragmentado de milho e polpa de celulose ao final do processo (dir.).	31
Fig. 5	Misturador com dreno no copo (esq.); Liquidificador com copo reclinável para retirada do material (dir.).	31
Fig. 6	Presença de pedriscos de cimento endurecido entre as fibras dispersas após processo de reciclagem onde os restos de cimento não foram retirados previamente dos sacos.	32
Fig. 7	Misturador de papel da RAIZ / Vista do interior do tanque / Detalhe da hélice com sentido de rotação.	33
Fig. 8	Protótipo de agitador desenvolvido na pesquisa (esq. e centro); Exemplos de agitadores disponíveis no mercado brasileiro que podem ser acoplados a tonéis industriais metálicos de 220 litros (dir.).	33
Fig. 9	Polpa de celulose no liquidificador industrial; Bobina geotextil; Colocação da polpa na bobina geotextil; Retirada do excesso de água com a torção manual da bobina; Polpa sem o excesso de água.	34
Fig. 10	Recipiente com peneira metálica e dreno com válvula (esquerda); Saco de lona crua com polpa ainda com excesso de água sendo colocado na centrífuga (centro); Centrífuga de eixo vertical (direita)	34
Fig. 11	Lavadora e secadora de roupas movida à bicicleta. Projeto "Cyclean" desenvolvido por Alex Gladsden.	35
Fig. 12	Polpa de celulose sem o excesso de água; Dispersão das fibras na argamassadeira; Fibras dispersas.	35
Fig. 13	Triturador de folhas e galhos utilizado no DECivil/UA (esq.) e detalhes (centro); Triturador utilizado na UnB (dir.).	36
Fig. 14	Mapa Geológico Simplificado da Região do Distrito Federal com indicação do local da amostragem.	37
Fig. 15	Ensaio da Caixa (fonte: Boletim Técnico da ABCP, BT-110).	37
Fig. 16	Kraftterra sendo misturado em argamassadeira (esq.); Detalhe do início do processo de mistura do Kraftterra (centro); Betoneira portátil (capacidade 80 litros) para misturar o Kraftterra para uma pequena escala de produção de BTCs (dir.).	41
Fig. 17	Formação de grumos em mistura de Kraftterra em uma betoneira.	41
Fig. 18	BTCs produzidos com mistura de Kraftterra que apresentava grumos.	42
Fig. 19	Gráficos com as variações da resistência à compressão simples e respectivas umidades das misturas de corpos-de-prova cilíndricos de Solo-cimento (esquerda) e de Kraftterra (direita) produzidos com mesmo solo mesma proporção de cimento. Umidade ótima da composição de solo-cimento de 20,8% e da composição de Kraftterra de 27,0%.	46
Fig. 20	Prensa TERSTARAM para produção de BTCs. Detalhe do sistema de ajuste de altura do molde (dir.).	47
Fig. 21	Compactação de BTCs em prensa manual TERSTARAM, no laboratório do DECivil/UA.	48

Fig. 22	Área de produção dos BTCs no subsolo do Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.	49
Fig. 23	Regularização das faces de corpos-de-prova de BTCs.	50
Fig. 24	Estufa e tanque utilizados nos ensaios de envelhecimento acelerado.	52
Fig. 25	Retirada da seiva de folhas de babosa / Aloe vera.	54
Fig. 26	Execução de prisma com BTCs e argamassa de assentamento de Kraftterra feito com as mãos, sem o uso de colher de pedreiro. Detalhe da imersão dos BTCs em água (esq.).	55
Fig. 27	Execução de chapisco e reboco de solo-cimento em parede para ensaio de resistência ao fogo.	56
Fig. 28	Fissuras em faixa de reboco ressaltadas durante ensaio de resistência ao fogo pela evaporação da água presente no interior da parede e posterior condensação na face externa.	57
Fig. 29	Sistema de fixação e apoio de extensômetros em prismas para ensaios de compressão simples.	58
Fig. 30	Colocação de argamassa de solo para melhor acomodação da chapa metálica responsável pela distribuição dos esforços de compressão simples.	59
Fig. 31	Sistema de fixação de barras e apoios para extensômetros em prismas para realização de ensaios de compressão diagonal.	60
Fig. 32	Colocação de argamassa de solo para melhor acomodação dos apoios metálicos responsáveis pela distribuição dos esforços de compressão.	61
Fig. 33	Esquema genérico dos ensaios de compressão diagonal em prismas (Fonte: Varum, 2002).	62
Fig. 34	Faces externa (esq.) e interna (dir.) de parede executada em pórtico de equipamento para ensaio de resistência ao fogo do Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo – LERF, Aveiro – Portugal.	64
Fig. 35	Esquema de distribuição dos termopares e pontos de medição de deformações para o ensaio de resistência ao fogo.	65
Fig. 36	Ensaio da Caixa com solos corrigidos com areia. Compósitos sem fibras de papel Kraft apresentaram fissuras ou rachaduras.	68
Fig. 37	Gráficos com as variações da resistência à compressão simples e respectivas umidades dos compósitos de Kraftterra GC-K6-E6 (esquerda) e GCC30-K6-E6 (direita).	70
Fig. 38	Gráficos com as variações da resistência à compressão simples e respectivas umidades dos CPs de solo-cimento GC-K0-E6 (esquerda) e GCC30-K0-E6 (direita).	70
Fig. 39	Gráficos com as variações da resistência à compressão simples e respectivas umidades dos CPs de solo-cimento GCC15-K0-E6 (esquerda) e Kraftterra GCC15-K6-E6 (direita).	71
Fig. 40	CPs cilíndricos de Kraftterra (esquerda e centro) e de solo-cimento (direita) após o final dos ensaios de compressão simples.	74
Fig. 41	Gráfico de TENSÃO DE COMPRESSÃO X DEFORMAÇÃO AXIAL ESPECÍFICA, SA1-K6-E6, Kraftterra com 28 dias. CPA-026 com umidade de mistura 2% acima da umidade ótima de compactação.	76
Fig. 42	Gráfico de TENSÃO DE COMPRESSÃO X DEFORMAÇÃO AXIAL ESPECÍFICA, SA1-K6-E6, Kraftterra com 28 dias. CPA-028 com umidade de mistura 6% abaixo da umidade ótima.	77
Fig. 43	Gráfico de TENSÃO DE COMPRESSÃO X DEFORMAÇÃO AXIAL ESPECÍFICA, CP SA1-K6-E6, Kraftterra com 7 dias após compactação.	78

Fig. 44	CPs de BTCs de Kraftterra (abaixo) e solo-cimento (acima) no início e ao final dos ensaios de resistência à compressão simples.	81
Fig. 45	BTCs de solo-cimento (1 a 5) antes (acima) e depois (abaixo) dos ensaios de envelhecimento acelerado.	82
Fig. 46	BTCs de Kraftterra (6 a 10) antes (acima) e depois (abaixo) dos ensaios de envelhecimento acelerado.	83
Fig. 47	Ensaio visual comparativo para reconhecimento do comportamento de BTCs de Kraftterra quanto à absorção de água com o uso de tanque com paredes transparentes.	85
Fig. 48	Deslocamentos para fora do eixo de carregamento durante ensaios de compressão simples em prismas de BTCs de Kraftterra.	86
Fig. 49	Prismas de Kraftterra após ensaios de resistência à compressão simples. As fissuras foram ressaltadas com tinta vermelha diretamente nos prismas.	87
Fig. 50	Gráfico "Tensão de compressão x deformação axial" de ensaios de resistência à compressão simples de prismas de Kraftterra.	88
Fig. 51	Prismas de Kraftterra após ensaios de resistência à compressão simples. Este prisma passou por ciclos de envelhecimento acelerado.	89
Fig. 52	Compressão diagonal, gráfico Tensão (S_s) x Deformações vertical e horizontal.	90
Fig. 53	Prismas ao final de ensaios de compressão diagonal. As linhas de fissuras foram ressaltadas com tinta vermelha diretamente nos prismas.	91
Fig. 54	Prismas ao serem levantados apresentam aderência na área de ruptura à compressão diagonal.	92
Fig. 55	Prisma de Kraftterra que passou por ciclos de envelhecimento acelerado após ensaio de resistência à compressão diagonal.	92
Fig. 56	Gráfico de temperatura por tempo decorrido no ensaio de resistência ao fogo.	93
Fig. 57	Evolução das temperaturas no painel P1, Kraftterra com reboco na face exposta ao fogo.	95
Fig. 58	Evolução das temperaturas no painel P4, solo-cimento com reboco na face exposta ao fogo.	96
Fig. 59	Evolução das temperaturas no painel P2, Kraftterra sem reboco.	96
Fig. 60	Evolução das temperaturas no painel P5, solo-cimento sem reboco.	97
Fig. 61	Evolução das temperaturas no painel P3, Kraftterra com reboco nas duas faces.	97
Fig. 62	Evolução das temperaturas no painel P3, Kraftterra com reboco nas duas faces.	98
Fig. 63	Fissura vertical no centro da parede, face não exposta ao fogo.	99
Fig. 64	Fissura vertical no centro da parede, face exposta ao fogo. Detalhe dos descolamentos de parte das duas faixas laterais de reboco.	100

Lista de Anexos

Anexo 1	Tabela de Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), fonte: Instrução Técnica n.º 08/2004 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo.	114
Anexo 2	Gráfico de tensão/deformação CPs de solo-cimento GCC15-K0-E6.	115
Anexo 3	Gráfico de tensão/deformação CPs de Kraftterra GCC15-K6-E6.	116
Anexo 4	Gráfico de tensão/deformação CPs de solo-cimento GCC30-K0-E6.	117
Anexo 5	Gráfico de tensão/deformação CPs de Kraftterra GCC30-K6-E6.	118
Anexo 6	Gráfico de tensão/deformação CPs de solo-cimento GC-K0-E6.	119
Anexo 7	Gráfico de tensão/deformação CPs de Kraftterra GC-K6-E6.	120
Anexo 8	Gráfico de tensão/deformação CPs de Kraftterra GCC15-K8-E6. Estudo da variação do percentual de kraft (8%).	121
Anexo 9	Gráfico de tensão/deformação CPs de Kraftterra GCC30-K8-E6. Estudo da variação do percentual de kraft (8%).	122
Anexo 10	Gráfico de tensão/deformação CPs de Kraftterra GCC15-K4-E6. Estudo da variação do percentual de kraft (4%).	123
Anexo 11	Gráfico de tensão/deformação CPs de Kraftterra GCC30-K4-E6. Estudo da variação do percentual de kraft (4%).	124
Anexo 12	Gráfico de tensão/deformação para caracterização do solo de Aveiro e definição do valor de umidade ótima de compactação para a produção de BTCs de solo-cimento (SA1-K0-E6).	125
Anexo 13	Gráfico de tensão/deformação para caracterização do solo de Aveiro e definição do valor de umidade ótima de compactação para a produção de BTCs de Kraftterra (SA1-K6-E6).	126
Anexo 14	Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com BTCs de Kraftterra.	127
Anexo 15	Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com BTCs de solo-cimento.	128
Anexo 16	Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com BTCs de Kraftterra que passaram por ciclos de envelhecimento acelerado.	129
Anexo 17	Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com BTCs de solo-cimento que passaram por ciclos de envelhecimento acelerado.	130
Anexo 18	Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com prismas produzidos com BTCs de Kraftterra.	131
Anexo 19	LA MURATURA IN TERRA CRUDA FIBRORINFORZATA: TRA TRADIZIONE E INNOVAZIONE, artigo de autoria do Prof. Roberto Mattone, encaminhado como auxílio à pesquisa, porém sem as demais referências bibliográficas. Não foi encontrado em buscas acadêmicas ou em consultas bibliográficas.	132

Lista de Tabelas

Tabela 1	Valores da retração para compósitos de Kraftterra.	67
Tabela 2	Valores de retração. Ensaios com solo corrigido de solo-cimento e Kraftterra estabilizado.	68
Tabela 3	Tensão de ruptura à compressão simples de CPs de BTCs de Kraftterra e solo-cimento em ensaios de resistência à compressão simples (MPa).	79
Tabela 4	Tensão de ruptura à compressão simples de CPs de BTCs de Kraftterra e solo-cimento em ensaios de compressão simples após ciclos de envelhecimento acelerado (MPa).	80
Tabela 5	Ensaios de compressão diagonal em prismas. Tensão de cisalhamento (S_s) e Modulo de elasticidade transversal (G)	90
Tabela 6	Deformações (em mm) medidas em pontos médios, próximo de junções de materiais diferentes e nas extremidades da parede ao longo do ensaio de resistência ao fogo (tempo em minutos).	98

Resumo

O presente trabalho trata do desenvolvimento e análise de um novo compósito para produção de componentes construtivos de terra crua estabilizada e prensada com a incorporação de fibras dispersas de papel kraft. Tem por objetivo principal a verificação da hipótese de que as fibras dispersas de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento podem ser utilizadas como estabilizante para melhorar as características e propriedades físicas e mecânicas de Blocos de Terra Compactada - BTCs. Em outras palavras, essa pesquisa examina e analisa um novo compósito, o Kraftterra. Após ensaios laboratoriais e análises comparativas entre o novo compósito e o solo-cimento constatou-se o melhor desempenho do Kraftterra quanto à resistência à compressão simples e diagonal (antes e depois de ciclos de envelhecimento acelerado), retração e resistência ao fogo. Entretanto foi verificada no Kraftterra a tendência de aumento dos índices de absorção de água quando comparados aos do solo-cimento. Após estudo em laboratório considera-se o Kraftterra como sendo mais uma alternativa econômico-sustentável para a produção de componentes e elementos construtivos.

Palavras-chave: arquitetura de terra; papel kraft; reciclagem; Kraftterra, BTC.

Abstract

The following thesis focuses on the development and analysis of a new composite material for the production of construction components made of stabilized and pressed raw soil incorporated with dispersed Kraft paper's fibers. Its main goal is the hypothesis verification that dispersed Kraft paper's fibers, resulted from the recycling process of cement sacks, can be used as a stabilizer in order to improve the characteristics and mechanical properties of compressed earth blocks (CEBs). In other words, this research puts to test and analysis a new composite material, the Kraftterra. After several laboratorial experiments and comparative analyses between the new composite material and cement-soil, a better performance by the Kraftterra was noted when regarding axial and diagonal compressive strength (before and after accelerated aging cycles), shrinkage and fire resistance of both materials. However, the Kraftterra presented a tendency to absorb more water than the cement-soil. The final conclusion considered the Kraftterra as another economical and sustainable alternative for the production of construction elements and materials.

Key-words: earthen architecture; kraft paper; recycling; Kraftterra; CEB.

*"Um pouco de ciência nos afasta de Deus.
Muito, nos aproxima".
(Louis Pasteur)*

1. Elementos para a compreensão do trabalho

1.1 Introdução

Com a intensa industrialização, o advento de novas tecnologias, o crescimento populacional e o aumento de pessoas em centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos com um gerenciamento oneroso e complexo considerando-se o seu volume e massa acumulados (ÂNGULO et al., 2001).

Dentre os mais sérios problemas da atualidade enfrentados pela gestão ambiental pode-se destacar o impacto do ambiente construído provocado principalmente pela grande geração de resíduos sólidos da Indústria da Construção Civil – ICC – e posterior descarte na natureza.

Segundo Stachera Jr.; Casagrande Jr. (2008) o impacto ambiental da construção civil está associado ao uso intensivo de recursos naturais não renováveis, de energia e água, além de um grande volume de resíduos gerados e não aproveitados em sua grande maioria. Em todos os processos de materiais que envolvem o setor há emissões de gases poluentes e de gases que contribuem para o aquecimento global.

Ainda segundo estes autores, as emissões de gás carbônico geradas pela indústria de cimento, por exemplo, respondem por 7% da emissão de CO₂ na atmosfera, um dos gases responsáveis pelo Efeito Estufa.

A baixa cobertura de serviços de coleta e a situação precária das áreas destinadas à disposição final do lixo urbano tornam urgente e prioritária a necessidade de implantação de políticas que visem diminuir o volume de resíduos produzido pelas cidades e, principalmente, pela ICC e, ao mesmo tempo, viabilizar soluções para o problema de disposição e o fortalecimento dos processos de reciclagem para utilização dos produtos obtidos.

Entretanto, a reciclagem de resíduos da construção e demolição como material de construção civil, iniciada na Europa após a segunda guerra mundial, encontra-se no Brasil muito atrasada, especialmente se comparada com países europeus onde a fração reciclada pode atingir cerca de 90%, como é o caso da Holanda (HENDRIKS et al., 2007). Desde esse estudo muito se progrediu, mas muito ainda há de ser feito.

Dentre os materiais descartados das construções pode-se ressaltar o papel kraft *natural multifoliado*¹ oriundo dos sacos de cimento. Quase que inevitavelmente os sacos de cimento não são reaproveitados ou reciclados após o seu uso nas obras, gerando assim um enorme volume desse resíduo.

Taves et al. (2001) mencionam que a baixa taxa de recuperação dos sacos multifoliados está intimamente vinculada à contaminação provocada pelos produtos ensacados, tais como cimento, adubos, rações e produtos químicos em geral. Estas contaminações exigem procedimentos e cuidados adicionais aos processos de reciclagem desse material.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2008), a produção mundial de cimento em 2006 foi da ordem de 2.565 milhões de toneladas. Em 2006 o Brasil foi o décimo maior produtor mundial com 42,4 milhões de toneladas. Segundo o relatório anual 2007-8 do SCNI (2008) em 2007 a produção nacional estimada de cimento passa dos 46 milhões de toneladas. Deste total 77% são de cimento ensacado, o que equivale a 34,8 milhões de toneladas.

Ao considerar que cada embalagem dos sacos de 50 Kg de cimento tem em média 150g, no Brasil ensacou-se aproximadamente 696 milhões dessas embalagens somente em 2007 e, como já comentado, quase que a totalidade destes sacos foi descartada e depositada na natureza sem qualquer tratamento (TAVES et al., 2001).

A Região Sudeste é a que mais consome cimento no Brasil, aproximadamente 50% de todo cimento fabricado no país. Em todas as regiões brasileiras o

¹ Papel fabricado com pasta química sulfato não-branqueada, essencialmente de fibra longa, geralmente nas gramaturas de 80 a 90 g/m². Altamente resistente ao rasgo e com boa resistência ao estouro. Usado essencialmente para sacos e embalagens industriais de grande porte (BRACELPA, 2009).

percentual de consumo de cimento ensacado é maior que o de cimento a granel. Do cimento consumido em 2007, tem-se que: na Região Norte do Brasil, 82,9% é ensacado; na Região Nordeste 89,1%; na Região Centro-Oeste 79,3%; na Região Sudeste 75,2%; e na Região Sul 64,7%. Tais percentuais demonstram ser relevante e viável a reciclagem de sacos de cimento em todas as regiões brasileiras.

Anualmente são produzidas no Brasil aproximadamente 360.000 toneladas de papel kraft natural para sacos multifoliados, o que equivale a 4% da produção brasileira de papel (BRACELPA, 2009). Nem todo esse papel é utilizado para o ensacamento de cimento, mas caso o fosse representaria 2,4 bilhões de sacos de 50 Kg de cimento por ano.

Nesta pesquisa optou-se pela reciclagem de sacos de cimento por estar inserida no âmbito da Indústria da Construção Civil e por ser um tipo de resíduo que é pouco reaproveitado ou reciclado, porém qualquer outro tipo de embalagem produzida a partir de papel kraft natural para sacos multifoliados poderia ter sido utilizada nos estudos.

A fibra das embalagens de papel kraft natural tem excelentes propriedades físicas e mecânicas. Esse papel é fabricado seguindo as especificações rígidas exigidas pelos fabricantes e usuários de sacos multifoliados. Estas especificações exigem uma celulose sulfato de alta resistência, de fibra longa, que é geralmente empregada pura (CELELOSEONLINE, 2009).

O Brasil possui alguns fabricantes de papel kraft que utilizam as fibras do bambu, da espécie *Bambusa vulgaris*. O bambu produz celulose de fibra longa, diferentemente do eucalipto, que é composto por fibras curtas. As fibras do bambu são longas como as do pinheiro e estreitas como as do eucalipto, o que faz com que se entrelacem mais, conferindo excelentes características físicas aos papéis. A celulose de bambu possui inúmeras vantagens, destacando-se pela produção de cartões de alta resistência final, com os menores índices de rasgo do mercado, sendo a embalagem mais usada em segmentos como cimento, cal, argamassa e gesso (MALHÃES, 2008).

Após a utilização do cimento, o saco, constituído por material com tão boas características físicas e mecânicas, acaba não sendo utilizado pelas empresas de

reciclagem de papel por se encontrar contaminado pelo cimento. Em Portugal, por exemplo, a coleta seletiva das embalagens de cimento é desaconselhada, sendo esse tipo de entulho classificado como resíduo tóxico e perigoso. Há, porém, potencial de seu aproveitamento na produção de novos componentes para habitação, visando à melhoria das propriedades técnicas e econômicas destes componentes, bem como à maior sustentabilidade ambiental e econômica do processo, já que poderá haver economia de energia e minimização de impactos ambientais com o aproveitamento deste resíduo.

O Brasil apresenta um grande desafio na área social, com um gigantesco déficit habitacional (quantitativo e qualitativo). No enfrentamento dessa questão, a participação da comunidade científica ocorre especialmente no desenvolvimento de alternativas tecnológicas, que devem considerar aspectos técnicos, econômicos, sociais, culturais, ambientais e geográficos. Faz-se necessário ampliar o conhecimento de alternativas para a habitação de interesse social destinadas aos agentes da construção, quer sejam cooperativas ou construtores autônomos, de modo a oferecer um produto de boa qualidade e que seja econômico-sustentável.

A importância do aproveitamento de resíduos para a produção de habitações – sejam estas de interesse social ou não – deve-se basicamente à possibilidade de desenvolvimento de materiais de boa qualidade e baixo custo, a partir de subprodutos industriais, disponíveis localmente, através da investigação de suas potencialidades.

O desenvolvimento de materiais, componentes e elementos destinados a edificações envolve aspectos diretamente relacionados com as suas propriedades e o uso a que se destinam, e a outros aspectos, mais genéricos, tais como: a qualidade do processo de produção e do produto, a utilização dos insumos e o comportamento do produto no contexto ambiental (NEVES, 2003).

Este trabalho apresenta um novo material para a produção de componentes de terra crua com a incorporação de fibras da polpa de celulose proveniente da reciclagem de sacos de cimento. Expõe-se, portanto, o estudo, desenvolvimento e análise do desempenho técnico de um novo compósito, denominado aqui por

Kraftterra, para uso em vedações verticais, estruturais ou não, de edificações em geral e, em particular, de habitações de interesse social.

A quantidade de materiais e energia necessários ao processo de reciclagem pode representar um grande impacto para o meio ambiente. Todo processo de reciclagem necessita de energia para transformar o produto ou tratá-lo de forma a torná-lo apropriado a ingressar novamente na cadeia produtiva. Tal energia dependerá da utilização proposta para o resíduo, e estará diretamente relacionada aos processos de transformações utilizados. Além disso, muitas vezes, apenas a energia não é suficiente para a transformação do resíduo. São necessárias também matérias-primas para modificá-lo física e/ou quimicamente (ÂNGULO et al., 2001).

No caso da transformação do papel kraft natural multifolhado em polpa de celulose para uso em componentes de Kraftterra, consome-se pouca energia e não são necessários outros materiais, além da água, para a realização do processo de reciclagem. Este fator pode ser utilizado para justificar ainda mais o estudo desse novo compósito. Com processos manuais de transformação, por exemplo, não há consumo de energia elétrica, mas em contrapartida o processo torna-se mais demorado.

Como qualquer outra atividade, a reciclagem também pode gerar resíduos, cuja quantidade e características também vão depender do tipo de reciclagem escolhida. Esses novos resíduos, nem sempre são tão ou mais simples que aqueles que foram reciclados. É possível que eles se tornem ainda mais agressivos ao homem e ao meio ambiente do que o resíduo que está sendo reciclado (ÂNGULO et al., 2001).

O processo de polpação através da trituração do papel kraft não gera qualquer novo resíduo ou contaminante, sendo necessário, quando muito, apenas um simples procedimento de limpeza ou filtragem da água utilizada no processo.

Neste trabalho procede-se à avaliação de diferentes composições de materiais para compósitos do tipo Kraftterra para a produção de componentes construtivos do tipo Blocos de Terra Compactada – BTCs – e de elementos construtivos para vedação vertical. Para tal, foram necessários estudos e análises para a

caracterização do novo material, bem como para verificação do desempenho físico-mecânico dos seus componentes e elementos construtivos.

Para domínio das ações propostas foram necessários estudos e análises para definição do processo de reciclagem dos sacos de cimento; do processo de preparo e mistura do novo compósito; do processo de fabricação dos BTCs com prensa manual; da execução de paredes com argamassa de assentamento; e da execução de reboco para revestimento.

As variáveis da mistura foram as proporções dos materiais para a produção dos BTCs de Kraftterra, ou seja: o solo (matéria-prima - terra); o estabilizante (cimento); as fibras longas do papel kraft reciclado (polpa de celulose); e o percentual de água da mistura.

O estudo do desempenho do componente incluiu algumas de suas propriedades tais como resistência à compressão, retração linear, durabilidade (envelhecimento acelerado) e índice de absorção de água (com e sem aditivo impermeabilizante, seiva do Aloe vera).

Do elemento de vedação vertical, visando a sua aplicação e desempenho na habitação, foram incluídos ensaios de resistência à compressão simples e tensão diagonal, durabilidade (envelhecimento acelerado) e resistência ao fogo.

Portanto, grande parte deste trabalho se inseriu num ambiente experimental, onde testes e ensaios laboratoriais foram necessários para a caracterização dos materiais e compósitos, bem como para a definição das propriedades e desempenho dos componentes construtivos e elementos de vedação.

Os ensaios de caracterização do novo compósito foram desenvolvidos no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. A fabricação dos BTCs de Kraftterra e solo-cimento e as análises do desempenho destes componentes e dos elementos de vedação foram realizadas nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, em Portugal.

Cabe ressaltar que certamente as diferenças entre os tipos de solos e também entre os sacos de cimento utilizados nas etapas de trabalho realizadas no Brasil e em Portugal foram consideradas. Para eliminar a interferência destas diferenças nos resultados optou-se pela utilização de um compósito de referência para

análises comparativas com o Kraftterra, no caso o solo-cimento. Desta forma só foram realizadas comparações entre as características ou o desempenho de compósitos, BTCs e paredes produzidos com materiais de mesma origem.

1.2 Hipótese

A hipótese deste trabalho é que as fibras dispersas de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento podem ser utilizadas como estabilizante para melhorar as características e propriedades físicas e mecânicas de Blocos de Terra Compactada - BTCs.

1.3 Objetivos

O objeto do estudo se concentra no emprego de material proveniente da reciclagem de resíduos sólidos da Indústria da Construção Civil, mais especificamente o papel kraft natural multifoliado dos sacos de cimento, e sua incorporação à matéria-prima - solo para a criação de um novo compósito, o Kraftterra, e sua utilização para a produção de componentes e elementos construtivos.

O objetivo principal desta tese foi desenvolver, experimentar e avaliar o processo construtivo para execução de elementos de vedação vertical com BTCs de Kraftterra.

Os objetivos secundários expressam as várias etapas do processo construtivo proposto, como: o estudo e desenvolvimento do processo de preparo do novo compósito; a análise do desempenho do novo compósito; a fabricação de BTCs com o novo compósito; a análise comparativa do desempenho dos BTCs; a execução de paredes com BTCs e a análise comparativa do desempenho das paredes de Kraftterra.

Como parâmetro para as análises comparativas também foram estudados o comportamento e desempenho do solo-cimento, bem como de seus componentes e elementos construtivos, ou seja, de BTCs e de paredes.

1.4 Estrutura da tese

O texto desta tese está dividido em sete capítulos.

No capítulo 1 são apresentados os elementos para a compreensão do trabalho, que consiste na introdução, hipóteses, objetivos e estrutura da tese.

Em seguida, nos capítulos 2 e 3, abordaram-se três aspectos que serviram para embasar conceitualmente a discussão sobre o tema proposto: Aproveitamento de resíduos e materiais reforçados com fibras, no capítulo 2; e Produção de BTCs e Solos para BTCs, no capítulo 3.

No capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos, incluindo os procedimentos, equipamentos e materiais utilizados nos estudos e análises para definição do processo de produção do Kraftterra, bem como para a preparação e execução dos ensaios para caracterização do novo compósito e definição do desempenho técnico dos componentes (BTCs) e elementos (paredes).

Este capítulo está dividido em: 1) o processo de reciclagem dos sacos de cimento (transformação dos sacos de cimento em polpa de celulose; retirada do excesso de água da polpa; dispersão das fibras; e equipamentos recomendados); 2) a escolha e caracterização dos solos para produção do Kraftterra (granulometria; limites de consistência; plasticidade; umidade ótima); 3) o processo de preparo e mistura do novo compósito (condições e ordem de colocação dos materiais na mistura; definição da quantidade ideal de água na mistura; definição das umidades ótimas de compactação; definição das proporções e traços; e equipamentos recomendados); 4) as proporções e traços recomendados ao uso do Kraftterra; 5) os ensaios de absorção de água pelo novo compósito; 6) os ensaios de resistência a compressão com o Kraftterra; 7) o processo de fabricação dos BTCs de Kraftterra (tipos de prensas; tipos de cura; e considerações específicas); 8) os ensaios para verificação do desempenho dos BTCs (compressão simples, absorção de água e envelhecimento acelerado); 9) o processo de execução de elementos de vedação vertical com argamassa de assentamento (etapas do levantamento das paredes; cuidados; e considerações específicas); e 10) os ensaios para verificação do desempenho das paredes (e prismas (compressão simples e diagonal e resistência ao fogo).

O capítulo 5 consiste na apresentação e análise dos resultados, abordando separadamente o novo compósito, os blocos de terra compactada e os elementos de vedação.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e no capítulo 7 as recomendações para futuros trabalhos.

Ao final estão a lista de Referências bibliográficas e os Anexos.

"A teoria sempre acaba, mais cedo ou mais tarde,
assassinada pela experiência".
(Albert Einstein)

2. Aproveitamento de resíduos e materiais com fibras

2.1 Aproveitamento dos resíduos sólidos

Com o desenvolvimento de legislação própria e crescente conscientização do setor da construção civil em relação aos problemas ambientais que o cercam, tem-se hoje uma percepção cada vez maior da necessidade de desenvolvimento de processos construtivos que não causem danos ao homem e ao meio ambiente.

Segundo Rocha e Cheriaf (2003), o desenvolvimento tecnológico de processos associados à reciclagem de resíduos industriais passa a ter hoje enorme relevância. O aumento no descarte de resíduos sólidos, bem como os problemas advindos da exaustão de matérias-primas naturais, vem impulsionando os estudos sobre o aproveitamento desses resíduos como novos materiais, reduzindo o seu impacto ambiental e viabilizando a redução de custos industriais e a criação de novos empregos.

As experiências bem-sucedidas de desenvolvimento de produtos para a construção civil com resíduos incorporados são impulsionadas, principalmente, pela legislação ambiental e há uma verdadeira política visando a reduzir a eliminação direta de resíduos em aterros industriais ou sanitários, sem uma prévia valorização ou tratamento (id, ibidem).

Calderoni (1997) cita que as definições de resíduo, rejeito e lixo diferem conforme a situação em que são aplicadas. O resíduo é todo material sólido não utilizado nas atividades produtivas, as sobras. O lixo é todo material sólido considerado como inútil ou descartável pelo proprietário. E o rejeito é todo material sólido que passa por um processo de seleção e é excluído.

Hiwatashi (1998) acrescenta a informação de que o *Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE* – define como sendo lixo tudo aquilo que não tem valor comercial. Neste caso, pouca coisa jogada fora pode ser chamada de lixo,

pois muitos desses materiais descartados são hoje reaproveitados, reutilizados ou reciclados, passando assim a ter novamente valor no comércio.

Portanto, reciclagem é o resultado de uma série de atividades através das quais materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são desviados, sendo coletados, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de bens, feitos anteriormente com matéria-prima virgem (Pereira, apud Hiwatashi - 1998).

Segundo a norma que classifica a natureza, composição e a periculosidade dos resíduos sólidos, NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são aqueles que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Conforme a Resolução 307 do CONAMA, de 17 de julho de 2002, os resíduos sólidos da Indústria da Construção Civil podem ser separados em quatro classes: Classe A (resíduos reutilizáveis ou recicláveis); Classe B (resíduos recicláveis para outras destinações); Classe C (resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação); e Classe D (resíduos perigosos oriundos do processo de construção).

O conceito de reciclagem relaciona-se ao ciclo de utilização de um material ou componente, que uma vez tenha se tornado velho pode-se tornar novo, prolongando assim sua vida útil. Esse conceito fundamenta-se na gerência ambiental, social e econômica de recursos naturais, visando à gerência do ciclo de vida de materiais. Baseia-se, portanto em um dos pilares da política ambiental, conhecida como gerência de cadeia integrada, incluindo a gerência do ciclo de vida dos materiais de construção, nas fases de produção, construção, demolição, reuso ou reciclagem e disposição. Implica, portanto, na redução do uso de recursos naturais (fontes de energia e matéria-prima primária) e em manter a matéria-prima no ciclo de vida de produção o máximo possível. Tal conceito enfatiza a importância da fase de projeto no processo construtivo, e este como um todo deve ser entendido como um processo de reciclagem (Blumenschein, 2005).

Não se pode entender por fortalecimento do processo de reciclagem o mesmo que fortalecimento da geração de resíduo. Alguns pesquisadores tendem a argumentar que a reciclagem de resíduos da construção é uma solução obsoleta e que pode potencializar o aumento da geração de resíduo. Dentro de uma realidade onde o processo construtivo no Brasil deverá levar mais algum tempo produzindo resíduos oriundos das perdas, mesmo com a intensificação do movimento já instalado no país de se buscar qualidade no processo de produção, o impacto causado pela geração de resíduos nos espaços urbanos não pode ser ignorado (Blumenschein, 2001).

Autores como Hendriks et al. (2007) e Blumenschein (2005) ressaltam que a reciclagem relaciona-se ao ciclo de utilização de um material ou componente, que uma vez tenha se tornado velho, pode-se tornar novo; há neste caso, um prolongamento da vida útil do material, com o ciclo: 'novo-velho-novo'. A nova utilização de um material ou componente implica em uma série de operações, incluindo coleta, desmonte e tratamento, gerando um novo produto, que pode retornar ao processo de produção.

John et al. (2003b) ressaltam que a aplicação do resíduo não deve ser feita em torno de idéias pré-concebidas, mas em função das características do resíduo. Como regra geral, tais aplicações são aquelas que melhor aproveitam as suas características físico-químicas com menor impacto ambiental dentro de um nicho de mercado específico, no qual o produto reciclado tem boas condições de competição com o produto convencional.

As decisões arquitetônicas e construtivas devem, ou deveriam estar sempre voltadas para a busca e especificação de materiais e técnicas potencialmente sustentáveis, ou seja: materiais de construção que em seus ciclos de vida consumam pouca energia e que possuam alto grau de reciclabilidade ou de reutilização; e, ao mesmo tempo, que trabalhem com detalhes, técnicas e processos de construção que proporcionem ou possibilitem pouco ou nenhum descarte e/ou desperdício de materiais.

Na quase totalidade dos processos e técnicas de construção convencionais, industrializados e até tradicionais utilizados na atualidade é fácil percebermos a presença de alguma etapa onde materiais são desperdiçados ou descartados e

resíduos são produzidos. Algumas soluções que reduzem ou evitam tal produção de resíduos devem ser consideradas, como, por exemplo, a racionalização dos processos construtivos, a gestão de qualidade e a modulação de projeto, materiais e componentes, mas são poucas as que tiveram sua utilização efetivamente incorporada aos procedimentos usuais de obras civis no Brasil.

Mateos (2006) propõe que todo projeto deve incluir uma avaliação sobre a possível utilização de resíduos industriais, com ênfase nos que se encontram perto do local da obra. E complementa dizendo que podemos aproveitar grandes quantidades de resíduos industriais, se assim nos propusermos a isso.

2.2 Materiais reforçados com fibras

A construção civil emprega matrizes frágeis: pastas, argamassas e concreto. Estas matrizes, na sua maioria derivadas de aglomerantes minerais, rompem-se sem deformação plástica e, apesar de resistentes a esforços de compressão, não suportam grandes solicitações de tração e cargas dinâmicas. Para compensar esta deficiência, outros materiais são empregados como reforço (Silva, 2002).

Este mesmo autor argumenta que no caso de componentes esbeltos ou em aplicações onde a massa específica deva ser considerada, como os painéis, as telhas e as divisórias, o reforço deve ser feito com materiais compatíveis, em dimensão e massa, com a aplicação desejada. O uso de fibras surge então como alternativa técnica recomendada. Sua aplicação tem sido bastante difundida atualmente, constituindo-se um campo de pesquisa em expansão no mundo todo, inclusive no Brasil, onde existem pesquisas em andamento e já concluídas visando o desenvolvimento de componentes com emprego de fibras.

Dentre as várias pesquisas já realizadas, ressalta-se a realizada por Neves (2003), que utilizou a reciclagem de papel para produção de argamassa celulósica e posterior fabricação de componentes para habitações. A argamassa celulósica utilizada pela autora corresponde ao compósito constituído da matriz de cimento e areia reforçada com fibras de celulose provenientes da reciclagem de papel imprensa. Esse estudo concluiu que a argamassa celulósica pode ser caracterizada como um compósito de matriz frágil com reforço de fibra orgânica de baixo módulo de elasticidade, mas que modificações no processo de preparo da argamassa celulósica, principalmente com redução da quantidade de água

usada para a mistura, ou com retirada da água no processo de adensamento, podem resultar em material mais compacto e, portanto, mais resistente à ação posterior da água e de microorganismos, prolongando-se a vida útil do componente.

Silva (2002) cita o estudo do CEPED de 1982 que contemplou o desenvolvimento de argamassas reforçadas com fibras de coco, piaçava e sisal, para produção de telha tipo canal, moldada em duas camadas de argamassa com as fibras colocadas manualmente entre as camadas. O autor também comenta que um dos problemas relatados foi decorrente da má distribuição das fibras, tendo sido recomendada a adição das fibras durante o processo de mistura da argamassa.

Este mesmo autor apresentou estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose, mais especificamente sobre o comportamento mecânico e a durabilidade de compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose, visando o emprego como alternativa aos compósitos de cimento-amianto para a produção de placas, telhas e divisórias, concluindo pela sua viabilidade.

Na arquitetura de terra, tradicionalmente aparecem bons resultados com a adição, mistura ou incorporação de fibras orgânicas à matéria-prima solo. São utilizados como reforço a palha e o estrume de animais, materiais facilmente encontrados nas regiões onde são produzidos tijolos de adobe ou paredes de COB², taipa de mão e outras técnicas.

Segundo Barbosa et al. (2005), os estabilizantes são materiais usados para melhorar a performance dos blocos quanto à resistência e/ou quanto à ação da água ou quanto às propriedades de ductibilidade e tenacidade. São exemplos de estabilizante: cimento Portland, cal, emulsões asfálticas (melhoram a resistência mecânica e desempenho na presença de água); e palhas cortadas, fibras vegetais e esterco bovino (melhoram a ductibilidade).

Van Vlack (1970) afirma que produtos naturais como a celulose, por possuírem moléculas grandes, são mais resistentes às tensões mecânicas e térmicas que os compostos formados por moléculas pequenas. As fibras longas de alta resistência

² COB: Técnica construtiva de origem inglesa que utiliza a terra mesclada à palha e molda o objeto com as mãos e sem fôrmas (Fonte: www.portaldoarquiteto.com).

física do papel kraft multifoliado proveniente da reciclagem dos sacos de cimento podem vir a ser mais uma opção de estabilizante para a arquitetura de terra.

Faria (2002) apresentou sua pesquisa sobre a utilização de macrófitas aquáticas na produção de tijolos de adobe. A utilização desta biomassa em materiais de construção foi sugerida como uma possibilidade para a autoconstrução de habitações de baixo custo. Outra função do uso da biomassa no adobe seria a estabilização de solos que apresentam alto teor de argila. A adição da biomassa contribuiu com a redução das fissuras e da massa específica dos tijolos.

Milani (2005) realizou pesquisa com o objetivo de estudar os efeitos da adição de combinações de cimento-casca-de-arroz e de cal-casca-de-arroz nas propriedades físico-mecânicas de um solo predominantemente arenoso e outro solo predominantemente argiloso, bem como avaliar a viabilidade técnica da confecção de tijolos de solo-cimento-casca-de-arroz e solo-cal-casca-de-arroz. Concluiu que o solo arenoso, adicionado de 12% de combinações de cimento-casca-de-arroz, apresentou-se como promissor material para utilização na fabricação de tijolos prensados a serem utilizados em construções e instalações rurais.

Achenza; Fenu (2006) estudaram o problema de preparar tijolos de adobe para construção com terra o menos erosivo³ quanto possível. Fizeram análises comparativas entre amostras de terra estabilizadas com fibras vegetais e polímeros naturais e amostras estabilizadas somente com fibras. Concluíram que as combinações de estabilização fibra-polímero dão à terra um comportamento muito bom sob a ação da água e que a resistência à compressão é significativamente aumentada.

Mesbah et al. (2004), em pesquisa com tijolos de terra crua compactados mecanicamente e reforçados com fibras (sisal), indicam que o uso de fibras tem grande influência nas propriedades e características desses componentes, reduzindo as fissuras por contração e melhorando a resistência a tração.

Basha et al. (2005) estudaram quimicamente a estabilização de terras residuais acrescidas de cimento e cinza da casca de arroz. Os resultados dos testes

³ Erosivo: Refere-se ao desgaste provocado pela ação da água e intempéries. Quanto melhor o comportamento sob a ação da água menos erosivo é o componente ou elemento de fachada.

mostram que ambas, as cinzas de casca de arroz e o cimento reduzem a plasticidade do solo. Concluíram que a adição das cinzas de casca de arroz e cimento diminui a densidade máxima seca e aumenta a umidade ótima e que do ponto de vista de plasticidade, compactação e características de resistência e economia a adição de 6-8% de cimento e 10-15% de cinza de casca de arroz é recomendada como uma quantidade ótima.

Binici et al. (2006), após extenso estudo, concluíram que tijolos de barro reforçados com fibras satisfazem os requisitos quanto à resistência à compressão e condutibilidade térmica do ASTM e padrões turcos. Os tijolos reforçados com fibras de plástico mostraram mais alta resistência à compressão que os reforçados com palha, poliestireno e os sem quaisquer fibras.

Ghiassian et al. (2004) relatam estudo conduzido para avaliar o desempenho de fibras residuais da produção de tapetes para melhorar a resistência de solos finos e arenosos, onde foram avaliados aspectos como a quantidade ideal de água e de fibras, e como esses materiais auxiliam no comportamento do solo à tração, compressão e esforços cortantes. Comprovaram que a adição das fibras de tapete melhorou o desempenho quanto aos aspectos estudados.

Matonne (2005), com o objetivo de melhorar a técnica *bahareque*⁴ de construção, testou solos reforçados com fibras de sisal e estabilizados com cimento e polpa de cactos, verificou o comportamento quanto à flexão, resistência à abrasão, absorção de água e erosão. Os resultados foram comparados com solos com misturas tradicionais usadas em tecnologias de terra. O desempenho dos solos com fibras de sisal reforçadas com cimento foi melhor que os reforçados com a polpa de cactos. Entretanto, o autor ainda considera que o uso da polpa de cactos como agente estabilizador para melhorar o comportamento da terra também é muito interessante por ser um material natural.

⁴ Bahareque ou Quincha - Similares à taipa de mão, pertencem à família dos entramados usados na América Latina. Utilizam uma estrutura independente, em peças de madeira serradas ou em bambu, e com o fechamento através de um entramado de varas mais finas de madeira, bambu ou ainda esteira de palha. O entramado é preenchido e revestido com terra (barro ou argila). Há regiões da América Latina onde a terra é misturada a fibras vegetais.

Hataf et al. (2006) realizaram uma série de testes em modelos laboratoriais para investigar a utilização de sobras de pneus para reforçar a resistência do solo. A porcentagem ideal das fibras provenientes das sobras de pneu na mistura e quais os componentes desse material influenciam nas propriedades do solo foram aspectos estudados. Ficou comprovado que a adição das tiras à terra aumenta a resistência do solo, entretanto, após certa quantidade do aditivo essa resistência começa a decrescer.

Pimentel et al. (2003) apresentaram trabalho de caracterização das propriedades físicas e mecânicas de compósitos de cimento-celulose acrescidos de um polímero acrílico pulverizado. Foram utilizados dois tipos de polpa de celulose, uma de eucalipto e outra de papel usado. Através dos ensaios com as diferentes composições analisadas, foi possível concluir que o polímero melhora as propriedades mecânicas dos compósitos com polpas de eucalipto e que houve uma significativa diminuição da absorção de água. Os resultados também mostraram que o uso do polímero melhora o desempenho final e a durabilidade dos compósitos de cimento-fibra vegetal quando comparados aos materiais convencionais.

Mattone⁵, em trabalho sobre paredes de terra crua fibro-reforçada, cita que os processos produtivos do adobe tradicionalmente são completamente manuais e que acrescentar fibras de natureza, tamanhos e quantidades diversas ao material terra é bastante fácil e não acarreta complicações especiais em nível de produção. O uso das fibras tem o fim de reduzir a fragilidade dos produtos, de limitar o fenômeno da retração e, no caso de fibras vegetais, de melhorar a cura e obter, às vezes, certa redução de peso.

Esse autor comenta que a interação entre fibra e matriz (argamassa de assentamento) é legada à aderência que pode ser estabelecida entre as duas e que esta é função da densidade da argamassa, da forma das fibras e de seu tamanho. Conclui que as fibras podem ser usadas na argamassa, no bloco ou em ambos os casos; que as fibras requerem atenção especial durante a mistura e o resultado desse processo pode influenciar na qualidade da produção; e que o uso

⁵ LA MURATURA IN TERRA CRUDA FIBRORINFORZATA: TRA TRADIZIONE E INNOVAZIONE, artigo de autoria do Prof. Roberto Mattone, encaminhado como auxílio à pesquisa, porém sem as demais referências bibliográficas. Não foi encontrado em buscas acadêmicas. Uma cópia do artigo será colocada nos anexos para consulta.

da fibra deve considerar as condições climáticas do lugar no qual vai se construir e o grau de proteção da umidade previsto no projeto arquitetônico, porque essa pode conduzir a água ao interior da alvenaria e, em situações de congelamento e degelo, pode dar lugar à desintegração do bloco ou parede.

"Você deve rezar para que o caminho seja longo, cheio de aventuras e experiências".
(Constantine Peter Cavafy)

3. Blocos de terra compactada - BTCs

3.1 Produção de BTCs

Uma das muitas possibilidades para o uso da terra para a construção é o BTC. Rigassi (1985) afirma que o bloco de terra compactada é o moderno descendente do bloco de terra adensada, mais comumente conhecido como bloco de adobe. Entretanto, a idéia de comprimir a terra para melhorar o desempenho dos blocos de terra adensada não é nada recente. Foi com o uso de socadores de madeira que os primeiros blocos de terra compactada foram produzidos, processo esse que ainda é usado em algumas partes do mundo.

Este autor apresenta um breve histórico do BTC e cita que as primeiras máquinas para comprimir a terra provavelmente datam do século 18. Na França, François Cointeraux, inventor e defensor fervoroso do *novo pise*, projetou o *Crecise*, um dispositivo derivado de uma prensa de uvas para produção de vinhos. Porém, somente no início do século 20 foram projetadas as primeiras prensas mecânicas que dispunham de tampas pesadas que pressionavam a terra dentro de moldes. Mas o ponto decisivo no uso de prensas e no conseqüente uso dos BTCs em construções e propósitos arquitetônicos veio somente a partir de 1952, com a invenção da famosa prensa CINVA-RAM, projetada pelo engenheiro Raul Ramirez.

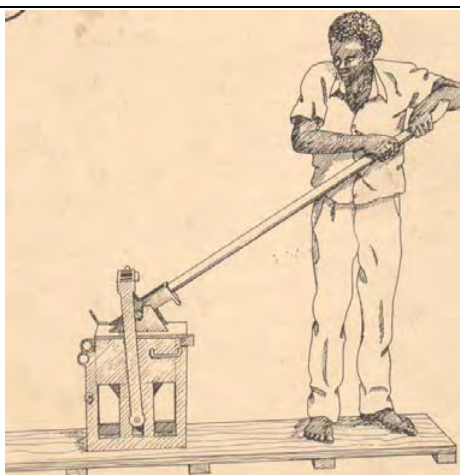


Fig. 1: Prensa CINVA-RAM (fonte: Barbosa et al. 2002).

Nos anos 70 e 80 surgem novas gerações de prensas manuais, mecânicas e motorizadas, o que possibilitou a ampliação do mercado para produção e utilização dos BTCs na construção civil.

As Normas Brasileiras não apresentam definições para Blocos de Terra Compactada - BTCs, apenas para componentes construtivos prensados de terra crua estabilizada com cimento, o chamado "solo-cimento".

A NBR 8491 (ABNT, 1994) apresenta a seguinte definição para o tijolo de solo cimento: é aquele cujo volume não é inferior a 85% de seu volume total aparente e é constituído por uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos em proporções que permitam atender às exigências desta Norma.

Já na NBR 10833 (ABNT, 1989), sobre fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica, são apresentadas duas definições para os BTCs de solo-cimento, uma para tijolo maciço e outra para bloco vazado.

As normas vigentes no Novo México para arquitetura de terra admitem, além do cimento, a utilização de vários agentes estabilizantes para BTCs, como: cal, cinzas voláteis, etc. Segundo o New Mexico Earthen Building Materials Code (NMAC, 2006) os BTCs devem resistir a, no mínimo, uma força de compressão de 2 MPa (300 lbf/pol²) para poderem ser utilizados em obras civis. Este código acrescenta dois termos aos BTCs passíveis de utilização em construções: estabilizados e não estabilizados.

O termo estabilizado é utilizado na referida norma para identificar um BTC com certa composição que após estar totalmente curado e depois de uma saturação em água (submersão em água por 4 horas) atenda aos requisitos de força descritos acima. Os blocos que atendem a estas exigências são definidos como blocos estabilizados de terra compactada. Os BTCs que após a saturação não mais atendem aos requisitos são considerados como blocos não estabilizados de terra compactada. O uso dos BTCs não estabilizados é proibido nos primeiros 10 centímetros acima do nível do chão acabado.

Já no Brasil o termo estabilizar um BTC tem outra definição. Barbosa (2003) afirma que estabilizar o solo significa misturá-lo com produtos que melhoram suas propriedades, inclusive sob a ação da água.

A Norma Técnica Colombiana NTC 5324, que regulamenta o uso de blocos de solo-cimento para muros e paredes divisórias, apresenta a seguinte definição para este tipo de BTC: Os blocos de solo cimento (BSC) são produtos de forma geralmente paralelepipedal estabilizados com cimento, obtidos por compressão estática ou dinâmica do solo em um estado úmido, seguido de desmoldagem imediata. Estes blocos são geralmente instalados com juntas e argamassa de assentamento, que servem para a construção de muros e paredes divisórias.

Segundo Rolim et al. (1999) a possibilidade de utilização de solo do próprio local constitui-se numa das grandes vantagens dos BTCs. Na produção de BTCs com a mistura solo-cimento, o solo é o elemento que entra em maior proporção, devendo ser tal que permita o uso da menor quantidade possível de cimento.

De acordo com o manual de construção com BTC, disponibilizado⁶ pelo Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical - CECAT, se o solo não tem as características ideais para a produção do BTC, este pode ser melhorado agregando um ou mais estabilizantes. A estabilização consiste em modificar as características de um solo para uma aplicação determinada.

Barbosa (2003) cita que resumidamente pode-se dizer que a qualidade desses tijolos prensados depende do: tipo de terra; da umidade de moldagem; do tipo de prensa; do tipo e percentagem de estabilizante; e da cura. Também afirma que se deve procurar o tipo de solo mais apropriado e que há certos tipos de argila, como a montmorilonita, que, quando presentes no solo, são inconvenientes para construção com terra por serem altamente expansivas.

O teor de cada componente granulométrico do solo é importante para a escolha do mais adequado ao fim desejado. Para BTCs é conveniente que este apresente plasticidade e que seu limite de liquidez não seja excessivo, de preferência menor que 40-45%. Quando o solo não se enquadra nesta faixa, pode-se fazer

⁶ Texto disponibilizado na página eletrônica do CECAT, do Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Havana, Cuba. Sem informações bibliográficas, como autoria. Disponível em: <http://www.cujae.edu.cu/centros/cecat/documentos/manualestmc/Manual%20BTC%20Portugu%C3%A9s.pdf>

uma correção granulométrica. Por exemplo, se o solo é muito argiloso, com limite de liquidez e índice de plasticidade altos, é comum misturá-lo com areia (BARBOSA, 2003).

Para cada tipo de solo ou compósito existe uma umidade de moldagem mais conveniente. Para se obterem BTCs de qualidade com um determinado solo, é necessário estabelecer a percentagem ideal de água em relação à quantidade de material a ser posta no molde da prensa. Caso se conheça a umidade ótima do ensaio de compactação estática, trabalha-se com esse dado (BARBOSA, 2003).

A quantidade e proporção de água no preparo e mistura de compósitos para produção de BTCs influenciam na trabalhabilidade, homogeneidade, coesão, absorção de água, porosidade, durabilidade e, principalmente, no desempenho físico-mecânico final dos BTCs.

Cada solo e cada composição de materiais de um compósito possuem umidades próprias de compactação, ditas "umidades ótimas", nas quais se obtém o maior rendimento da compactação, ou seja, a maior compactidade ou a maior massa específica seca. Daí a importância da definição das umidades ótimas para todas as composições de materiais cuja matéria-prima básica seja a terra.

Segundo Rigassi (1985) as propriedades mudam de um solo para outro dependendo da natureza das frações das partículas que os compõem e a complexa forma como estas se misturam e se juntam.

O solo argiloso, por apresentar maior quantidade de finos, normalmente apresenta um valor de umidade ótima superior ao valor encontrado para o solo arenoso (MILANI, 2005).

Segundo Rolim et al. (1999) os solos destinados à confecção dos BTCs de solo-cimento, após mistura com cimento e adequada homogeneização, recebem água em quantidade necessária para elevar o seu teor de umidade até o da umidade ótima do ensaio de compactação⁷.

⁷ Ensaio de compactação normal de Proctor, aplicado aos solos para determinação da massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima correspondente, de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

Os ensaios de compactação visam à obtenção dos valores de umidade ótima e de massa específica aparente seca máxima. A umidade ótima é um parâmetro muito importante nos trabalhos realizados com solos, pois propicia melhores condições de trabalhabilidade e máxima compactação do material, proporcionando maiores valores de densidade, resistência e maior durabilidade. O teor de umidade é tão significativo quanto a porcentagem de cimento, pois exerce forte influência nas características de resistência e de absorção de água (SOUZA et al., 2008).

O tipo de prensa é importante, pois, quanto maior a compactação imposta ao solo, melhor será o desempenho final do BTC. No mercado encontram-se diversos tipos de prensas, manuais e hidráulicas. Estas últimas imprimem ao solo pressões muito maiores que as manuais, resultando em produtos muito resistentes (BARBOSA, 2003).

Quanto aos estabilizantes, Barbosa (2003) afirma que um dos melhores e mais difundidos é o cimento, que trabalha reagindo quimicamente não só com a água, formando agentes cimentícios, mas também com as partículas finas do solo. Teores de 4% a 6% de cimento são capazes de produzir BTCs de excelente qualidade. A porcentagem do estabilizante depende do tipo de solo que se vai empregar. Se houver muita argila presente, é exigido no mínimo 6% de cimento, em peso. Se o solo é excessivamente arenoso, podem ser requeridas taxas maiores. Se o solo é bem graduado, 4% de cimento pode resultar em blocos de ótima qualidade.

Rigassi (1985) afirma que o cimento é provavelmente um dos melhores estabilizadores para BTCs. A adição de cimento antes da compactação melhora as características do material, particularmente sua resistência a água, graças à natureza irreversível das ligações criadas entre as partículas maiores do solo.

Na arquitetura de terra a absorção de água é uma preocupação constante, tanto pelos aspectos de salubridade e conforto quanto estruturais e de durabilidade. A absorção excessiva de água pode provocar patologias como mofo ou bolor e ainda piorar o desempenho físico-mecânico dos componentes e elementos construtivos com, por exemplo, a diminuição da resistência à compressão.

Vários são os fatores que influenciam no comportamento das construções de terra em relação à água. Porém, são muitos os exemplos de materiais utilizados

na arquitetura de terra para a redução dos índices de absorção de água ou mesmo para a impermeabilização de componentes e elementos construtivos, dos materiais sintéticos e industriais derivados do petróleo aos naturais como seivas de plantas. Para o estudo inicial do uso de aditivos redutores da absorção de água utilizou-se como referência nesta tese o trabalho de Jiménez (2008) com seivas naturais, de cacto e Aloe vera.

Jiménez (2008) apresenta um estudo comparativo do desempenho do uso de seivas do cacto de Nopal (*Opuntia rastrera* y *Opuntia ficus-indica*), conhecido como cactos de orelha, e da babosa (*Aloe vera barbadensis*) para fabricação de BTCs. Neste estudo a autora concluiu que a presença da babosa em baixas concentrações nos BTCs melhorou o comportamento dos componentes construtivos à compressão úmida e seca, diminuiu a porosidade e reduziu a absorção de água. O mesmo não ocorreu com a seiva do cacto.

Oliveira et al. (2005), em estudo sobre a seiva de cactos como aditivo de argamassas antigas, concluíram que os CPs aditivados apresentaram no ensaio de absorção de água por capilaridade uma menor velocidade de ascensão e um menor grau de saturação. Os CPs aditivados com mucilagem apresentaram bom comportamento mecânico, principalmente com relação à resistência à tração. Os autores consideraram que o aditivo estudado apresentou ação plastificante e que provavelmente esta propriedade influenciou as demais, pois uma menor adição de água acarreta normalmente em menor porosidade e, conseqüentemente, maior resistência mecânica.

Nos BTCs estabilizados com cimento outros fatores além do tipo de solo influenciam no comportamento final dos componentes construtivos na presença de água. Destaca-se a força de compactação, que repercute diretamente na densidade, porosidade e nas propriedades físico-mecânicas; a quantidade de estabilizante na mistura; e a homogeneidade da mistura.

Existem equipamentos disponíveis no mercado brasileiro desenvolvidos especificamente para a mistura de compósitos a base de terra (Fig.2). São misturadores cuja forma é bem parecida com a de uma betoneira. Porém, possuem pás internas desenhadas para evitar que o solo e demais materiais da

composição desejada ao serem misturados através de rotação vertical do tambor não se aglomerem e formem os "grumos", também chamados de "grumas".

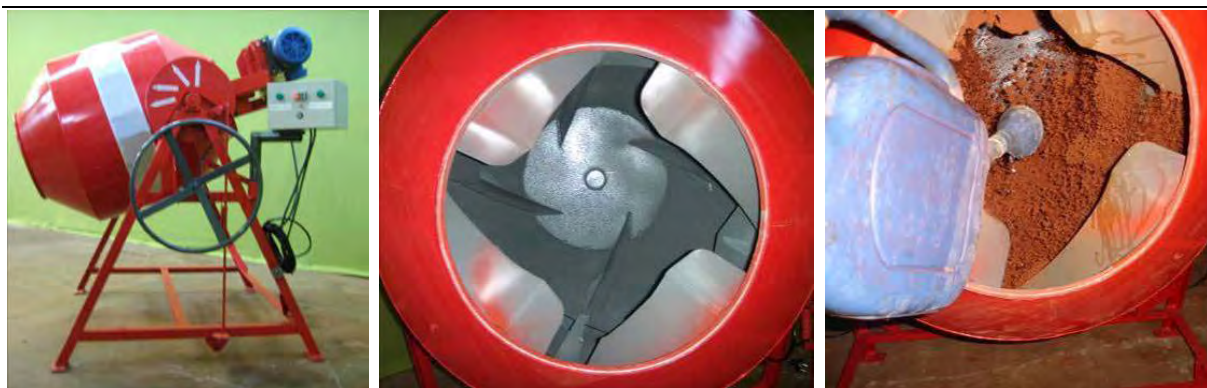


Fig. 2 – Misturador para solos com pás que evitam a formação de grumos (Fonte: Eco Máquinas).

Equipamentos onde a mistura ocorre com a movimentação e rotação de pás ou hélices e não dos recipientes onde a mistura é depositada não favorecem o aparecimento dos grumos, como é o caso das betoneiras de mistura forçada. A desvantagem deste tipo de equipamento está no custo elevado, se comparado aos das betoneiras ou misturadoras.

Tratando-se da execução de blocos de terra crua compactada utilizando compósitos do tipo "kraft + terra + cimento", os fatores mais importantes para a caracterização e definição do desempenho físico-mecânico são as proporções dos materiais que os compõem: o solo (matéria-prima básica "terra"), o estabilizante (cimento) e as fibras dispersas dos sacos de cimento (fibras longas provenientes da reciclagem de papel kraft natural). O estudo implica na determinação de propriedades físicas e mecânicas para diversas dosagens, a fim de identificar suas características, que, associadas às solicitações de uso, indicam os componentes construtivos ambientalmente mais adequados. Portanto, as variáveis de estudo envolvem as quantidades e proporções de "cimento" e "kraft", bem como as quantidades e proporções de argila e areia do "solo" a ser utilizado na mistura do Kraftterra.

Cabe ressaltar que o comportamento da variável "cimento" não será integralmente abordado neste trabalho, pois quanto maior o percentual deste material nos compósitos de terra crua para produção de BTCs maior será a estabilização e melhor será o desempenho físico-mecânico final dos componentes construtivos. Barbosa et al. (2002) comentam que a percentagem do

estabilizante depende do tipo de solo que se vai empregar e também da resistência requerida. O estudo desta variável comparece neste trabalho apenas para a definição de uma amostra-base.

Segundo Buson (2007) os BTCs são produzidos em prensas manuais ou hidráulicas que compactam os solos ou os compósitos em moldes que definem suas dimensões e formatos. Estão disponíveis no mercado máquinas para produção de diversos tipos e tamanhos de BTCs: maciços, vazados, com encaixes, lisos, de canto, curvos e outros (Fig. 3).

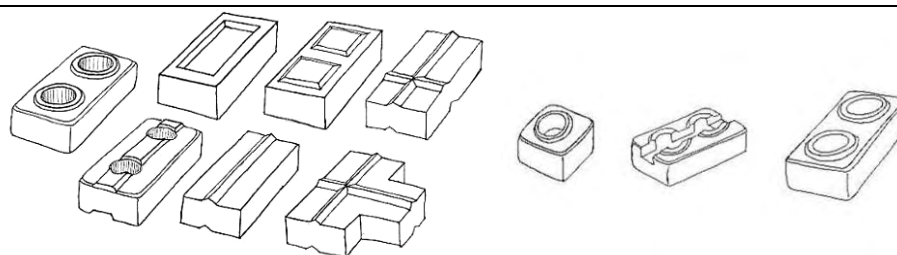


Fig. 3 - Tipos variados de BTCs. Fonte: Buson (2007).

Ao escolher um tijolo ou qualquer outro material de construção, deve-se ter em consideração a sua qualidade e custo. Porém o principal deve ser identificar quais as vantagens que o uso de tal componente pode trazer para a construção em termos de produtividade (redução de tempo de trabalho ou de mão-de-obra), de diminuição dos gastos com outros materiais, de redução de desperdícios, de resistência e durabilidade (Buson, 2007).

Dentre os diversos tipos de BTCs disponíveis, optou-se na pesquisa pelo estudo e análise dos componentes maciços lisos, uma vez que estes facilitam e simplificam os procedimentos laboratoriais, diminuem a ocorrência de eventuais erros em ensaios pela constância na forma e inexistência de vazios e permitem o estudo dos elementos de vedação com o uso de argamassa de assentamento.

3.2 Solos para BTCs

Segundo Solà (2002), em estudos com a arquitetura de terra estabilizada, ao aplicar o cimento como estabilizante é possível obter melhor desempenho final dos componentes construtivos, em ordem decrescente, com o uso de solos do tipo Caolinitas, Cloritas, Montmorilonitas e Ilitas. Acrescenta também que as estruturas mais duráveis formadas por argilas puras estabilizadas com cimento

Portland, em ordem decrescente, são as constituídas por Cloritas, Haloisitas, Caolinitas e Ilitas.

Caputo (1988) comenta que as Caolinitas (Al_2O_3 , 2SiO_2 , $2\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$) são formadas por unidades de silício e alumínio, que se unem alternadamente, conferindo-lhes uma estrutura rígida. Em consequência, as argilas caoliníticas são relativamente estáveis em presença de água.

Stulz; Mukerji (1993) afirmam que dos diversos tipos de terra que se formam nos trópicos e sub-trópicos, a laterita é de especial interesse para a construção. Estas são terras altamente expostas à intempérie, que contêm grandes proporções, embora extremamente variáveis, de óxidos de ferro e alumínio, assim como quartzo e outros minerais. As cores podem variar desde ocre até vermelho, marrom, violeta a negro, dependendo grandemente da concentração de óxido de ferro.

Segundo estes autores quanto mais escura é a laterita, mais dura, pesada e resistente à umidade será. Também afirmam que as lateritas tendem a endurecer quando expostas ao ar. Na Índia, por exemplo, os solos são cortados *in situ* já no formato de blocos, são deixados para endurecer ao ar livre e em seguida são utilizados para construção de muros de alvenaria. Por isso o nome "laterita" foi derivado da palavra "later", termo em latim para "tijolo".

Segundo Campos (2007), em função da geologia e dos processos tectônicos e metalogenéticos a região do Distrito Federal apresenta virtual deficiência em bens minerais. Dentre as principais mineralizações e ocorrências minerais destacam-se o calcário, a areia fina, a argila, o cascalho e o ouro. As argilas são formadas pela acumulação em vales fluviais ou pela alteração *in situ* de porções argilosas. Nesses casos a ação das águas de infiltração de chuvas é responsável pela transformação das micas e cloritas em argilo-minerais do grupo da Caolinitas que apresentam inúmeras aplicações na indústria cerâmica e na fabricação de cimento do tipo pozolânico.

Campos e Silva (2007) citam que o Grupo Canastra ocupa cerca de 15% da área total do DF, sendo distribuído pelos vales dos rios São Bartolomeu (na porção central do DF) e Maranhão (na porção Centro-Norte do DF). É constituído

essencialmente por filitos⁸ variados, os quais incluem clorita filitos, quartzofengita filitos e clorita-carbonato filitos.

Martins (2000) afirma que as seqüências verticais que ocorrem sobre os filitos do Grupo Canastra constituem variações verticais do rególito⁹, típicas de perfis lateríticos¹⁰ convencionais. Segundo este autor os solos do Grupo Canastra são predominantemente lateríticos.

Entretanto, independentemente do tipo de terra, este sempre se compõe de partículas de diferentes tamanhos e natureza. Entretanto, mesmo que a maioria dos solos lateríticos seja adequada para utilização como material de construção, em alguns casos requer-se aumentar ou retirar certos elementos para melhorar sua qualidade (STULZ; MUKERJI, 1993).

Um dos vários critérios para seleção de solos apresentado pelo CEPED (1999) recomenda solos com limite de liquidez abaixo de 45%. Os limites de consistência são as variáveis que mais expressam as condições de trabalhabilidade. Maiores valores destes limites significam maiores dificuldades no destorroamento, mistura e também na secagem.

Porém, segundo a ABCP (1985) os solos mais arenosos são os que se estabilizam com menores quantidades de cimento, sendo necessária a presença de argila na sua composição, visando dar, à mistura, quando umedecida e compactada, coesão suficiente para a imediata retirada das fôrmas.

O CEPED (1999) cita que os solos mais indicados para o solo-cimento são os arenosos; que o consumo de cimento depende fundamentalmente do tamanho dos grãos e da sua uniformidade; e que o acréscimo nos teores de silte e argila, ou a ocorrência de grãos muito uniformes, acarretam um aumento nos teores de cimento. Entretanto, também comenta que os solos devem ter um teor mínimo da fração fina, pois a resistência inicial do solo-cimento compactado é devida à coesão da fração fina compactada.

⁸ Filitos: Rocha folheada que é intermédia em composição e textura entre ardósia e xisto (Fonte: Dicmax, dicionário eletrônico Michaelis).

⁹ Rególitos: Camadas de material solto que cobrem a superfície do globo e repousam sobre rochas sólidas (Fonte: Dicmax, dicionário eletrônico Michaelis).

¹⁰ Laterita: Solo infértil vermelho, das regiões tropicais, que é um produto residual da decomposição de rocha (Fonte: Dicmax, dicionário eletrônico Michaelis).

O CEPED (1999) apresenta critérios para seleção dos melhores solos quanto à granulometria, com uma compilação de diversas fontes, como: CINVA, ICPA, CEPED, MERRIL e HOUBEN. O teor de areia recomendado pelo CINVA varia de 45 a 80%; pelo ICPA de 60 a 80%; pelo CEPED de 45 a 90%; por MERRIL acima de 50%; e por HOUBEN de 40 a 70%. Já para o teor de argila o ICPA recomenda uma variação de apenas 5 a 10%, enquanto HOUBEN trabalha com valores de 20 a 30% e o CEPED com valores menores que 20%. O CINVA admite um teor de silte mais argila entre 20 e 55% e o CEPED de 10 a 55%.

Considerou-se neste trabalho que os critérios para seleção do solo quanto à granulometria para a produção de BTCs ainda não estão bem definidos ou resolvidos e que para o estudo de caracterização de um novo compósito deveriam ser analisadas diferentes composições de solos, do argiloso ao arenoso.

*"Não se pode criar experiência. É preciso passar por ela".
(Albert Camus)*

4. Materiais e métodos

4.1 Reciclagem dos sacos de cimento

A primeira etapa do processo de reciclagem passa pela limpeza dos sacos de cimento, os quais normalmente são descartados ainda com algum resto de cimento no fundo das embalagens, principalmente entre as dobras de fechamento dos sacos. Este cuidado é mais necessário com as embalagens que foram expostas à umidade excessiva ou tiveram contato com a água hidratando os restos de cimento e formando pedriscos ou até grandes placas rígidas no fundo dos sacos. Este material sólido pode provocar danos ao equipamento de reciclagem. Esta etapa requer cuidados no manuseio dos sacos para se evitar contaminações. Faz-se necessário o uso de equipamentos de segurança, como luvas, óculos, máscaras e roupas adequadas.

Em seguida à limpeza das embalagens passa-se para a etapa de transformação dos sacos de cimento em polpa de celulose, a qual consiste basicamente na dispersão das fibras do papel kraft natural multifolhado. A dispersão é feita com a imersão dos sacos de cimento em água e posterior agitação até a total separação das fibras do papel. Não se faz necessária qualquer adição de produtos químicos ou aquecimento da água.

Foi utilizado um liquidificador industrial com cuba de 4 litros e uma fragmentadora de papel e o processo consistiu em: 1) Fragmentação do papel em pedaços não maiores que 5 centímetros ou em tiras ou partículas com alguns milímetros de largura; 2) Colocação do papel fragmentado de molho em água por algumas horas para amolecer as fibras; 3) Trituração do papel no liquidificador industrial até chegar à consistência de polpa de celulose. Na Fig. 4 ilustra-se a trituração dos sacos de cimento, já em pedaços, e as composições do papel kraft fragmentado de molho e da polpa de celulose.



Fig. 4 – Trituração do papel em liquidificador industrial (esq.); Kraft fragmentado de molho e polpa de celulose ao final do processo (dir.).

O processo para a produção da polpa de celulose consome muita água. São necessários cerca de 3 litros de água para cada saco de cimento ou 150 gramas de papel kraft. Por questões ambientais é recomendável a reutilização da água o maior número de vezes. Não são necessários quaisquer outros materiais ou produtos químicos no processo, visto que não é necessária a etapa de branqueamento da polpa.

Para a reciclagem de uma quantidade maior de sacos de cimento também foram utilizados na pesquisa outros dois equipamentos similares: um liquidificador industrial com copo reclinável de 25 litros e um misturador com copo de 30 litros com dreno (Fig. 5). Estes equipamentos exigiram picotamento e molhagem prévia dos sacos de cimento para se evitar sobrecargas.



Fig. 5 – Misturador com dreno no copo (esq.); Liquidificador com copo reclinável para retirada do material (dir.)

Nas etapas de fabricação dos BTCs e execução das paredes de Kraftterra desenvolvidas em Aveiro, as quais exigiam uma escala maior de produção, foi utilizado um misturador/agitador com tanque de 1m³ e capacidade para receber

até 50 Kg de papel de uma só vez. Com este equipamento várias etapas do processo anteriormente utilizadas foram eliminadas. Os sacos foram diretamente inseridos no tanque sem a necessidade da embalagem ser picotada ou previamente molhada. Em poucos minutos o equipamento conseguia dispersar as fibras de mais de trezentos sacos de cimento. O único procedimento realizado com os sacos foi a retirada dos restos de cimento normalmente depositados nos fundos dos sacos, principalmente aqueles que já se encontravam endurecidos.

Na Fig. 6 é possível perceber a presença de pequenos pedriscos de cimento endurecido entre as fibras dispersas, resultado de um processo de polpação onde os sacos de cimento não foram previamente limpos. Os restos de cimento endurecidos acabaram por serem triturados durante a reciclagem e se transformando em pedriscos.



Fig. 6 – Presença de pedriscos de cimento endurecido entre as fibras dispersas após processo de reciclagem onde os restos de cimento não foram retirados previamente dos sacos.

Caso os restos de cimento não tenham sofrido hidratação, os mesmos podem ser aproveitados para a fabricação de BTCs. Durante as etapas de limpeza foram encontradas excessivas quantidades de resto de cimento em alguns dos sacos. Nos casos que mais chamaram atenção a quantidade de cimento equivalia a aproximadamente 2% da quantidade de cimento da embalagem. A falta de cuidado no manuseio dos sacos de cimento nas obras pode resultar neste tipo de desperdício.

O misturador utilizado consiste em um tanque de aço inoxidável com uma hélice que produz um turbilhão d'água capaz de dispersar as fibras dos papéis ali misturados. Também possui um dreno com registro para facilitar a retirada da

mistura. A hélice está fixada num eixo vertical e este é girado com o auxílio de um motor elétrico. As pás da hélice não são afiadas, o que evita o corte ou a diminuição das fibras dos papeis quando da transformação em polpa de celulose, como pode ser visto abaixo no detalhe da Fig. 7.



Fig. 7 – Misturador de papel da RAIZ / Vista do interior do tanque / Detalhe da hélice com sentido de rotação.

Para a escala de produção dos BTCs foi desenvolvido um misturador/agitador com capacidade para processar um volume de mistura de até 200 litros e 10 Kg de sacos de cimento ao mesmo tempo (Fig. 8, esq. e centro). Com o intuito de oferecer um processo construtivo a custo acessível propôs-se a reutilização de tambores industriais metálicos de 220 litros e a produção de um suporte metálico desenhado para acoplar ao tonel um motor trifásico de 1,5 HP e eixo rotativo com pás. Existem diversos agitadores, nacionais e importados, que conseguem transformar os sacos de cimento em polpa de celulose em tonéis industriais de 220 litros. Os modelos mais simples encontrados no mercado brasileiro apresentam custos não tão elevados¹¹, mesmo para uma pequena escala de produção.

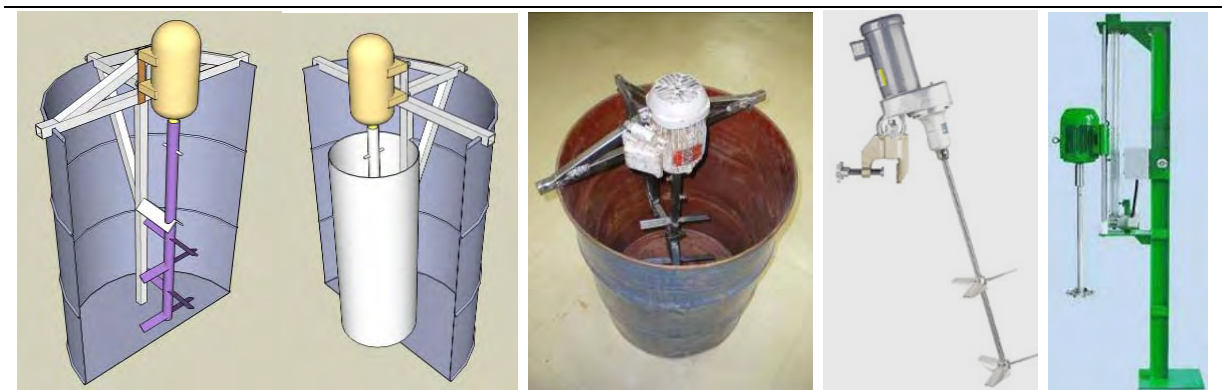


Fig. 8 – Protótipo de agitador desenvolvido na pesquisa (esq. e centro); Exemplos de agitadores disponíveis no mercado brasileiro que podem ser acoplados à tonéis industriais metálicos de 220 litros (dir.).

¹¹ Um agitador com motor de 5 Hp; eixo rotativo e hélice com disco tipo COWLLES em aço inox 304; e suporte para tambor em aço carbono pintura epóxi foi orçado em R\$3.300,00 (agosto/09) .

Após a transformação dos sacos de cimento em polpa de celulose deve-se retirar o excesso de água da mesma. Nas etapas de caracterização do Kraftterra no Laboratório de Geotecnia (pequena escala) este processo foi feito com a utilização de um tecido ou bobina geotextil de aproximadamente 80 cm de comprimento, conforme seqüência apresentada na Fig. 9. A polpa de celulose com excesso de água é colocada dentro da bobina e através de torção manual é possível retirar o excesso de água da polpa. Também foram utilizados sacos de polipropileno trefilado, material de baixo custo bastante utilizado no ensacamento de batatas e grãos, mas este material não apresentou boa resistência aos esforços de torção e com poucos usos acabaram por se romper inviabilizando a operação.



Fig. 9 – Polpa de celulose no liquidificador industrial; Bobina geotextil; Colocação da polpa na bobina geotextil; Retirada do excesso de água com a torção manual da bobina; Polpa sem o excesso de água.

Nas etapas de fabricação dos BTCs foi utilizada uma centrífuga de eixo vertical para a retirada do excesso de água de uma quantidade bem maior de polpa de celulose ao mesmo tempo. Imediatamente após a transformação dos sacos em polpa de celulose a mistura era colocada em um grande recipiente com peneira metálica (Fig. 10, esq.) para a primeira retirada do excesso de água. Em seguida a mistura era depositada dentro de sacos de lona crua (Fig. 10, centro) e estes levados até a centrífuga (Fig. 10, dir.), onde após 3 minutos de centrifugação a polpa apresentava teor de água adequado à produção do Kraftterra.



Fig. 10 – Recipiente com peneira metálica e dreno com válvula (esquerda); Saco de lona crua com polpa ainda com excesso de água sendo colocado na centrífuga (centro); Centrífuga de eixo vertical (direita)

Ao buscar alternativas econômicas para esta etapa da produção do Kraftterra, foi encontrado um conceito de sistema que utiliza uma bicicleta para girar o eixo de uma lavadora e secadora de roupas (Fig. 11), a qual possui um tambor permeável. No lugar da bicicleta pode-se optar por um motor elétrico de baixa potência. Todavia, protótipos ainda têm que ser produzidos e testados para se definir custos e viabilidade técnica. A citação deste exemplo mostra que solução técnica de baixo custo pode ser viável.



Fig. 11 – Lavadora e secadora de roupas movida à bicicleta. Projeto “Cycleclean” desenvolvido por Alex Gladson (Fonte: <http://www.cycleclean.biz/mainmenu.html>, 2009).

Para facilitar a incorporação das fibras ao solo durante o processo de mistura do Kraftterra e se obter misturas mais homogêneas deve-se dispersar as fibras do papel kraft após a retirada do excesso de água da polpa de celulose.

Em laboratório essa dispersão foi feita com o uso de uma argamassadeira de movimento planetário (Fig. 12). A polpa de celulose foi batida sem o excesso de água até as fibras ficarem soltas e serem facilmente visualizadas.



Fig. 12 – Polpa de celulose sem o excesso de água; Dispersão das fibras na argamassadeira; Fibras dispersas.

Para uma escala maior, a da produção dos BTCs de Kraftterra, foi utilizado um triturador de resíduos sólidos de 1,5 Hp monofásico (Fig. 13), bastante utilizado para triturar pequenos galhos e folhas em serviços de jardinagem. Com o uso

desse equipamento consegue-se uma excelente dispersão das fibras. Este tipo de equipamento é facilmente encontrado no Brasil a custos baixos. Um equipamento novo vale aproximadamente R\$700,00 (preço de agosto de 2009).



Fig. 13 – Triturador de folhas e galhos utilizado no DECivil/UA (esq.) e detalhes (centro); Triturador utilizado na UnB (dir.), Fonte: página eletrônicas dos fabricantes, marcas apagadas digitalmente.

Quanto mais eficiente for a retirada da água em excesso da polpa de celulose mais fácil será o processo de dispersão das fibras. Entretanto deve-se evitar que a polpa esteja totalmente seca, pois isso dificulta o processo de mistura do novo compósito.

4.2 Escolha e caracterização dos solos

Optou-se neste trabalho pelo uso de solos lateríticos do tipo Cloritas e/ou Caolinitas.

Dentro do Distrito Federal escolheu-se o Grupo Canastra para a coleta de amostras (Fig. 14), mais especificamente a Região Administrativa de São Sebastião, onde são encontradas muitas olarias que fabricam blocos e tijolos cerâmicos, sendo que algumas delas produzem BTCs de solo-cimento.

Como já citado anteriormente, considerou-se neste trabalho que os critérios para seleção do solo quanto à granulometria para a produção de BTCs não estão bem definidos e que para o estudo de caracterização de um novo compósito deveriam ser analisadas diferentes composições de solos, do argiloso ao arenoso. Para isso optou-se pela correção do solo original (Grupo Canastra) através da adição de areia. Trabalhou-se, então, com solos corrigidos com teor de argila de 15, 20, 30, além do solo natural com 45% de argila.

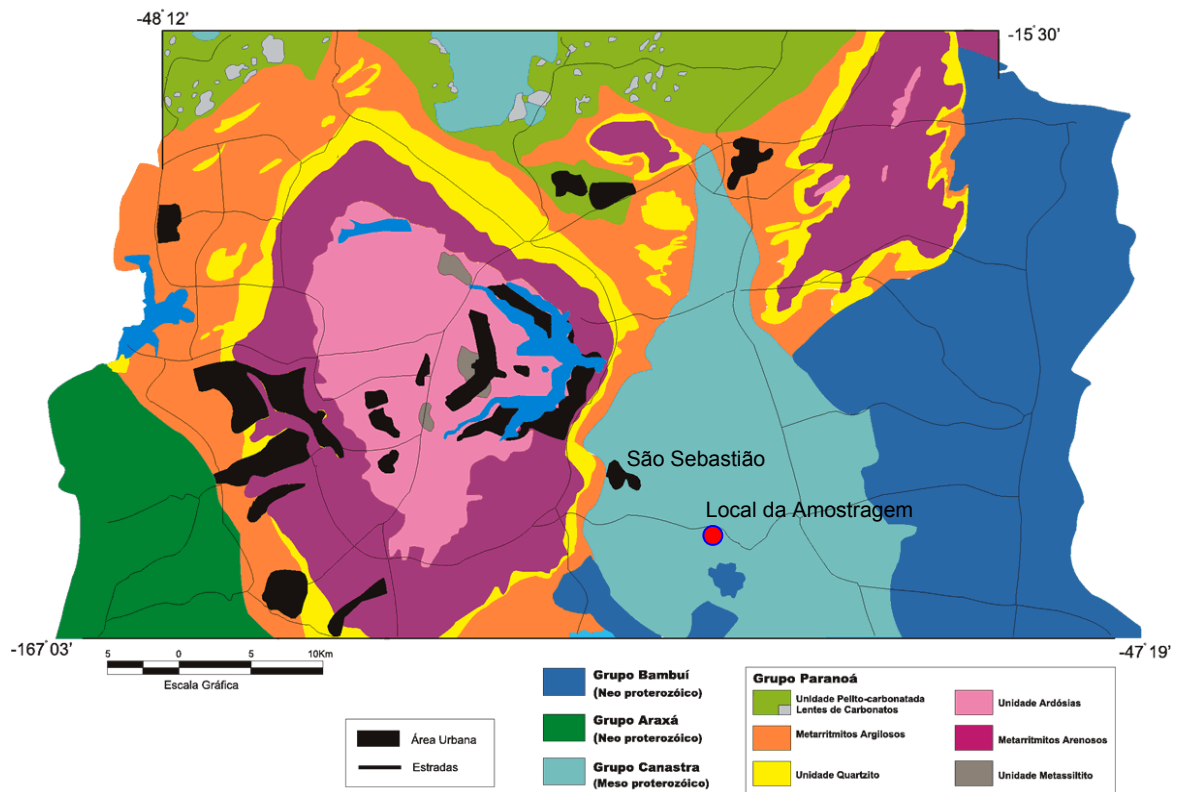


Fig. 14 – Mapa Geológico Simplificado da Região do Distrito Federal com indicação do local da amostragem.

Para os estudos realizados na Universidade de Aveiro, Portugal, com os BTCs e elementos de vedação a escolha do tipo de solo deveu-se, em parte, pela pouca oferta de solos com adequada presença de argila na composição. A região de Aveiro tem solos predominantemente arenosos com percentuais de silte e argila muito baixos. Tradicionalmente na arquitetura de terra produzida há séculos nesta região, com blocos de adobe, utilizavam-se solos com percentuais de argila e silte inferiores a 5% e os mesmos tinham que ser estabilizados com uma grande quantidade de cal.

O procedimento utilizado para conferir a seleção do solo foi o Ensaio da Caixa descrito pelo CEPED (1999) e por outros autores como procedimento para análise das características e comportamentos de solos quanto à retração (Fig. 15).

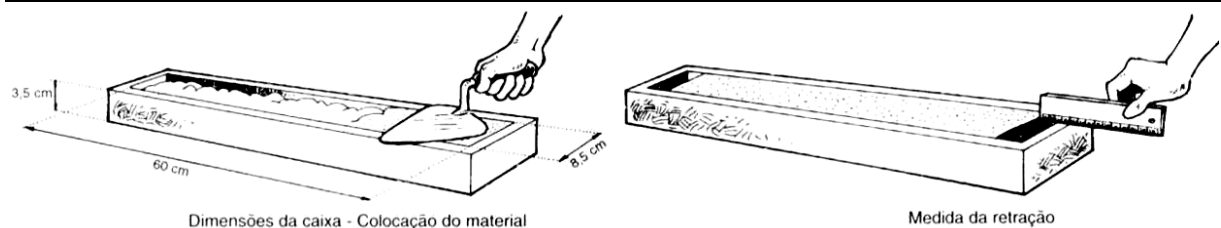


Fig. 15 – Ensaio da Caixa (fonte: Boletim Técnico da ABCP, BT-110).

O CEPED (1999) afirma que caso a retração total não ultrapasse 2 cm e não apareçam trincas nos corpos-de-prova, o solo poderá ser utilizado para a produção de componentes e elementos construtivos.

A retração linear foi o primeiro aspecto a ser analisado e iniciou o programa experimental piloto. Esse programa teve como objetivo a definição de uma *amostra-base* de Kraftterra.

O trabalho com essa amostra-base propiciou uma organização racional e econômica do tempo em laboratório, uma vez que se iniciaram os diversos ensaios com apenas uma composição potencialmente adequada para caracterização do novo compósito. Esta amostra-base serviu literalmente de base para os estudos e análises iniciais do compósito e os valores da sua caracterização foram utilizados como parâmetros para comparações quando da introdução das variáveis de estudo.

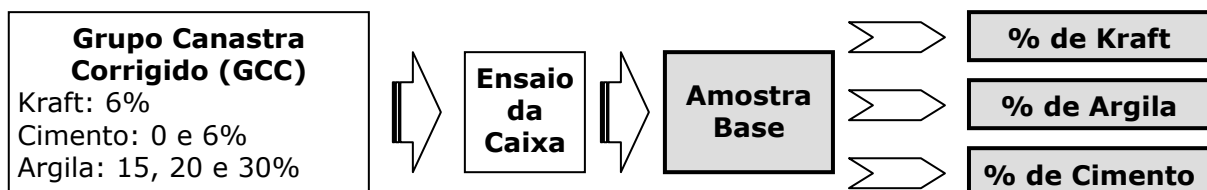
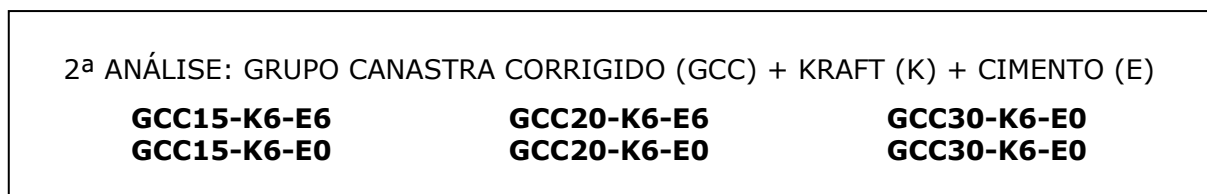
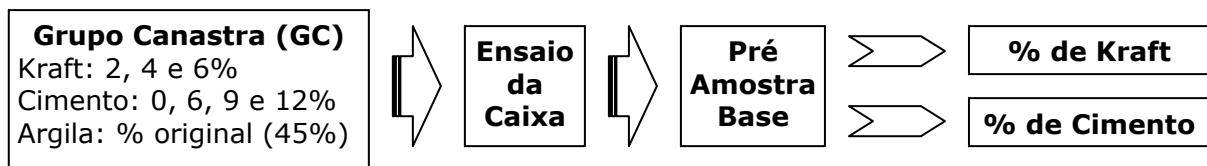
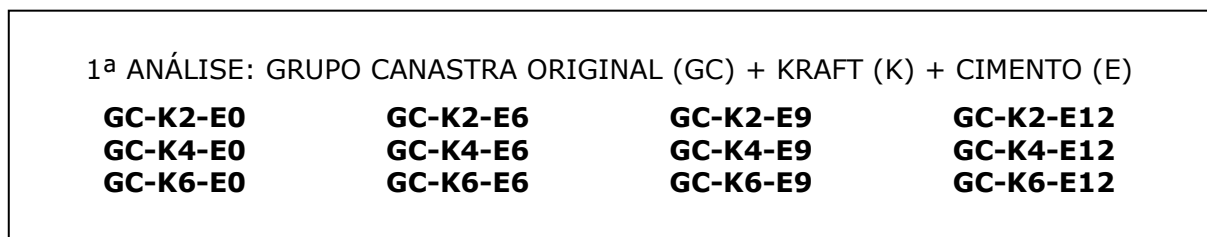
Para escolha da amostra-base foram realizados ensaios com CPs de compósitos com solos com granulometrias variadas (solo natural do Grupo Canastra e solos corrigidos com adição de areia), kraft (fibras dispersas da polpa de celulose proveniente da reciclagem de sacos de cimento) e estabilizante (cimento). O compósito com as melhores características quanto à retração foi definida como a amostra-base. O estudo utilizou esta característica como parâmetro inicial tendo em vista a importância da estabilidade volumétrica quando se trabalha com componentes e elementos construtivos.

O estudo inicial utilizou percentuais de fibras dispersas de Kraft de 2%, 4% e 6% em massa (K0, K2, K4 e K6), tendo como referência a massa de solo de cada mistura. Já para o cimento foram utilizados os percentuais em massa de 12%, 9%, 6% e 0% (E12, E9, E6 e E0), o que equivale a traços em volume de solo-cimento respectivamente de 1:8, 1:12, 1:16 e sem estabilizante. Na região de Brasília e entorno é usual a fabricação de blocos e tijolos de solo-cimento com traço em volume de 1:8, o que pode ser considerado como um uso exagerado de cimento.

Para verificação inicial da retração utilizaram-se solos com granulometria e percentuais de argila e areia diferenciados. A análise granulométrica da amostragem original do Grupo Canastra (GC) indicou um percentual de argila,

areia e silte de aproximadamente 45%, 42% e 13%, respectivamente. Foram preparados outros três tipos de amostras com a correção da amostra de solo natural (Grupo Canastra Corrigindo – GCC) através de adição de areia até se alcançar percentuais de argila de 30%, 20% e 15% (GCC30, GCC20 e GCC15).

O fluxograma abaixo representa a seqüência de análises para a definição da “amostra-base”.



O comportamento quanto à retração e o ensaio da caixa também foram utilizados como referência no programa experimental piloto, descrito mais adiante, para a definição de uma amostra-base de Kraftterra. Os procedimentos do ensaio foram adaptados para análise de compósitos de Kraftterra e solo-cimento.

O ensaio da caixa adaptado aos compósitos tem o seguinte procedimento: 1) Toma-se aproximadamente 3 kg de solo destorroado e peneirado (malha 4,8mm) e utilizando-se, por exemplo, uma argamassadeira mistura-se a polpa de celulose e/ou cimento; 2) Adiciona-se água aos poucos, até que a mistura adquira a consistência de argamassa de reboco; 3) Coloca-se o material numa caixa de madeira (ver dimensões na Fig. 12) previamente lubrificada (óleo diesel ou vaselina pastosa), distribuindo-o uniformemente com uma colher de pedreiro até preencher todo o volume interno da caixa, rasando a superfície com uma régua de madeira; 4) Levanta-se e deixa cair uma das extremidades da caixa de uma altura aproximada de 7 centímetros por 10 vezes, repetindo a operação com a outra extremidade; 5) Guarda-se a caixa ao abrigo do sol, da chuva e do vento durante 7 dias; 6) Faz-se a medida da retração nos dois lados no sentido do comprimento da caixa.

Com a adaptação do ensaio da caixa para definir o comportamento dos diferentes compósitos à retração linear, também se optou pela continuidade das medições das retrações até os 28 dias para se ter mais um parâmetro para as análises comparativas, ou seja, o tempo de estabilização.

4.3 Processo de preparo e mistura do Kraftterra

O processo de mistura do novo compósito durante as etapas de caracterização do Kraftterra foi realizado em ambiente laboratorial com uma argamassadeira de movimento planetário (Fig. 16, esq.). Já nas etapas de produção dos BTCs foi utilizada uma betoneira portátil com capacidade para 80 litros (Fig. 16, dir.), onde se consegue misturar de uma só vez um volume de compósito suficiente para produção de 12 BTCs de Kraftterra ou 10 BTCs de solo-cimento a cada 5 minutos.



Fig. 16 – Kraftterra sendo misturado em argamassadeira (esq.); Detalhe do início do processo de mistura do Kraftterra (centro); Betoneira portátil (capacidade 80 litros) para misturar o Kraftterra para uma pequena escala de produção de BTCs (dir.).

Com o uso da betoneira cuidados devem ser tomados para se conseguir misturas homogêneas. Somente com a produção dos BTCs foi possível perceber que se a mistura fica girando por um tempo um pouco maior que o tempo necessário para a homogeneização do compósito, esta começa a apresentar “grumos”, ou pequenas bolas normalmente constituídas de um só material. Quanto maior a ocorrência dos grumos numa mistura menos homogênea esta resultará.

Observa-se na Fig. 17 uma mistura de Kraftterra em betoneira onde propositalmente buscou-se a formação dos grumos para se poder avaliar o nível de homogeneidade com a formação dos mesmos. Para isso foi colocada na mistura uma quantidade de água um pouco acima da indicada (umidade ótima) e a betoneira ficou ligada por um tempo superior ao recomendado. Após análise constatou-se a formação de pequenas bolas onde o material “solo” predominava e outras bolas onde as fibras de papel predominavam. Ou seja, a mistura não resultou homogênea.



Fig. 17 – Formação de grumos em mistura de Kraftterra em uma betoneira.

Para a compactação dos BTCs com misturas que apresentaram grumos é recomendado que estes sejam desfeitos e o material seja mais uma vez misturado até homogeneização. A Fig. 18 mostra uma compactação feita de material com grumos e os BTCs com vazios e problemas na compactação que prejudicam o desempenho final do componente construtivo.



Fig. 18 – BTCs produzidos com mistura de Kraftterra que apresentava grumos.

Para a correta produção dos BTCs com o Kraftterra deve ser observada a ordem de colocação dos materiais na mistura, a qual influencia na eficiência e homogeneidade do compósito. Também é necessário um controle rígido para se garantir a umidade adequada da mistura, uma vez que a umidade do compósito atua diretamente no desempenho final e nas propriedades físico-mecânicas dos componentes construtivos e elementos de vedação vertical.

Após diversas tentativas chegou-se ao roteiro mais eficiente para a ordem de colocação dos materiais na mistura do Kraftterra. Primeiramente devem-se colocar as fibras dispersas no equipamento misturador e iniciar a rotação do mesmo. Em seguida acrescenta-se uma pequena parte do solo já misturado ao cimento para se cobrir uniformemente as fibras dispersas com uma fina camada de solo, evitando-se assim que as mesmas se aglomerem. Aos poucos se deve acrescentar à mistura todo o solo já misturado ao cimento e deixar o misturador ligado até ficar a mistura homogênea. Após esse período deve-se acrescentar aos poucos a água necessária para se chegar à umidade ideal de compactação. Recomenda-se colocar a água com algum sistema de pulverização ou dispersão para evitar a saturação da mistura em pontos localizados. Rigassi (1985) cita que para uma boa distribuição da umidade na mistura, a água deve ser borrifada ou adicionada na forma de vapor. Com a mistura homogênea

retira-se o compósito do equipamento e inicia-se o processo de compactação dos BTCs.

Durante o processo de colocação do solo na mistura deve-se evitar a produção de poeira pelo equipamento misturador. Caso isso ocorra significa que a mistura está muito seca, o que dificulta a incorporação das fibras ao solo e a homogeneização do compósito. Para evitar que este fato ocorra deve-se acrescentar parte da água necessária antes de se colocar toda quantidade de solo na mistura.

O processo de mistura e produção de BTCs de solo-cimento é simples e muito semelhante em todo o mundo. Já para a fabricação dos BTCs de Kraftterra esse processo sofre pequenos ajustes, como descrito acima. Resumidamente pode-se afirmar que para produção de BTCs misturam-se as quantidades e proporções adequadas dos materiais e da água e logo em seguida procede-se a compactação da mistura em prensas manuais ou hidráulicas.

Entretanto, um estudo sobre dosagem de solo melhorado com cimento feito por Pitta e Nascimento (1983) indica que se a mistura úmida solo + cimento for deixada solta por algum tempo antes de ser compactada, o solo – principalmente os mais finos – tem suas características de granulometria transformadas, produzindo melhores condições de compactação e influenciando nas propriedades físico-mecânicas finais dos BTCs.

Procedeu-se então análise comparativa do desempenho entre amostras de Kraftterra com e sem o processo de preparo contendo um período de cura com a mistura solta. Foram comparadas as médias dos valores máximos da tensão de ruptura à compressão simples dos vários CPs estudados e os resultados mostraram que a inclusão do procedimento de cura com mistura solta não influencia no desempenho do novo compósito Kraftterra para a produção de BTCs quanto à resistência à compressão simples, o que resulta na não recomendação desse procedimento para o preparo do Kraftterra para a produção de BTCs.

4.4 Proporções e traços

As variáveis da mistura (tipo de solo e percentuais de kraft e cimento) foram introduzidas para que fossem definidas as proporções ideais ou mais adequadas ao uso do Kraftterra enquanto matéria-prima para a produção de BTCs.

Tratando-se do estudo de um novo compósito, sem caracterização definida ou normas específicas, optou-se pelo uso de análise comparativa entre o desempenho do Kraftterra e o material do qual o mesmo se derivou, ou seja, o solo-cimento. Para cada composição diferente de Kraftterra foram produzidos e ensaiados CPs com traços e proporções iguais de solo e cimento e o desempenho das composições e dos componentes foi comparado.

Das variáveis da mistura estudou-se inicialmente a variável solo e a influência de diferentes percentuais de argila e areia na composição do solo dos compósitos de Kraftterra e de solo-cimento. Trabalhou-se com amostras de solos que continham 15%, 30% e 45% de argila na composição, sendo este último o solo natural do Grupo Canastra e os outros dois solos resultantes da correção deste solo natural com a adição de areia. Em seguida estudou-se a variável Kraft.

4.5 Absorção de água - CPs

Foi utilizada como referência a NBR 13555 (ABNT, 1996), a qual determina que após o período de cura de sete dias em câmara úmida, os corpos-de-prova devem ser levados à estufa até atingir massa constante, obtendo-se assim a massa "m1", em gramas. Imergir os corpos-de-prova no tanque durante 24 horas. Após retirá-los da imersão, enxugá-los superficialmente com um pano úmido e pesá-los antes de decorridos 3 minutos, obtendo-se assim a massa do corpo-de-prova úmido "m2", em gramas. Determinar o valor da absorção d'água, A, de cada corpo-de-prova, expresso em porcentagem, através da equação (1):

$$A = \frac{m2 - m1}{m1} \cdot 100 \quad (1)$$

Para reconhecer melhor a influência da inclusão das fibras dispersas de papel kraft no comportamento de compósitos a base de terra crua quanto à absorção de água foram realizados outros ensaios com CPs de solo natural do Grupo Canastra (45% de argila) e de Kraftterra (GC + 6% de kraft), mas desta vez

sem a adição de cimento. Foram definidos os valores das “umidades ótimas” dos diferentes materiais e compósitos através de ensaios de compactação (NBR 12023 – ABNT, 1992) e os corpos-de-prova cilíndricos foram produzidos de acordo com estes valores.

4.6 Resistência à compressão simples - CPs

Com os procedimentos iniciais foi possível perceber a grande influência que os valores de umidade das misturas produzem no desempenho dos corpos-de-prova em ensaios de resistência à compressão simples. Pequenas variações nos percentuais de água das misturas repercutem em grandes alterações nos valores de tensão máxima de ruptura dos CPs. Devido à dificuldade em se controlar os percentuais de água presentes no solo e, principalmente, nas fibras dispersas de papel kraft após todas as etapas da reciclagem dos sacos de cimento, optou-se, então, pela execução de ensaios de compactação sem a reutilização de material e com a preservação dos corpos-de-prova para posterior realização de ensaios de resistência à compressão simples. Utilizou-se como referência a NBR 12023 (ABNT, 1992).

Somente com este procedimento foi possível garantir a correta definição do desempenho das diferentes composições de materiais para uma adequada análise comparativa entre o Kraftterra e o solo-cimento. Além disto, foi possível obter-se as relações entre as tensões máximas de ruptura à compressão simples e os percentuais de umidade das diferentes misturas de cada compósito. Para cada composição foi possível estabelecer o percentual de água ideal da mistura com o qual se chega aos maiores valores de resistência à compressão simples.

Para esclarecer melhor o afirmado anteriormente na Fig. 19 apresentam-se gráficos com as variações da resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos de solo-cimento e de Kraftterra produzidos com traços idênticos e percentuais de umidades variados. Com os CPs de BTCs de solo-cimento foram registradas diferenças nos valores da tensão máxima de ruptura à compressão simples da ordem de 142,5% (de 0,80 para 1,94 MPa) e de 66,7% (de 1,44 para 2,4 MPa) com os de Kraftterra. Também é possível perceber nos gráficos que a maior variação no desempenho dos BTCs ocorreu com o excesso de água, ou seja, com a mistura que apresentava umidade acima da “umidade ótima”. Cabe

ressaltar que as variações apresentadas acima quanto à resistência dos BTCs ocorreu com o acréscimo de apenas 4 pontos percentuais de umidade.

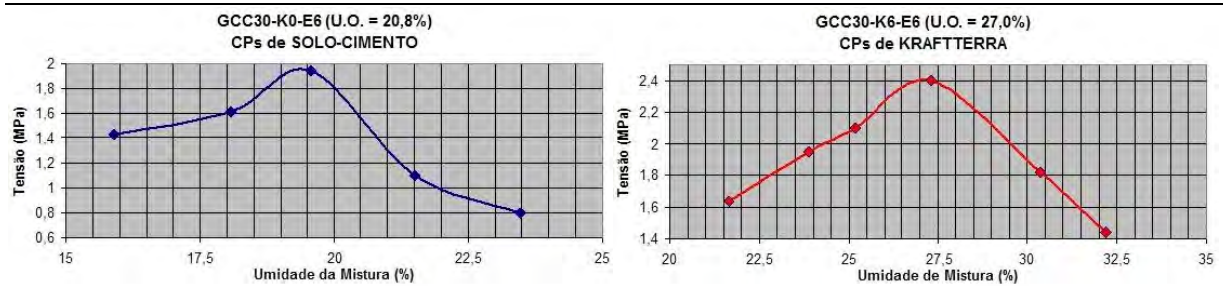


Fig.19 - Variações da resistência à compressão simples e respectivas umidades das misturas de corpos-de-prova cilíndricos de Solo-cimento (esquerda) e de Kraftterra (direita) produzidos com mesmo solo e mesma proporção de cimento. Umidade ótima da composição de solo-cimento de 20,8% e da composição de Kraftterra de 27,0%.

Para a produção dos corpos-de-prova utilizou-se como referência o procedimento descrito na NBR 12024 (ABNT, 1992), mas com alguns ajustes para melhor adequação ao estudo do novo compósito.

Para a moldagem dos corpos-de-prova foram utilizados cilindros pequenos de Proctor (diâmetro $\pm 100\text{mm}$ e altura $\pm 127\text{mm}$) e soquete pequeno. Os CPs foram moldados em 3 camadas com 26 golpes do soquete por camada. A NBR 12024 (ABNT, 1992) recomenda que assim que moldados os corpos-de-prova devem ser colocados numa câmara úmida à temperatura aproximada de 23°C e umidade relativa do ar não inferior a 95%, semelhante às câmaras úmidas utilizadas para a cura de matrizes cimentícias. Contudo, ao proceder dessa maneira com corpos-de-prova produzidos com uma mistura com um solo bastante argiloso e com baixo teor de cimento os mesmos apresentaram grande fragilidade e baixíssima resistência já ao serem transportados, o que não refletia a situação mínima esperada para os CPs de solo-cimento ou de Kraftterra.

Optou-se por manter os corpos-de-prova durante o período de cura em local fechado com ventilação controlada, sem incidência direta do sol e com umidade relativa do ar bem abaixo do recomendado na norma (valores médios em torno dos 50% e pequenas oscilações durante os dias). Foi utilizado um depósito no Laboratório de Geotecnia da UnB.

Após o período de cura de 7 dias foram realizados os ensaios de compressão simples seguindo os procedimentos descritos na NBR 12025 (ABNT, 1990).

Entretanto, seguindo o recomendado por Pitta e Nascimento (1983) foram propostos alguns ajustes nos procedimentos. Estes autores sugerem que a imersão em água dos corpos-de-prova deva ser eliminada das especificações no caso de solo melhorado com cimento, independentemente do tipo de solo a ser estabilizado.

4.7 Processo de produção dos BTCs

Para a produção de BTCs na Universidade de Aveiro foi utilizada uma prensa manual do tipo TERSTARAM da Appro-Techno (Fig. 21). Esta prensa produz dois BTCs por vez, não possui compartimento para depósito da mistura, nem sistema para colocação de material dentro dos moldes de compactação, o que dificulta e aumenta o tempo de produção dos BTCs.

Esta prensa utiliza um sistema de ajuste da altura e volume do molde com barras metálicas que são dispostas abaixo do braço de alavanca responsável pela elevação da parte inferior do molde e compactação do material dentro deste (Fig. 20, dir.). Para se conseguir a mesma força de compactação cada material exigiu um ajuste específico do equipamento. Isto ocorreu pelo fato da mistura de Kraftterra apresentar menor densidade que a de solo-cimento.

O eixo que faz o braço de alavanca se mover para cima e produzir a força de compactação nos moldes possui dois suportes que permitem que a operação da máquina seja realizada por duas pessoas ao mesmo tempo (Fig. 20, centro).



Fig. 20 – Prensa TERSTARAM para produção de BTCs. Detalhe do sistema de ajuste de altura do molde (dir.).

O equipamento também foi projetado para permitir mobilidade dentro da área de produção, contudo é extremamente pesado e as rodas são muito pequenas, o que dificulta seu transporte e locomoção dentro de um canteiro de obras. É de

fácil manutenção e não apresentou qualquer problema durante o período de produção dos BTCs de Kraftterra e de solo-cimento.

Após o processo de mistura do Kraftterra ou do solo-cimento os compósitos foram dispostos dentro do molde para serem compactados (Fig. 21). Após a prensagem dos BTCs estes foram curados em local com ventilação controlada e sem incidência direta do sol. Para padronização das condições de cura e não favorecimento ou detrimento do desempenho dos BTCs de Kraftterra ou solo-cimento todos os BTCs foram curados de forma idêntica e unicamente pelo não favorecimento da perda rápida de umidade, ou seja, através apenas das condições ambientais do laboratório, sem qualquer processo de umidificação. Não foram registradas fissuras ou outros problemas nos BTCs decorrentes do processo de cura adotado, tanto nos de Kraftterra quanto nos de solo-cimento.



Fig. 21 – Compactação de BTCs em prensa manual TERSTARAM, no laboratório do DECivil/UA.



Fig. 22 – Área de produção dos BTCs no subsolo do Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

4.8 Resistência à compressão simples - BTCs

Os corpos-de-prova dos BTCs foram preparados conforme descrito na NBR 8492 (ABNT, 1984). Primeiramente foram cortados ao meio perpendicularmente à maior dimensão com uma serra elétrica de disco. Depois as metades invertidas foram superpostas e unidas por uma fina camada de pasta de cimento pré-contraída (repouso de aproximadamente 30 minutos). Após endurecimento da pasta de ligação procedeu-se à regularização com pasta de cimento pré-contraída para garantir o paralelismo entre as faces superiores e inferiores dos CPs. Para isto foram utilizadas chapas metálicas espessas como guias que se mantinham estáveis na posição vertical, as quais foram apoiadas em uma mesa com tampo liso metálico. Foram utilizadas pequenas chapas metálicas de mesma espessura para regular a altura dos CPs até a borda das guias, conforme pode ser visto na Fig. 23.



Fig. 23 – Regularização das faces de corpos-de-prova de BTCs.

Da mesma maneira em que se optou por ajustar os procedimentos descritos na NBR 12025 para a preparação dos CPs para os ensaios de compressão simples quando da caracterização do Kraftterra, optou-se também por ajustes no procedimento de preparo dos CPs com BTCs. Seguindo o recomendado por Pitta e Nascimento (1983) eliminou-se a imersão em água dos corpos-de-prova antes da realização dos ensaios.

Como já citado anteriormente, a caracterização do novo compósito realizada no Laboratório de Geotecnia da UnB indicou como melhor composição de Kraftterra as proporções em massa de 6% de fibras dispersas de kraft e 6% de cimento. Foram realizados ensaios de compactação (NBR 12023 – ABNT, 1992) com CPs de Kraftterra (SA1-K6-E6) e solo-cimento (SA1-K0-E6) para definição das umidades ótimas e verificação dos melhores índices de umidade para se obter os melhores desempenhos quanto à resistência à compressão simples.

Com as indicações dos valores ideais de umidade passou-se para a produção dos BTCs de Kraftterra e solo-cimento e posterior cura. A cura foi feita em ambiente fechado, com ventilação controlada, sem a incidência direta da luz do sol e sem umidificação dos BTCs. Iniciaram-se os procedimentos dos ensaios de resistência à compressão simples após o período de cura de 28 dias. Procurou-se dessa forma trabalhar com os BTCs em condições o mais semelhante possível às de fabricação em olarias e canteiros de obras. Quando não é possível curar ao BTCs em local coberto é comum manter os blocos sobre lonas plásticas para se evitar a perda acelerada de umidade.

Para a análise comparativa de desempenho dos BTCs quanto à resistência à compressão simples foram produzidos 15 CPs de solo-cimento e 15 CPs de

Kraftterra com os traços e proporções correspondentes. Os BTCs foram escolhidos aleatoriamente de vários períodos da produção para tentar obter a maior variedade possível. Deste total 5 CPs de cada compósito passaram inicialmente por ensaios de envelhecimento acelerado, ou de durabilidade por molhagem e secagem, antes de serem testados à compressão simples. O ensaio de envelhecimento acelerado será descrito e detalhado mais adiante em item específico.

4.9 Envelhecimento acelerado - BTCs

Para a realização dos ensaios de envelhecimento acelerado foi utilizada como referência a norma brasileira NBR 13554 (ABNT, 1996), porém nos ensaios foram utilizados os próprios BTCs no lugar dos corpos-de-prova cilíndricos. Estes ensaios visaram simular a ação das intempéries na durabilidade dos componentes construtivos de forma a acelerar processos patogênicos ao maximizar a ação de fatores ambientais de degradação dos BTCs, tais como: grande oscilação de umidade e de temperatura; e o uso de condições extremas de ambas as situações ambientais. Esta durabilidade refere-se à ação da água em sucessivos ciclos de umedecimento e secagem com altas oscilações de temperatura. A imersão dos BTCs em água associada às grandes oscilações térmicas provoca variações volumétricas com possibilidade de ruptura dos vínculos entre grãos com conseqüente desagregação progressiva, onde podem ocorrer fissuras, desgastes ou desagregações de partes dos componentes construtivos.

A NBR 13554 (ABNT, 1996) define os procedimentos e descreve os ciclos de molhagem e secagem do ensaio de durabilidade. São 6 ciclos consecutivos de 5 horas de imersão em água a temperatura ambiente e 42 horas em estufa a 71°C. Ao final de cada ciclo deve-se determinar a massa e volume dos CPs. Também é indicado um procedimento de escovação para avaliação e definição da perda de massa, o qual foi descartado tendo em vista que os CPs seriam utilizados em análises comparativas do desempenho à compressão simples e o desgaste provocado pela escovação poderia provocar distorções e erros nos resultados.



Fig. 24 – Estufa e tanque utilizados nos ensaios de envelhecimento acelerado.

Optou-se, portanto, pela execução do ensaio de durabilidade apenas para determinação da variação de volume e variação da absorção de água dos CPs, bem como para uma avaliação visual da aparência física dos BTCs ao final do ensaio. Para isso ajustou-se a duração do ciclo úmido para 6 horas, o que permitiu que o tempo total de cada ciclo continuasse a ser de 48 horas.

Após os seis ciclos de molhagem e secagem procedeu-se o cálculo das variações de volume ocorridas nos BTCs entre o início do ensaio e os volumes obtidos após cada etapa. Estas foram expressas em porcentagem do volume inicial do seguinte modo (2):

$$V_{v,n} = \frac{(V_n - V_i)}{V_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde $V_{v,n}$ é a variação de volume do BTC em cada etapa (em %); V_i é o volume inicial do BTC; e V_n é o volume do BTC ao final de cada etapa.

Para o cálculo das variações de absorção de água pelos BTCs procedeu-se o cálculo das variações de massa ocorridas nos BTCs entre o início do ensaio e os valores de massa obtidos após cada etapa. Estas variações foram expressas em porcentagem da massa inicial conforme (3):

$$M_{v,n} = \frac{(M_n - M_i)}{M_i} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde $M_{v,n}$ é a variação de massa do BTC em cada etapa (em %); M_i é a massa inicial do BTC; e M_n é a massa do BTC ao final de cada etapa.

4.10 Absorção de água por imersão - BTCs

Para definição do desempenho dos BTCs de Kraftterra quanto à absorção de água também foi utilizada uma análise comparativa com BTCs de solo-cimento. A norma brasileira NBR 8492 (ABNT, 1984) serviu de referência para os ensaios. Após a seleção de três BTCs, estes foram colocados em estufa para secar, entre 105'º e 110°C, até constância de massa, obtendo-se assim a massa do tijolo seco. Depois os CPs foram imersos em água durante 24 h. Após este período, os CPs devem ser enxugados superficialmente com um pano úmido e logo depois devem ser pesados, obtendo-se assim a massa do tijolo saturado. Os valores individuais de absorção de água, expressos em porcentagem, são obtidos pela expressão (4):

$$A = \frac{M2 - M1}{M1} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde $M1$ é a massa do tijolo seco em estufa; $M2$ é a massa do tijolo saturado; e A é o valor de absorção de água, em porcentagem.

Os ensaios de absorção de água realizados durante a caracterização do novo compósito indicaram a tendência do Kraftterra em absorver mais água que o solo-cimento. Prevendo que o desempenho dos BTCs de Kraftterra também pudesse seguir esta tendência, aproveitaram-se estes ensaios para iniciar os estudos e análises sobre a introdução de aditivos nos compósitos que proporcionassem a redução nos índices de absorção de água.

Propôs-se, então, o estudo com BTCs de Kraftterra quanto à absorção de água com o uso de concentrações de seiva de Aloe vera (babosa) na água da mistura dos compósitos. Foram analisados BTCs com concentrações de seiva de 1% e 4% (em massa) diluídas na água da mistura dos BTCs.

Para este procedimento foram abertas as cascas das folhas de Aloe vera e as seivas foram retiradas e posteriormente trituradas com o auxílio de um liquidificador de mão portátil.

As concentrações da seiva de Aloe vera foram introduzidas na água da mistura dos BTCs de Kraftterra, bem como na água utilizada para a reciclagem dos sacos de cimento.



Fig. 25 – Retirada da seiva de folhas de babosa / Aloe vera.

Foram ensaiados 5 CPs de cada composição diferente de BTC: solo-cimento (sem seiva); Kraftterra (sem seiva); Kraftterra (1% de seiva); e Kraftterra (4% de seiva).

4.11 Processo de produção de elementos de vedação

Optou-se pela utilização de argamassas de assentamento com o mesmo solo e mesma composição de materiais dos BTCs, ou seja, para assentar BTCs de Kraftterra a argamassa de assentamento utilizada também foi a de Kraftterra. A diferença das misturas utilizadas para a produção dos BTCs e argamassas está na quantidade de água e consistência dos compósitos.

As consistências das argamassas exigem quantidades e proporções de água nas misturas bem superiores às dos BTCs. Como citado anteriormente, quanto mais distante a mistura estiver dos valores de umidade ótima pior será o desempenho final e as características físico-mecânicas do compósito. Por este motivo optou-se por aumentar a quantidade de estabilizante nas misturas das argamassas de assentamento para se garantir que todas as partes dos elementos de vedação tivessem comportamento e desempenho uniforme. Utilizou-se na argamassa de assentamento cimento com percentual de 12% em massa.

Para se garantir uma boa união entre os blocos e a argamassa de assentamento deve-se evitar que os BTCs absorvam rapidamente a água presente na argamassa. Para tal os blocos devem ser molhados imediatamente antes do assentamento. Recomenda-se a imersão dos BTCs em água por alguns segundos. O excesso de água dos blocos deve ser retirado com uma esponja.



Fig. 26 – Execução de prisma com BTCs e argamassa de assentamento de Kraftterra feito com as mãos, sem o uso de colher de pedreiro. Detalhe da imersão dos BTCs em água (esq.).

A diferença entre os processos de assentamento com argamassas de Kraftterra e de solo-cimento deve-se pela presença ou não das fibras nas misturas, o que acarreta certa dificuldade na utilização das “colheres de pedreiro” e “desempenadeiras”. Para a retirada do excesso de argamassa de Kraftterra após o assentamento dos BTCs a passagem da colher de pedreiro acaba por retirar mais material do que o necessário deixando vazios entre os blocos, o que pode comprometer o desempenho final do subsistema e resultar num acabamento indesejável no caso das paredes com BTCs aparentes. Para contornar esta situação os elementos foram assentados sem as colheres de pedreiro. Com o uso de luvas impermeáveis foi possível assentar os tijolos sem dificuldades, com menor desperdício de materiais e sem consumir mais tempo. As luvas são recomendadas para compósitos que contenham cimento. Para as misturas de Kraftterra que não tenham cimento este processo pode ser realizado com as mãos sem qualquer proteção.

Para realização do ensaio de resistência ao fogo foi necessária a execução de uma parede com dimensões de 3,10 x 3,10 metros. Optou-se pela análise de diferentes composições de elementos, com e sem revestimento. Até meia altura a parede foi produzida com BTCs e argamassa de assentamento de solo-cimento. A outra metade foi feita com BTCs e argamassa de assentamento de Kraftterra, incluindo-se a faixa final de aperto com blocos assentados na diagonal.

Para os revestimentos desta parede optou-se pela colocação de faixas de reboco de solo-cimento de 2 cm de espessura. Para melhor fixação do reboco foi executada uma etapa semelhante ao chapisco, porém sem o lançamento da argamassa com uma colher de pedreiro. O chapisco foi colocado nas faces da parede diretamente com as mãos (Fig. 27), o que resultou num processo mais

limpo, sem desperdícios e bem eficiente, uma vez que a massa se fixou perfeitamente à parede. A parede foi molhada previamente para evitar que absorvesse rapidamente a água do chapisco. O mesmo ocorreu quando da execução do reboco acima do chapisco.

A argamassa do reboco também foi disposta na parede diretamente com as mãos. Optou-se por um acabamento final rústico, o qual foi dado com uma colher de pedreiro. O reboco ficou com textura lisa, com pequenas ondulações e com brilho suave.



Fig. 27 – Execução de chapisco e reboco de solo-cimento em parede para ensaio de resistência ao fogo.

A cura das paredes foi feita no interior do laboratório em condições ambientes sem a incidência direta do sol e sem ventilação forçada. Nenhum processo de umidificação da parede foi feito durante o período de cura.

Ocorreram poucas fissuras no reboco, as quais provavelmente foram provocadas pela necessidade de movimentação do pórtico pouco tempo depois da execução da parede. Estas fissuras eram muito estreitas e algumas só foram percebidas no decorrer do ensaio de resistência ao fogo, quando a água presente no interior da parede se aqueceu, evaporou e saiu primeiramente pelas fissuras se condensando na face externa marcando os pontos de fissuramento (Fig. 28, centro). No decorrer do ensaio essa água saiu por toda a face externa da parede (Fig. 28, dir.). Cabe ressaltar que a maior quantidade de fissuras ocorreu na faixa inferior da parede, faixa que foi executada com BTCs de solo-cimento.



Fig. 28 – Fissuras em faixa de reboco ressaltadas durante ensaio de resistência ao fogo pela evaporação da água presente no interior da parede e posterior condensação na face externa.

4.12 Resistência à compressão simples - paredes

Para os ensaios de resistência à compressão simples de paredes executadas com BTCs maciços e lisos assentados com argamassas foram utilizadas como referências a norma peruana para construções em adobe, a NTE E0.80 ADOBE - Norma Técnica de Edificación (2000) e a TC24-BW (RILEM, 1980).

Segundo a NTE E0.80 (2000) a resistência à compressão da alvenaria pode ser determinada por ensaios com paredes reduzidas (prismas) compostas por número de fiadas suficiente para se obter um coeficiente de esbeltez (altura/espessura) da ordem de aproximadamente 3, sendo 4 o número mínimo de fiadas. O tempo de cura dos prismas deverá ser de 30 dias e o número mínimo a serem ensaiados será de 3. Obtém-se o esforço maior de compressão considerando-se o valor que sobre passa em dois dos três prismas ensaiados.

Já as recomendações da TC24-BW (RILEM, 1980) diferem um pouco quanto ao coeficiente de esbeltez ao permitir que a relação entre altura e espessura fique entre 3 a 5. Outra diferença é quanto ao número mínimo de fiadas que é de 5. Também descreve que o número mínimo de CPs deve ser de 3 e acrescenta que a relação entre a altura e o comprimento da parede deve ser maior ou igual a 1.

Para a medição das deformações ocorridas durante os ensaios foi desenvolvido um sistema de fixação e apoio para colocação de extensômetros por meio de chumbadores do tipo *parabolt*. Este dispositivo permite que uma barra de seção circular de alumínio seja apoiada em dois pontos, sendo que em um destes apoios o deslocamento da barra é totalmente desimpedido. Nesta barra é fixado

um extensômetro e a medição das deformações é feita utilizando-se como base o topo de um dos chumbadores, conforme pode ser visto na Fig. 29.

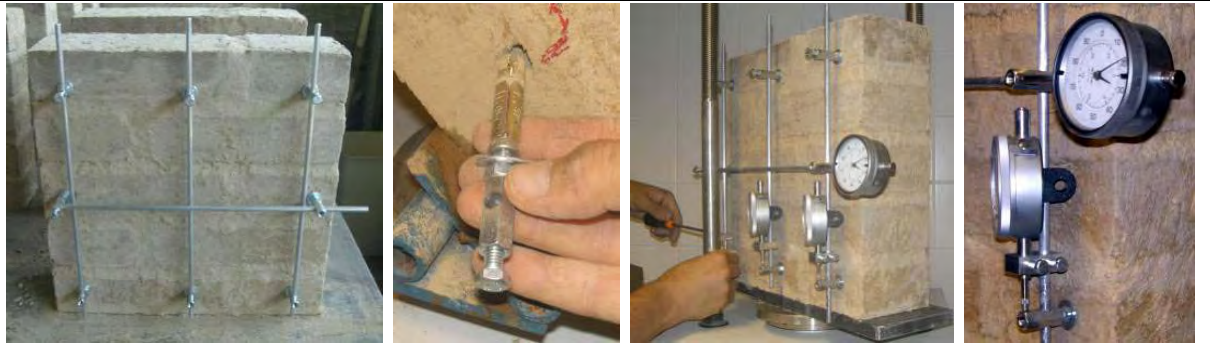


Fig. 29 – Sistema de fixação e apoio de extensômetros em prismas para ensaios de compressão simples.

Foram feitos furos com auxílio de uma furadeira elétrica em pontos determinados para inserção dos parabolts. As brocas utilizadas tinham o mesmo diâmetro dos chumbadores, o que permitiu encaixe e fixação sem folgas, sem a necessidade de qualquer material para aderência e sem causar danos aos prismas.

Para medir as deformações perpendiculares ao carregamento foi disposta uma barra horizontal na altura média dos prismas. Optou-se pela colocação de três barras na vertical para medir as deformações paralelas ao carregamento à compressão simples, uma no centro do prisma e duas nas laterais. Todos os pontos de fixação das barras verticais foram dispostos a 4 cm das bordas e da barra horizontal a 2,5 cm. Com estas três barras foi possível verificar se os carregamentos ocorreram de forma uniforme.

Cabe ressaltar que com as medições das deformações sendo realizadas diretamente nos prismas evitou-se o registro das pequenas deformações decorrentes de possíveis irregularidades nas faces dos prismas e das acomodações iniciais do sistema de carregamento, o que por sua vez resultou em gráficos de tensão/deformação mais corretos e em resultados finais mais precisos. Isto pode ser percebido no gráfico de tensão/deformação (Anexo 18), onde é possível perceber que as curvas iniciam já na ascendente.

Para favorecer a transmissão e distribuição uniforme do carregamento através das chapas metálicas e também diminuir a interferência de pequenas irregularidades nas faces dos prismas utilizou-se uma fina camada de argamassa com consistência plástica feita com o próprio solo utilizado nos prismas, conforme pode ser visto na Fig. 30. As chapas eram dispostas no local antes da

nata perder sua consistência plástica, ou melhor, antes dos prismas absorverem a água desta nata.



Fig. 30 - Colocação de argamassa de solo para melhor acomodação da chapa metálica responsável pela distribuição dos esforços de compressão simples.

Optou-se pelo recurso de uma filmadora para se registrar os ensaios e permitir a coleta dos valores de deformação dos quatro extensômetros e relacioná-los com os dados de carregamento do extensômetro posicionado no anel dinamométrico. Por segurança também foram realizados os registros manuais dos valores de deformação vertical (centro) e horizontal e correspondentes valores do extensômetro do anel dinamométrico.

Infelizmente a resolução dos vídeos não permitiu uma medição precisa dos valores de deformação. Porém mesmo sem a precisão desejada foi possível verificar o comportamento do carregamento e identificar se o mesmo atuou de maneira uniforme ou não. Estas informações foram utilizadas nas análises dos resultados.

Os prismas foram executados com cinco fiadas contendo um BTC e meio em cada. As dimensões médias dos BTCs eram de 22,2 x 10,6 x 5,7 cm. Os blocos foram assentados com argamassa com espessuras das fiadas horizontais de aproximadamente 15 mm e na vertical de 14 mm, o que resultou em prismas de forma quadrada com dimensões 34,5 x 34,5 cm em média, por 10,6 cm de espessura. Com estas dimensões segue-se o recomendado pela NTE E0.80 ao obter-se um coeficiente de esbeltez de 3,25.

Foram executadas ao todo quatorze prismas com BTCs e argamassas de assentamento de Kraftterra. Seis foram utilizados nos ensaios de resistência à

compressão simples, sendo que um destes passou inicialmente por ciclos de envelhecimento acelerado.

4.13 Resistência à compressão diagonal - paredes

Os prismas ensaiados à compressão diagonal foram executados da mesma maneira dos ensaios de compressão simples, com cinco fiadas contendo um BTC e meio em cada e juntas com aproximadamente 15 mm, o que resultou em prismas de forma quadrada com dimensões 34,5 x 34,5 cm em média, por 10,6 cm de espessura.

Este ensaio ocorre da seguinte maneira: um painel quadrado de alvenaria é submetido a uma força de compressão aplicada em dois cantos opostos ao longo de uma diagonal até a ruptura do mesmo (Fig. 31). A força cortante é deduzida da força de compressão diagonal baseada em uma distribuição teórica de tensões normais e de corte para uma quantidade contínua, homogênea e elástica de material.

Para medição das deformações axial e perpendicular ao eixo de carregamento foi utilizado o mesmo sistema de fixação e apoio para colocação de extensômetros por meio de chumbadores do tipo *parabolt* descrito anteriormente em item sobre os ensaios de compressão simples em paredes (Fig. 31).



Fig. 31 - Sistema de fixação de barras e apoios para extensômetros em prismas para realização de ensaios de compressão diagonal.

Para colocação e alinhamento dos prismas no equipamento de compressão foram utilizados dois apoios metálicos com cantoneiras. Para melhor distribuição dos carregamentos optou-se pela utilização de uma fina camada de argamassa com

consistência plástica feita com a fração fina do próprio solo utilizado nos prismas e água (Fig. 32).



Fig. 32 – Colocação de argamassa de solo para melhor acomodação dos apoios metálicos responsáveis pela distribuição dos esforços de compressão.

Pereira (2008) comenta que das curvas de tensão/deformação obtidas através dos ensaios de compressão diagonal pode-se estimar a tensão de rotura em cisalhamento e o módulo de deformação transversal de cada prisma. A tensão de rotura em corte ou tensão de cisalhamento (S_s) é calculada para cada prisma tendo por base a expressão (5):

$$S_s = \frac{0,707 \cdot P}{A_n} \quad (5)$$

Onde P representa a força de rotura e A_n a área efetiva de corte, sendo esta última determinada pela expressão (6):

$$A_n = \frac{\ell + h}{2} \cdot t \cdot n \quad (6)$$

Onde ℓ e h representam a largura e a altura do prisma, t a sua espessura e n a fração da área maciça do prisma (neste caso n é igual a 1, pois os BTCs utilizados nos prismas eram maciços, lisos e sem reentrâncias).

A deformação de corte (γ) é obtida através da expressão (7) e o módulo de elasticidade transversal (G) é o quociente da tensão de cisalhamento (S_s) pela resistência de corte (γ), como em (8).

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (7)$$

Onde ΔV representa a encurtamento vertical, ΔH a expansão horizontal e g a distância relativa entre os pontos na vertical assumido como igual à distância relativa na horizontal (como exigido nos padrões de ASTM, 1997).

$$G = \frac{S_s}{\gamma} \quad (8)$$

Os resultados dos testes de compressão diagonal são representados por duas curvas, uma com a força vertical contra deformação vertical (esquerda) e a outra contra a deformação horizontal (direita), como esquematicamente mostrado na Figura 33. As deformações correspondem às médias dos dois sinais registradas nas direções associadas.

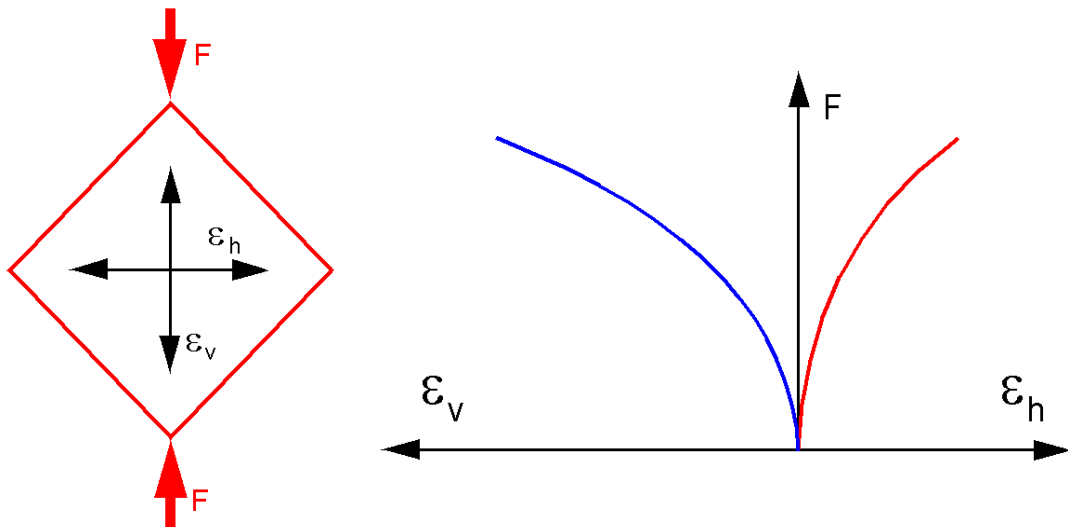


Fig. 33 – Esquema genérico dos ensaios de compressão diagonal em paredes (Fonte: Varum, 2002).

Foram executadas 6 prismas com BTCs e argamassas de assentamento de Kraftterra para os ensaios de resistência à compressão diagonal. Um destes passou inicialmente por ciclos de envelhecimento acelerado.

4.14 Resistência ao fogo - paredes

O ensaio de resistência ao fogo foi realizado no LERF – Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo, localizado no campus da Universidade de Aveiro, e utilizou-se como referência as especificações da Norma Européia EN 1363-1 (versão em espanhol, 2000).

Para a realização do ensaio de resistência ao fogo foi necessária a execução de uma parede com 3,10m x 3,10m no pórtico de concreto armado do forno. Após a reciclagem de mais ou menos 1500 sacos de cimento, o peneiramento de aproximadamente 4 m³ de solo e a produção de cerca de 700 BTCs (incluindo 5% para perdas) foi levantada a parede com 9,61 m².

Para além da definição do comportamento, desempenho e resistência de uma parede de Kraftterra ao fogo procederam-se também análises comparativas com o solo-cimento e com diferentes situações de revestimento. Para isto foram produzidas duas faixas distintas de paredes, sendo a parte inferior até a meia altura com BTCs e argamassa de assentamento de solo-cimento e a metade superior com BTCs e argamassa de Kraftterra. Uma fiada de aperto, de aproximadamente 15 cm de altura, também foi realizada com BTCs e argamassa de Kraftterra.

Também com o intuito de avaliar situações distintas similares às encontradas em construções com BTCs, a parede foi dividida em três partes e foram executadas faixas de reboco com 1 metro de largura, de forma a produzir três configurações distintas para cada tipo de parede. A faixa central ficou sem reboco nas duas faces (P2: Kraftterra e P5: solo-cimento). Uma faixa lateral ficou com reboco apenas na face exposta ao fogo (P1: Kraftterra e P4: solo-cimento) a outra ficou com reboco nas duas faces (P3: Kraftterra e P6: solo-cimento). Desta maneira foram estudados 6 painéis distintos. Optou-se pela produção de rebocos com argamassa de solo-cimento, com o mesmo solo utilizado na produção dos BTCs e com 12% de cimento (em massa). A espessura média dos rebocos foi de 2,0 cm, o que resultou em uma parede (rebocada nas duas faces) com espessura total de 15 cm.

Na fig. 34 são apresentadas vistas da parede acabada da face externa não exposta ao fogo (esquerda) e da face interna exposta ao fogo (direita).

Para a medição, a instrumentação colocada foi a esquematizada na Fig. 35, tendo sido realizada com 32 termopares, em que dois deles se situavam a 6 cm de profundidade dentro da parede, outros dois a 3 cm de profundidade e os restantes na face não exposta ao fogo. Foram medidas as deformações em 16 pontos da parede (de A a P).



Fig. 34 – Faces externa (esq.) e interna (dir.) de parede executada em pórtico de equipamento para ensaio de resistência ao fogo do Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo – LERF, Aveiro – Portugal.

Durante as duas primeiras horas do ensaio o valor da temperatura média de todos os termopares ativos foi imposto pela curva resultante (curva ISO834) da expressão (9):

$$T = 345\log_{10}(8t+1)+20 \quad (9)$$

Onde t é o tempo (em minutos) e T a temperatura média de todos os termopares ativos.

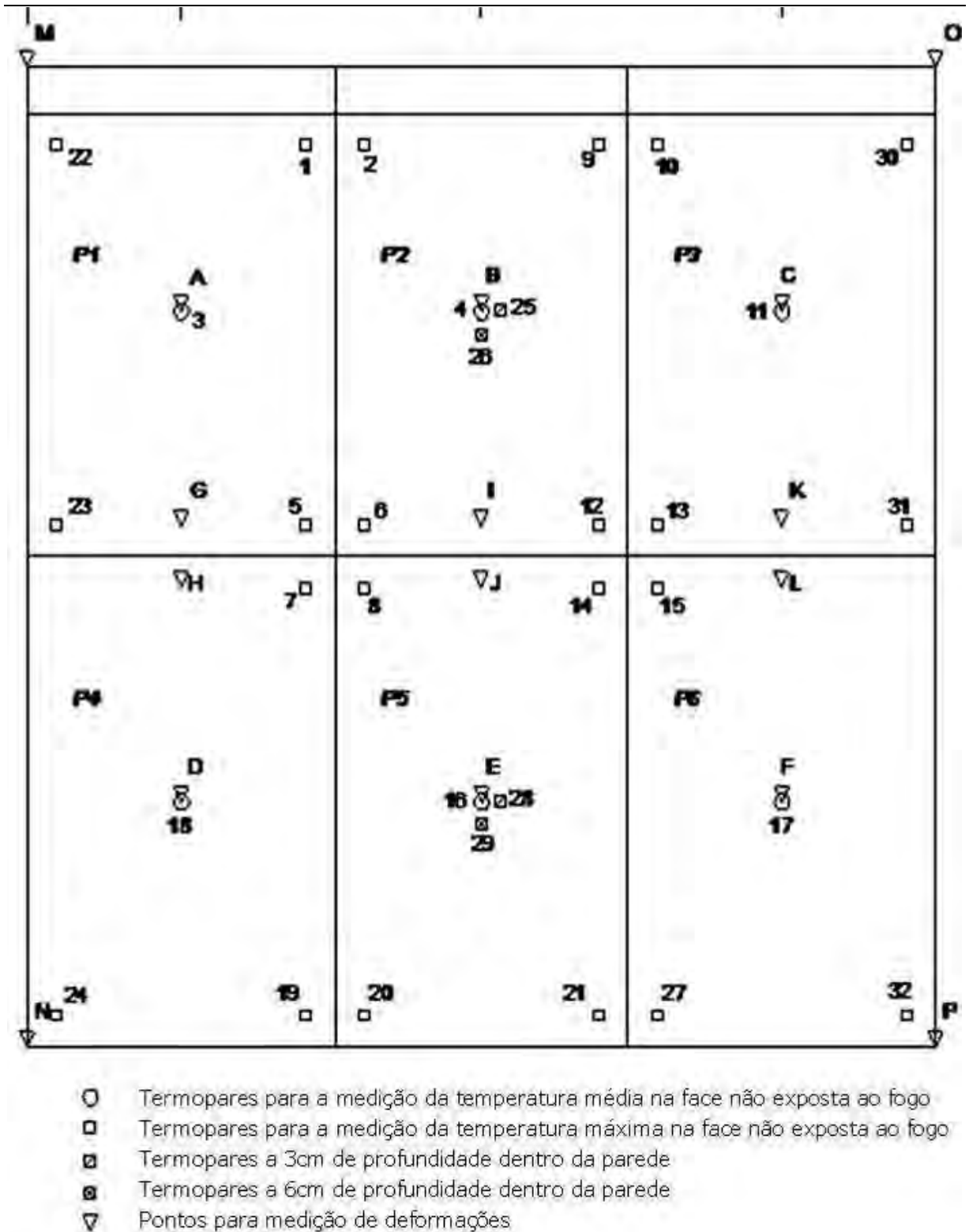


Fig. 35 - Esquema de distribuição dos termopares e pontos de medição de deformações para o ensaio de resistência ao fogo.

*"Uma experiência nunca é um fracasso,
pois sempre vem demonstrar algo".
(Thomas Edison)*

5. Apresentação e análise de resultados

5.1 Caracterização dos solos

Procedeu-se à análise granulométrica do solo do Grupo Canastra. Para tal utilizou-se os procedimentos descritos na NBR 7181 (ABNT, 1984). A análise indicou percentuais de 45% de argila, 42% de areia e 13% de silte.

Seguindo os procedimentos da NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984) procederam-se as análises dos limites de consistência do solo do Grupo Canastra, que apresentou um limite de liquidez de 41% e um limite de plasticidade de 28%, resultando num índice de plasticidade de 13%.

Em Aveiro, Portugal, a partir dos ensaios de granulometria (NBR 7181 - ABNT, 1984) verificou-se que o solo escolhido para a produção dos BTCs apresentava 84,5% de areia e 15,5% de fração fina, sendo 7,3% de silte e 8,2% de argila. Este solo apresentou boas características para a produção dos BTCs e elementos de vedação, argamassa e reboco, tanto com misturas de solo-cimento quanto de Kraftterra.

5.2 Retração Linear - CPs

Os resultados iniciais com o Ensaio da Caixa para identificar o comportamento quanto à retração indicaram a escolha do compósito GC-6K-6E (Grupo Canastra com 6% de kraft e 6% de cimento) como sendo a "amostra-base" para os estudos, tendo em vista que as suas características quanto à retração chegaram a valores dentro dos limites recomendados e ficaram muito próximos dos compósitos com maiores quantidades de cimento, como pode ser visto na Tabela 1. Aos 7 dias todas os CPs com 6 % de kraft apresentaram retrações dentro do limite admissível e destas as que tinham percentuais de cimento praticamente estabilizaram entre a segunda e terceira semanas com valores de retração muito próximos do limite estabelecido para a primeira semana.

Tabela 1 – Valores da retração para CPs de Kraftterra.

Grupo Canastra - GC (retração em milímetros)					
Dias	Percentuais de kraft (em massa)	Percentuais de cimento (em massa)			
		E0	E6	E9	E12
7 dias	K2	23,0	24,5	20,5	20,0
	K4	25,5	22,5	20,5	19,0
	K6	18,0	12,0	13,0	9,0
14 dias	K2	42,5	36,5	27,0	26,5
	K4	55,0	36,0	32,0	27,5
	K6	34,0	19,5	19,5	14,0
21 dias	K2	39,0	38,5	28,0	27,0
	K4	57,0	37,0	34,0	29,0
	K6	34,5	21,0	20,5	15,0
28 dias	K2	44,0	38,5	28,0	27,0
	K4	57,0	37,5	34,5	29,5
	K6	35,0	21,5	21,0	15,0

Para o estudo com solos corrigidos utilizou-se o “ensaio da caixa” para verificar tanto o comportamento do Kraftterra com solos mais arenosos quanto para se fazer uma comparação com CPs de solo-cimento e solo natural. Foram analisadas CPs de Kraftterra (6% de kraft) com e sem cimento e de solo corrigido (GCC) com e sem cimento.

Os resultados desses ensaios (Tabela 2) com solos corrigidos reforçaram a escolha do compósito GC-6K-6E como sendo a amostra-base inicial, pois demonstraram que comparativamente esses compósitos retraíram menos que as com o solo original na primeira semana e chegaram a valores de retração um pouco maiores a partir da segunda semana. Sem o uso do cimento, o comportamento dos CPs com solo corrigido foi muito semelhante aos com o solo original, com retrações menores aos 7 dias para os GCC15 e GCC20, mas com valores bem aproximados a partir dos 14 dias. Os valores com o GCC30 não diferiram muito.

Tabela 2 – Valores de retração. CPs com solo corrigido de solo-cimento e Kraftterra estabilizado.

GCC15 (retração em milímetros)				GCC20 (retração em milímetros)				GCC30 (retração em milímetros)			
Dias	% kraft	% de Estabilizante		Dias	% kraft	% de Estabilizante		Dias	% kraft	% de Estabilizante	
		E0	E6			E0	E6			E0	E6
7	K0	Fissurou	Fissurou	7	K0	Fissurou	Fissurou	7	K0	Fissurou	Fissurou
	K6	11,0	11,5		K6	11,5	15,5		K6	17,5	14,5
14	K0	Xxx	xxx	14	K0	xxx	xxx	14	K0	xxx	xxx
	K6	29,5	22,0		K6	33,0	23,5		K6	35,5	22,0
21	K0	Xxx	Xxx	21	K0	xxx	Xxx	21	K0	xxx	xxx
	K6	31,0	22,5		K6	35,5	24,5		K6	36,0	22,5
28	K0	Xxx	xxx	28	K0	xxx	xxx	28	K0	xxx	xxx
	K6	31,0	23,0		K6	35,5	24,5		K6	36,5	22,5

Cabe ressaltar que nenhum dos CPs estudados que continham as fibras dispersas de papel kraft apresentou fissuras e que todas as amostras de solo corrigido, GCC15, GCC20 e GCC30, que não continham as fibras apresentaram grandes fissuras e não puderam ter os ensaios concluídos (Fig. 36).



Fig. 36 – Ensaios da Caixa com solos corrigidos com areia. CPs sem fibras de papel Kraft apresentaram fissuras.

5.3 Absorção de água - CPs

Foram analisados e comparados corpos-de-prova de dois compósitos diferentes: o GC-K6-E6, amostra-base com solo original do Grupo Canastra com 6% de kraft e 6% de cimento (em massa); e o GC-K0-E6 com o solo original do Grupo Canastra mais o cimento (6% em massa), ou seja, iniciou-se a comparação do desempenho do compósito Kraftterra com relação ao solo-cimento.

A absorção de água também foi estudada e analisada quando da caracterização e definição do desempenho dos BTCs de Kraftterra, o que será apresentado em

capítulo específico. Cabe ressaltar que a caracterização do material e dos componentes construtivos não buscou simplesmente resultados numéricos ou verificação de adequação às normas e sim a definição do comportamento do novo compósito e de BTCs produzidos com o mesmo.

O valor médio de absorção de água dos CPs de Kraftterra (GC-K6-E6) foi de 29,63% e para os de solo-cimento (GC-K0-E6) foi de 23,95%. 5,68% maior para os CPs com a adição das fibras dispersas de papel kraft natural.

Os resultados mostraram uma grande tendência dos compósitos solo + cimento produzidos com um solo rico em argila (45%) em absorver água e também que a inclusão de fibras de papel kraft nestes compósitos aumenta ainda mais os valores de absorção de água.

O valor médio de absorção de água dos CPs de solo natural (GC-K0-E0) foi de 26,54% e para os de Kraftterra sem estabilizante (GC-K6-E0) foi de 34,11%.

Com os resultados concluiu-se que a inclusão de cimento ao solo produziu estabilização tanto nos compósitos de Kraftterra quanto nos de solo-cimento melhorando o desempenho quanto à absorção de água. Entretanto, a inclusão das fibras dispersas de papel kraft em compósitos de terra crua, estabilizados ou não com cimento, produz um incremento nos valores de absorção de água, sendo o aumento mais evidenciado nas misturas não estabilizadas com cimento.

Estes ensaios iniciais serviram para mostrar a potencialidade do compósito Kraftterra em absorver comparativamente mais água que os compósitos de solo-cimento. O que não inviabiliza o uso do novo compósito, mas ressalta a necessária preocupação que se deve dispensar quanto a este aspecto e característica construtiva do novo material.

5.4 Resistência à compressão simples – CPs

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples indicaram um melhor desempenho para os CPs de Kraftterra com solo corrigido com 30% de argila. O valor máximo de ruptura à compressão simples dos CPs GCC30-K6-E6 foi de 2,40 MPa e o dos CPs com amostra-base (GC-K6-E6) alcançaram 1,81 MPa, como pode ser visto na Fig. 37 e nos Anexos 5 e 7.

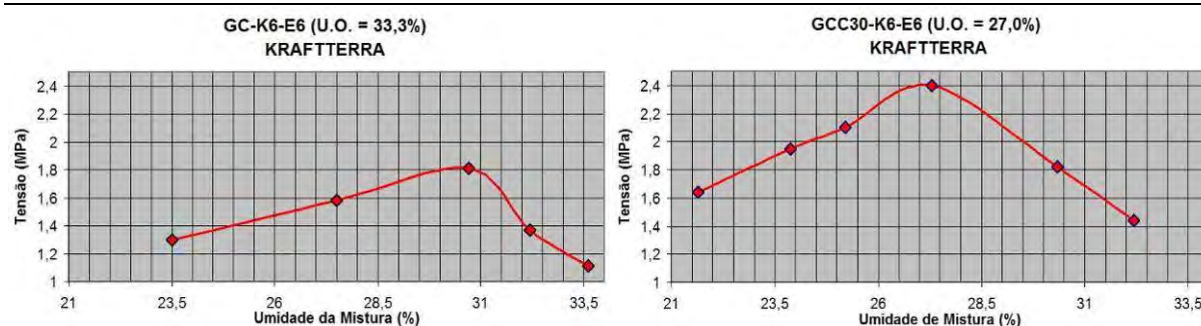


Fig.37 - Gráficos com as variações da resistência à compressão simples e respectivas umidades dos CPs de Kraftterra GC-K6-E6 (esquerda) e GCC30-K6-E6 (direita).

Os dois CPs de Kraftterra tiveram comparativamente melhor desempenho que os de solo-cimento. Os valores máximos de ruptura à compressão simples dos CPs de Kraftterra GCC30-K6-E6 e GC-K6-E6 foram, respectivamente, de 2,40 MPa e 1,81 MPa. Enquanto os correspondentes de solo-cimento, GCC30-K0-E6 e GC-K0-E6, apresentaram valores de 1,94 MPa e 1,60 MPa, respectivamente (Fig. 38 e Anexos 4 e 6). Para o solo com 45% de argila a incorporação das fibras dispersas do papel kraft melhorou o desempenho do compósito em 12,5% e com solo com 30% de argila os valores de resistência à compressão simples aumentaram aproximadamente 24%.

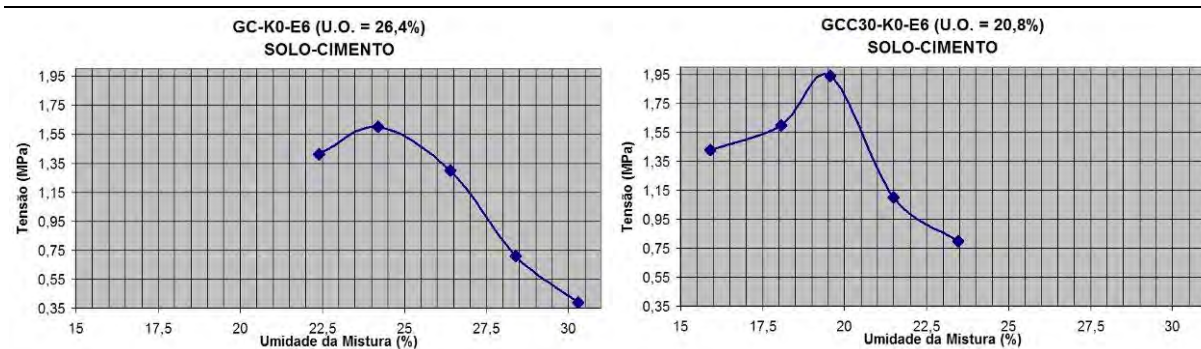


Fig.38 - Gráficos com as variações da resistência à compressão simples e respectivas umidades dos CPs de solo-cimento GC-K0-E6 (esquerda) e GCC30-K0-E6 (direita).

Conseqüentemente, a amostra-base passou a ser a de melhor desempenho, ou seja, a GCC30-K6-E6 e prosseguiram os estudos para a comparação de desempenho com CPs com diminuição do percentual de argila, Kraftterra GCC15-K6-E6 e a correspondente de solo-cimento GCC15-K0-E6.

Os CPs de Kraftterra produzidos com solo corrigido contendo 15% de argila apresentaram desempenho inferior quanto à resistência à compressão simples ao se comparar com os valores alcançados pela então amostra-base. Como já

mencionado, os CPs com GCC30-K6-E6 alcançaram valores de 2,4MPa e os com GCC15-K6-E6 de 2,07 MPa.

Ao se proceder a análise comparativa com os CPs correspondentes de solo-cimento, GCC15-K0-E6, os de Kraftterra mais uma vez tiveram melhor desempenho (Fig. 39 e Anexos 2 e 3). Com a incorporação das fibras dispersas do papel kraft os valores de resistência à compressão simples do compósito aumentaram 16,0% com relação aos correspondentes de solo-cimento. Cabe ressaltar que para os três tipos de solos analisados o desempenho do Kraftterra foi superior ao do solo-cimento quanto à resistência à compressão simples.

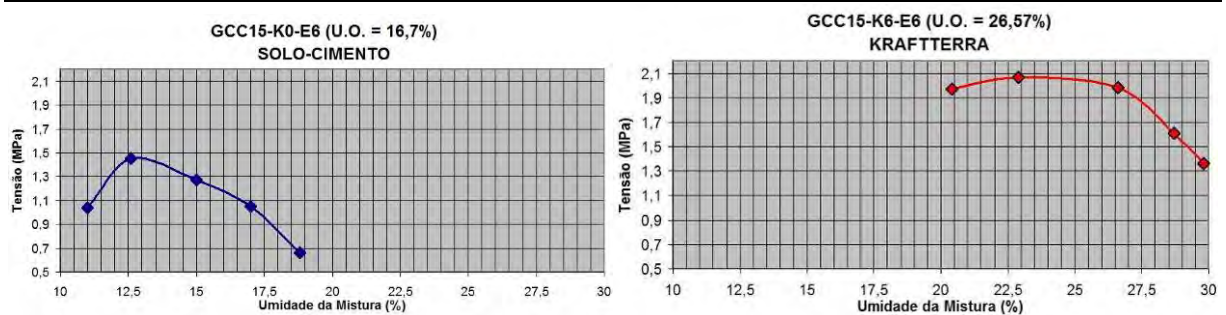


Fig. 39 - Gráficos com as variações da resistência à compressão simples e respectivas umidades dos CPs de solo-cimento GCC15-K0-E6 (esquerda) e Kraftterra GCC15-K6-E6 (direita).

Encerrou-se, portanto, a seqüência de análises para a variável "solo" tendo como melhor desempenho os CPs que continham solo com percentual de argila de 30%, GCC30-K6-E6.

Passou-se para a análise da outra variável de estudo, o percentual de "kraft". Optou-se neste momento pela continuidade da análise do desempenho do novo compósito ainda com a variável "solo", sendo esta em associação com a variável "kraft". Considerou-se para tal que os CPs de Kraftterra que tiveram um desempenho inferior no estudo com a variável "solo" apresentaram valores de resistência à compressão simples bem consideráveis e adequados à produção de BTCs. Iniciaram-se, portanto, as análises dos CPs com o aumento do percentual de kraft na mistura para 8% e com o solo com percentual corrigido de argila para 30%, ou seja, com o compósito GCC30-K8-E6. Em seguida foram ensaiados os CPs de Kraftterra com 8% de kraft e solo corrigido com 15% de argila na composição.

O desempenho dos CPs de Kraftterra GCC30-K8-E6 (Anexo 9) alcançaram valores abaixo dos verificados com as amostras-base correspondentes, sendo o maior valor de 1,76 MPa, ou seja, um desempenho 26,5% menor que o de Kraftterra com 6% de kraft na mistura. Por sua vez, pior desempenho teve o GCC15-K8-E6 (Anexo 8), com valores 41,5% menores que o GCC15-K6-E6, alcançando no máximo 1,21 MPa. Optou-se por não prosseguir com as análises dos CPs GC-K8-E6 tendo em vista a comprovada diminuição da resistência à compressão simples do Kraftterra com o aumento do percentual de kraft na mistura para 8%. Conseqüentemente seguiram-se às análises com a variável "kraft" com a redução para 4%.

Os CPs do novo compósito com 4% kraft, GCC30-K4-E6, também apresentaram comparativamente desempenho inferior ao das amostras-base, GCC30-K6-E6. As misturas com 4% de kraft alcançaram valores máximos de tensão de ruptura à compressão simples de 1,59 MPa (Anexo 11). Procederam-se as análises com esta variável a 4% com o solo corrigido para percentual de argila de 15% e os CPs GCC15-K4-E6 chegaram a valores de até 1,32 MPa (Anexo 10).

Com os resultados dos estudos com a variável "kraft" concluiu-se que o melhor desempenho do compósito Kraftterra quanto à resistência à compressão simples ocorreu com os CPs produzidos com solo com 30% de argila, 6% de fibras dispersas de papel kraft e 6% de cimento.

Cabe ressaltar que com o percentual de 6% de kraft (em massa) para a produção de BTCs é possível reciclar e incorporar as fibras de mais de um saco de 50kg cimento por BTC maciço com dimensões 22 x 11 x 5,5 cm.

Cabe lembrar e ressaltar neste momento que os CPs GCC30-K6-E6 foram os que alcançaram o melhor desempenho quanto à resistência à compressão simples e também os que apresentaram as melhores características e melhor comportamento nos ensaios de retração linear. Portanto, estas foram as proporções adotadas para os estudos e análises comparativas com os BTCs de Kraftterra e solo-cimento, 6% de kraft e 6% de cimento.

Com as análises dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples de CPs de Kraftterra e solo-cimento foi possível reconhecer e estabelecer algumas características distintas e de grande importância entre os dois

compósitos, com os valores de umidade ótima e com o comportamento após ruptura à compressão simples.

Com a adição das fibras dispersas de kraft ocorrem aumentos significativos nos valores de umidade ótima dos compósitos de Kraftterra em comparação com os de solo-cimento. Esta característica é benéfica, uma vez que a maior quantidade de água nas misturas melhora as condições de trabalhabilidade, o que, por sua vez, proporciona uma melhor incorporação das fibras ao solo durante o processo de mistura dos compósitos.

Além disso, misturas com valores maiores de umidade resultam em melhores condições de hidratação tanto para o material estabilizante, o cimento, quanto para a porção fina presente nos solos, a argila. Este fato também repercute positivamente nas condições de cura dos compósitos, o que repercute diretamente num melhor comportamento e desempenho final dos componentes construtivos.

Quanto ao comportamento após ruptura por compressão constatou-se que os compósitos de Kraftterra, além de resistirem mais à compressão simples que os de solo-cimento, também apresentam a característica de continuar a ter boa resistência a estes esforços depois da ruptura à compressão simples e mesmo após apresentarem grandes deformações. Ou seja, os compósitos de Kraftterra não entraram em estado de colapso imediato após ultrapassarem os limites de resistência à compressão simples.

Quanto maior o percentual de kraft nas misturas maiores são os percentuais de deformação dos CPs quando da ruptura à compressão simples. O CP de Kraftterra que apresentou melhor desempenho, GCC30-K6-E6, alcançou o maior valor de tensão de ruptura à compressão simples com um percentual de deformação de 11%, como pode ser visto no Anexo 5. Com o compósito GCC30-K4-E6, por exemplo, a deformação registrada quando da maior tensão de ruptura foi de 4,8% e com GCC30-K8-E6 foi de 13%. Entretanto, o CP de solo-cimento GCC30-K0-E6 quando rompeu à compressão simples apresentava uma deformação de apenas 1,8% e em seguida uma abrupta perda de resistência à compressão, caracterizando um colapso imediato após ultrapassar o limite de resistência.

Pode-se também concluir que a inclusão das fibras proporciona um grande aumento da capacidade do novo compósito em resistir bem aos esforços de tração transversal decorrentes dos esforços de compressão simples mesmo depois da tensão máxima de ruptura à compressão simples e mesmo depois de sofrer grandes deformações. Estas características podem ser observadas na Fig. 40 onde aparecem corpos-de-prova ao final dos ensaios de compressão simples, os de Kraftterra (esquerda e centro) bastante esmagados e o de solo-cimento (direita) com sinais de pequeno esmagamento. Estas imagens foram produzidas quando o recuo do ponteiro de carregamento da máquina de ensaio à compressão foi de 10% do valor da carga máxima alcançada no ensaio (recomendações da NBR 12025 - ABNT, 1990).



Fig. 40 – CPs cilíndricos de Kraftterra (esquerda e centro) e de solo-cimento (direita) após o final dos ensaios de compressão simples. Imagem da esquerda CPA-026. Imagem do centro CPA-026 (esq.) e CPA-028 (dir.)

O CPA-026 da figura acima (SA1-K6-E6, com 28 dias) foi produzido com solo de Aveiro, 6% de kraft, 6% de cimento e umidade um pouco acima da umidade ótima e registrou o valor máximo de tensão de ruptura de 10,12 MPa com uma deformação de 14,8%. Após o recuo de 10% no valor de tensão o corpo-de-prova registrava uma deformação de 20,5%, ou seja, mesmo depois de tamanho esmagamento, deformações e alterações de forma o CP ainda apresentava resistência a uma tensão de compressão de aproximadamente 9,0 MPa, como pode ser visto no gráfico de tensão/deformação do ensaio de resistência à compressão simples (Fig. 41).

Já o CPA-028 (SA1-K6-E6, com 28 dias) com umidade de compactação bem abaixo da umidade ótima do compósito registrou o valor máximo de tensão de ruptura de 15,24 MPa com 8,5% de deformação específica. Após 10% de recuo do ponteiro apresentava o valor de resistência de 13,25 MPa e uma deformação de 11,62% (Fig. 42).

Conclui-se que os percentuais de deformação específica quando do carregamento à compressão simples serão menores caso a umidade da mistura esteja um pouco abaixo da umidade ótima de compactação. O inverso também é verdadeiro, ou seja, quando a umidade da mistura estiver um pouco acima da umidade ótima maiores serão os percentuais de deformação.

Cabe observar que a resistência do corpo-de-prova cilíndrico é maior – para um mesmo traço – que a resistência do tijolo produzido. O próprio processo de moldagem e compactação, que no caso é realizado em três camadas sucessivas e com aplicação de uma energia constante é bastante uniforme, é o fator que garante melhor resultado (GRANDE, 2003). Deste fato resultam os valores de tensão máxima de ruptura à compressão simples alcançados pelos CPs cilíndricos estarem tão acima dos registrados com os BTCs.

Também é possível perceber nas figuras 41 e 42 a grande influência que o percentual de água da mistura produz no desempenho e comportamento final dos compósitos. O desempenho do CPA-028 quanto à resistência à compressão simples foi aproximadamente 50% superior ao do CPA-026 (de 10,12 MPa para 15,24 MPa), sendo que a única diferença entre os dois CPs está no percentual de umidade das respectivas misturas.

Cabe registrar o grande aumento nos valores de resistência á compressão simples quando são comparados CPs similares ensaiados aos 7 dias e aos 28 dias após a compactação. Os CPA-027 e CPA-028 foram produzidos com mesmo material e percentual de umidade da mistura bem próximo (13,30% e 13,35%, respectivamente) e os ensaios apresentaram uma enorme diferença entre o desempenho final dos dois CPs quanto à compressão simples. O CPA-027 alcançou o valor de tensão de ruptura de 5,45 MPa (Fig. 43). CPA-028 quase que triplicou esse valor, alcançando 15,24 MPa (Fig. 42).

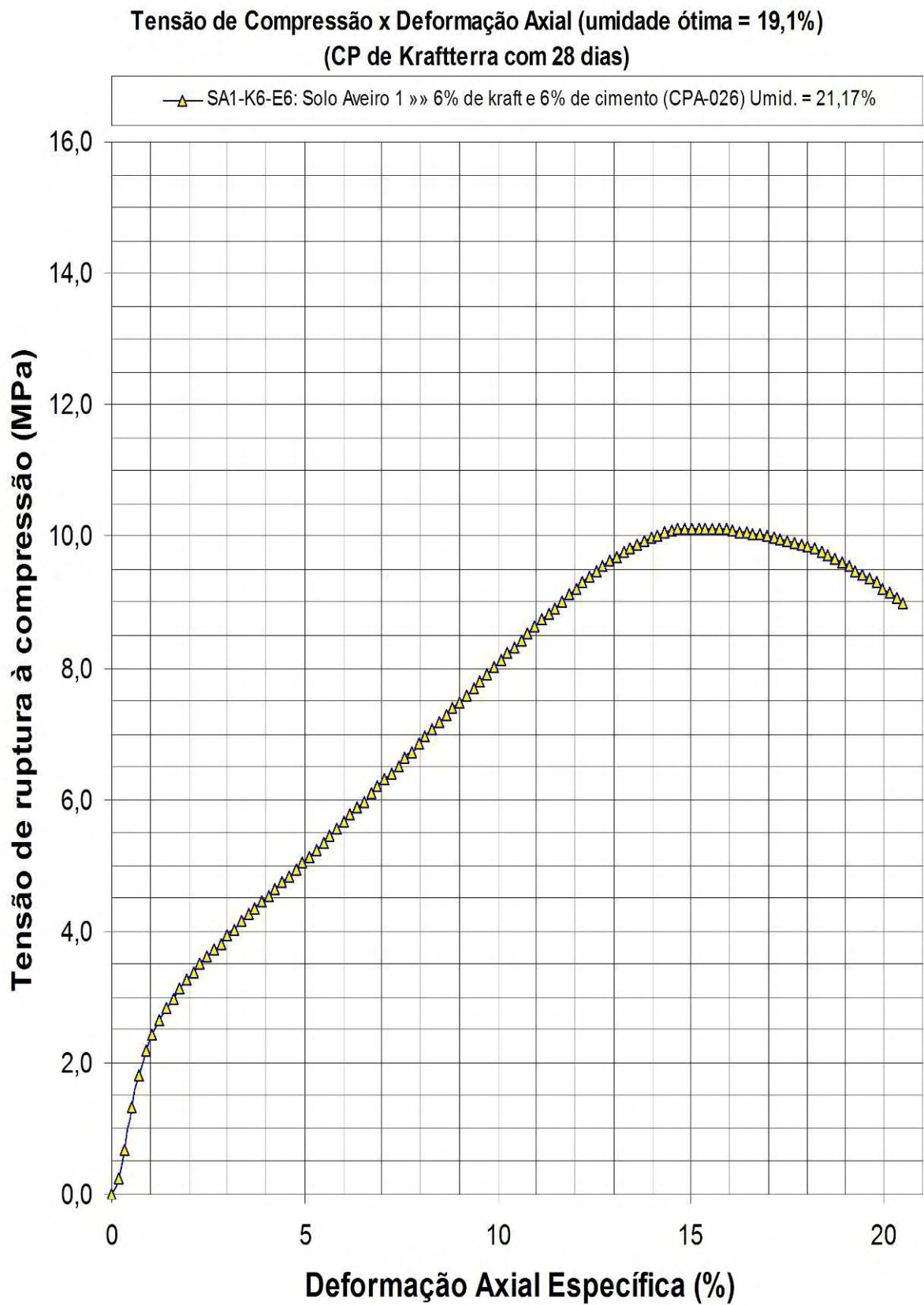


Fig. 41 – Gráfico de TENSÃO DE COMPRESSÃO X DEFORMAÇÃO AXIAL ESPECÍFICA, SA1-K6-E6, Kraftterra com 28 dias. CPA-026 com umidade de mistura 2% acima da umidade ótima de compactação.

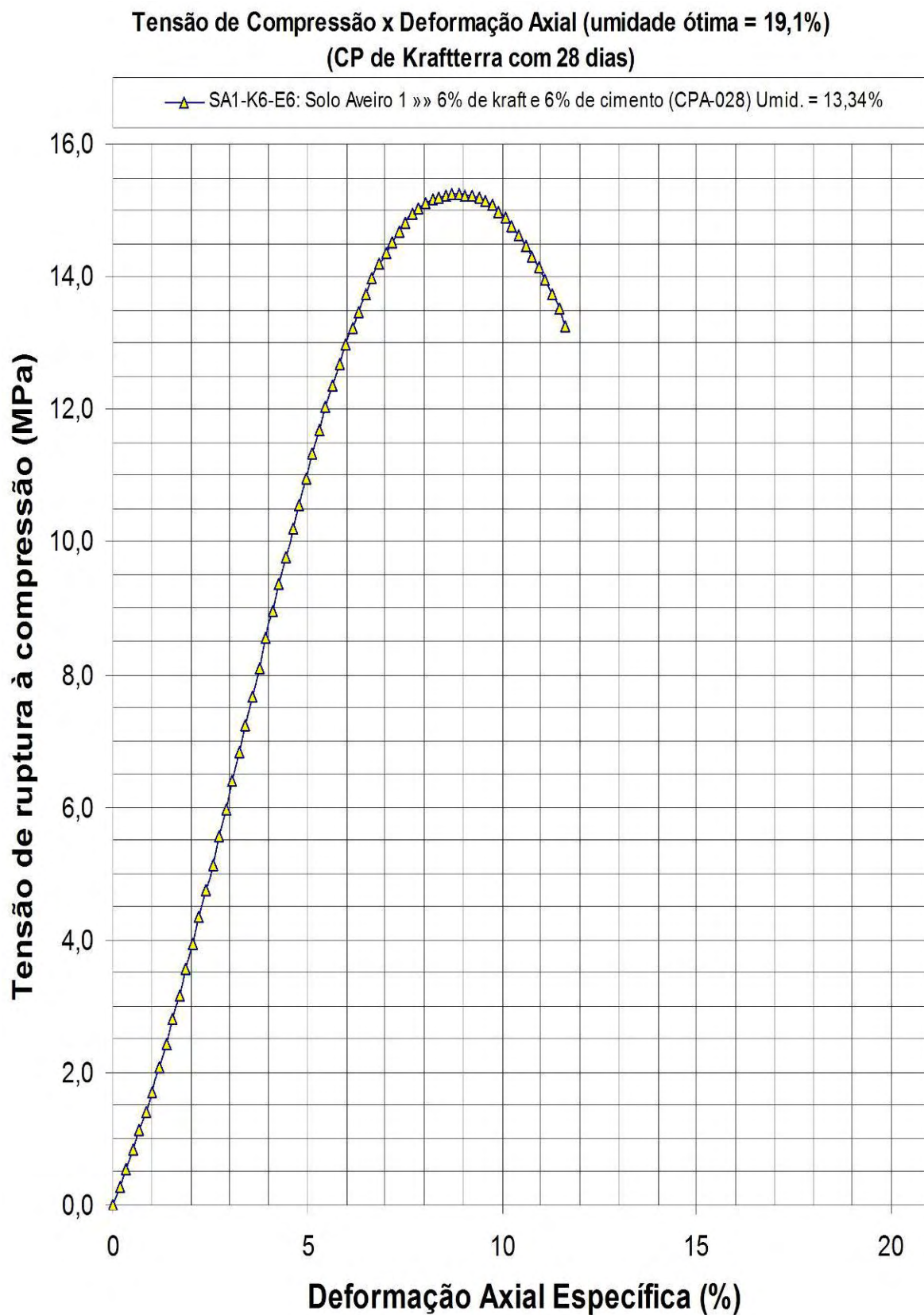


Fig. 42 – Gráfico de TENSÃO DE COMPRESSÃO X DEFORMAÇÃO AXIAL ESPECÍFICA, SA1-K6-E6, Kraftterra com 28 dias. CPA-028 com umidade de mistura 6% abaixo da umidade ótima.

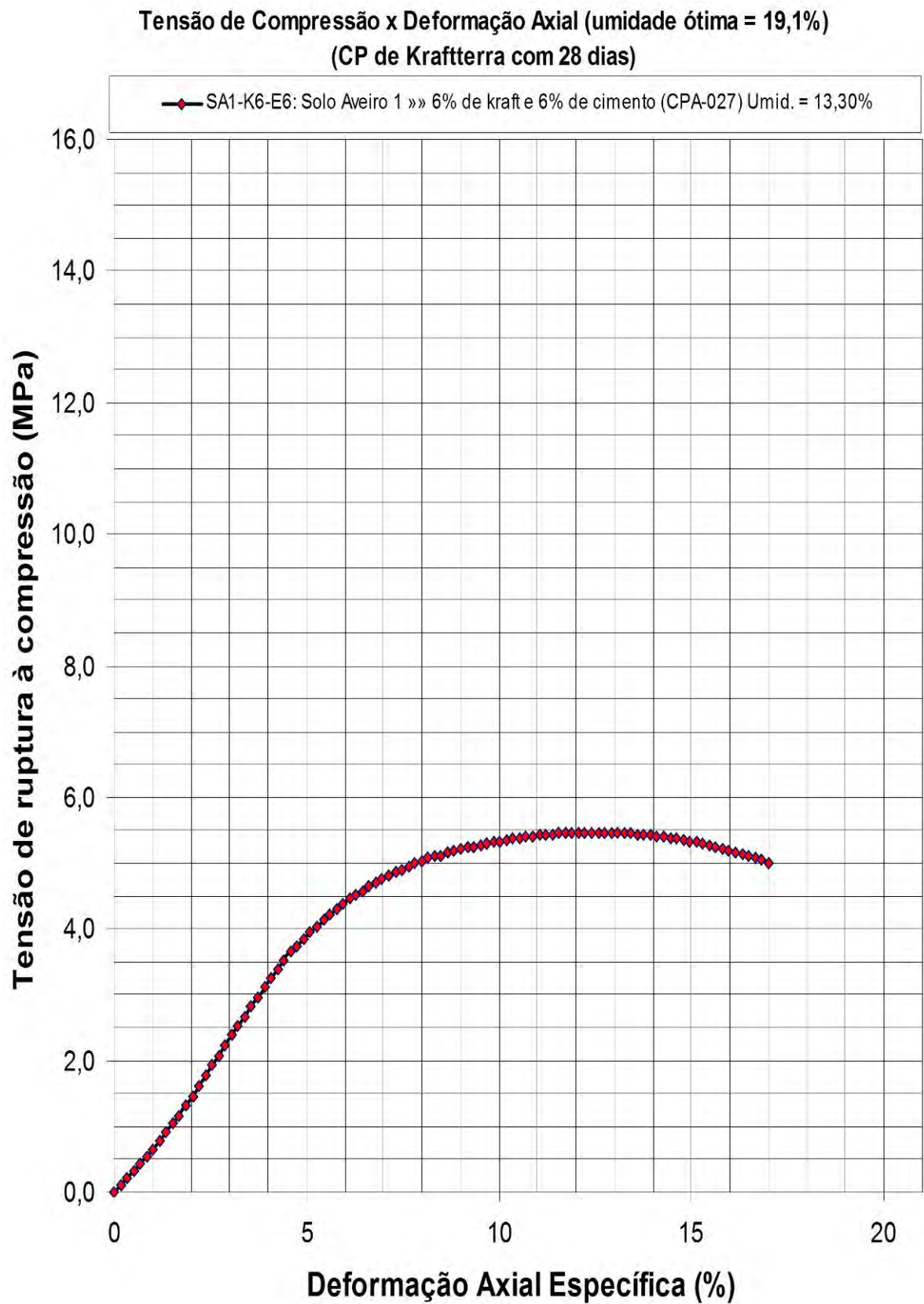


Fig. 43 – Gráfico de TENSÃO DE COMPRESSÃO X DEFORMAÇÃO AXIAL ESPECÍFICA, SA1-K6-E6, Kraftterra com 7 dias após compactação.

5.5 Resistência à compressão simples - BTCs

Os ensaios de compactação (NBR 12023 – ABNT, 1992) com CPs de Kraftterra (SA1-K6-E6) e solo-cimento (SA1-K0-E6) para definição das umidades ótimas e verificação dos melhores índices de umidade para se obter os melhores desempenhos quanto à resistência à compressão simples indicaram que os CPs de Kraftterra e solo-cimento obtiveram melhor desempenho com valores de umidade bem próximos dos valores de umidade ótima (19,1% para SA1-K6-E6 e 11,5% para SA1-K0-E6). Mais uma vez os CPs de Kraftterra alcançaram valores máximos de tensão de ruptura maiores que os de solo-cimento, 7,01 MPa para os CPs de Kraftterra (Anexo 13) e 6,42 MPa para os de solo-cimento (Anexo 12).

Seguindo a tendência dos resultados da caracterização do novo compósito o desempenho dos BTCs de Kraftterra também foi superior ao dos BTCs de solo-cimento. O valor máximo de tensão de ruptura à compressão simples alcançado pelos CPs de Kraftterra foi de 7,20 MPa e pelos CPs de solo-cimento foi um pouco menor, 7,1 MPa (Anexos 14 e 15). Entretanto, o valor médio das tensões de ruptura dos CPs de Kraftterra foi 11,23% maior que o dos CPs de solo-cimento, 6,04 MPa e 5,43 MPa respectivamente (Tabela 3). Já o desvio padrão dos valores das tensões de ruptura dos CPs de Kraftterra foi de 0,75, menor do que o dos CPs de solo-cimento, que foi de 0,94.

Tabela 3 – Tensão de ruptura à compressão simples de CPs de BTCs de Kraftterra e solo-cimento em ensaios de resistência à compressão simples (MPa).

BTCs de KRAFTTERRA									
6,75	6,70	5,43	6,00	5,05	6,43	5,16	6,29	7,20	5,42
BTCs de SOLO-CIMENTO									
4,58	4,38	6,39	4,30	4,98	5,45	6,05	6,05	5,04	7,10

Ao término dos ensaios de envelhecimento acelerado com 6 ciclos de alternância entre situações extremas de umidade (imersão em água por 6 horas) e calor (42 horas em estufa a 71°C) os BTCs de Kraftterra e solo-cimento apresentaram pouco desgaste, nenhuma fissura, fragmentação, eflorescência ou bolor. Os CPs de BTCs de Kraftterra e solo-cimento após os ensaios de envelhecimento acelerado tiveram pequena diminuição no desempenho quanto à resistência à compressão simples se comparados com os que não passaram pelos ciclos de umidade e temperaturas excessivas. O valor máximo alcançado pelos CPs de Kraftterra foi de 6,64 MPa e pelos de solo-cimento foi de 6,51 MPa (Anexos 16 e

17). O valor médio das tensões de ruptura dos CPs de Kraftterra (5,28 MPa) foi 7,97% maior que o dos CPs de solo-cimento (4,89 MPa). Já o desvio padrão dos valores das tensões de ruptura dos CPs de Kraftterra foi de 0,92. Bem menor do que o dos CPs de solo-cimento que foi de 1,17.

Tabela 4 – Tensão de ruptura à compressão simples de CPs de BTCs de Kraftterra e solo-cimento em ensaios de compressão simples após ciclos de envelhecimento acelerado (MPa).

BTCs de KRAFTTERRA (após envelhecimento acelerado)				
5,59	6,64	5,32	4,34	4,52
BTCs de SOLO-CIMENTO (após envelhecimento acelerado)				
4,49	6,51	5,54	4,5	3,42

Conclui-se que mesmo após os ciclos de envelhecimento acelerado o novo compósito apresentou desempenho satisfatório e compatível com as exigências construtivas quanto à resistência à compressão simples, tendo sido registrada apenas uma pequena diminuição na média dos valores máximos de tensão de ruptura (de 0,76% para Kraftterra e 0,54% para solo-cimento), o que demonstra o bom comportamento e desempenho dos BTCs de Kraftterra mesmo depois de passarem por situações ambientais extremas.

Em todos os ensaios de resistência à compressão simples os BTCs de Kraftterra apresentaram melhor desempenho que os BTCs de solo-cimento e a mesma característica registrada quando da caracterização do novo compósito de aumento da capacidade em resistir bem aos esforços de compressão mesmo depois da tensão máxima de ruptura e mesmo depois de sofrer grandes deformações decorrentes de tensões de compressão também foi identificada nos BTCs de Kraftterra.

No ensaio com o CP de BTC de Kraftterra de melhor desempenho registrou-se uma deformação específica de 9,43% quando o valor máximo da tensão de ruptura foi alcançado (7,20 MPa). Após recuo do ponteiro em 10% do valor máximo de tensão de ruptura a deformação específica registrada era de 12,84%. Já com o CP de BTC de solo-cimento de melhor desempenho a deformação específica registrada no valor máximo de tensão era de 1,55% e após o recuo do ponteiro passou para 1,89%. Esta característica pode ser visualmente percebida nas imagens da Fig. 44 que registraram o momento inicial e ao final dos ensaios de compressão simples de CPs de BTCs de solo-cimento (acima) e de Kraftterra (abaixo).

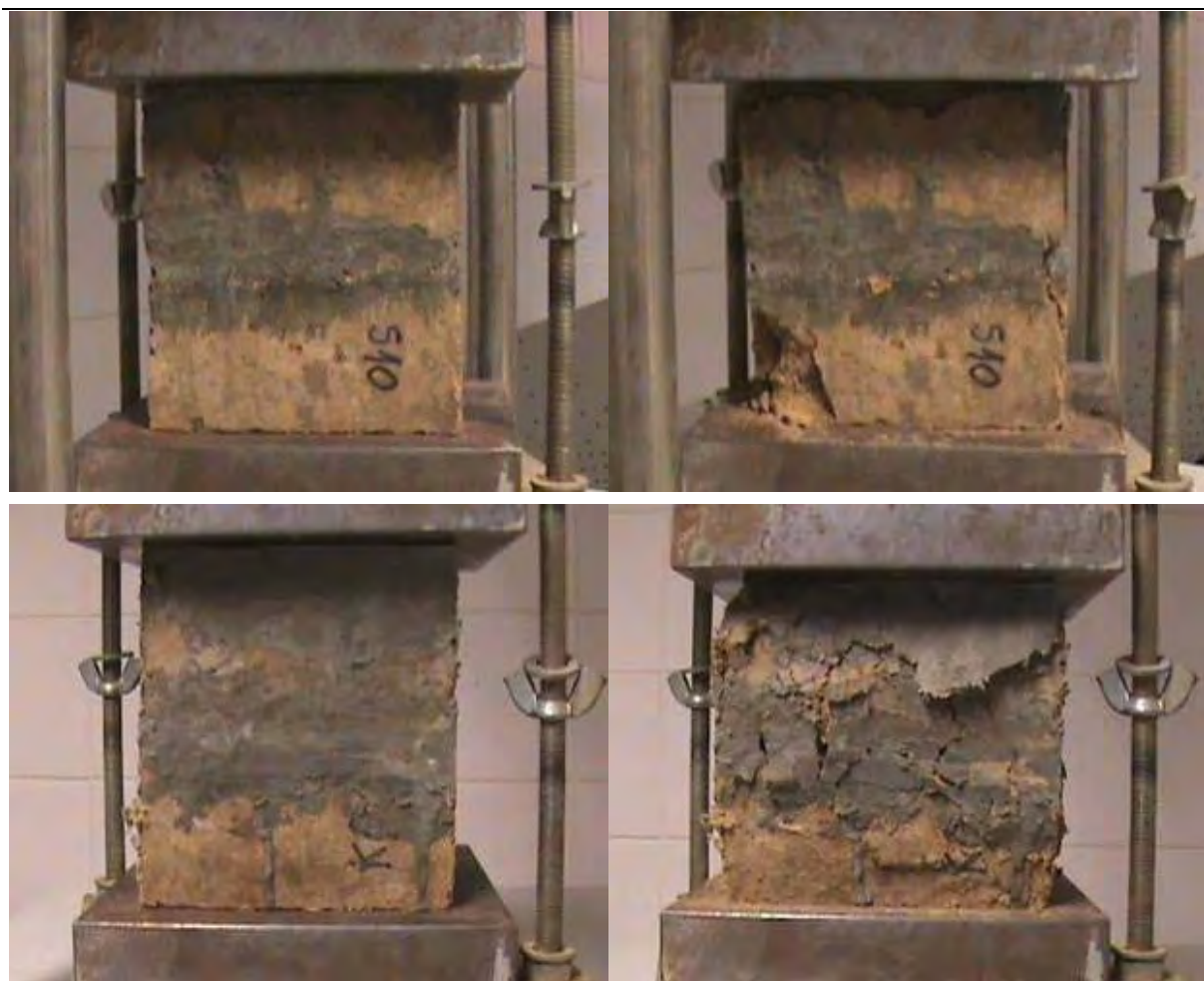


Fig. 44 - CPs de BTCs de Kraftterra (abaixo) e solo-cimento (acima) no início e ao final dos ensaios de resistência à compressão simples.

5.6 Envelhecimento acelerado - BTCs

Verificou-se ao final dos ensaios que ocorreram pequenas variações de volume entre as etapas de molhagem e secagem. A média das variações de volume dos BTCs de Kraftterra foi de 0,23% positivos, ou seja, com aumento de volume. Já com os BTCs de solo-cimento a média das variações de volume foi de 0,34% positivos. Os BTCs de Kraftterra apresentaram melhor desempenho após os ciclos de umidade e secagem com menores variações de volume que os de solo-cimento.

A média das variações de absorção de água dos BTCs de Kraftterra foi de 19,61% após as etapas úmidas e de 1,18% após as etapas secas. Já os BTCs de solo-cimento apresentaram variações menores, sendo de 14,12% após as etapas úmidas e de 0,82% após as etapas secas. Ou seja, o comportamento identificado nos ensaios de absorção de água quando da caracterização do novo compósito

também foi verificado nos ensaios de envelhecimento acelerado. Os BTCs de Kraftterra absorvem mais água que os BTCs de solo-cimento.

Quanto ao comportamento físico e estado visual ao término dos ensaios de envelhecimento acelerado os BTCs de Kraftterra e de solo-cimento apresentaram poucos desgastes; nenhuma fissura; nenhuma fragmentação, eflorescência ou bolor. As imagens da Fig. 45 são dos BTCs de solo-cimento antes e depois dos ensaios de envelhecimento acelerado e as da Fig. 46 dos BTCs de Kraftterra. Nelas é possível perceber que ocorreram poucas alterações visuais e físicas nos BTCs de solo-cimento e de Kraftterra.



Fig. 45 - BTCs de solo-cimento (1 a 5) antes (acima) e depois (abaixo) dos ensaios de envelhecimento acelerado.

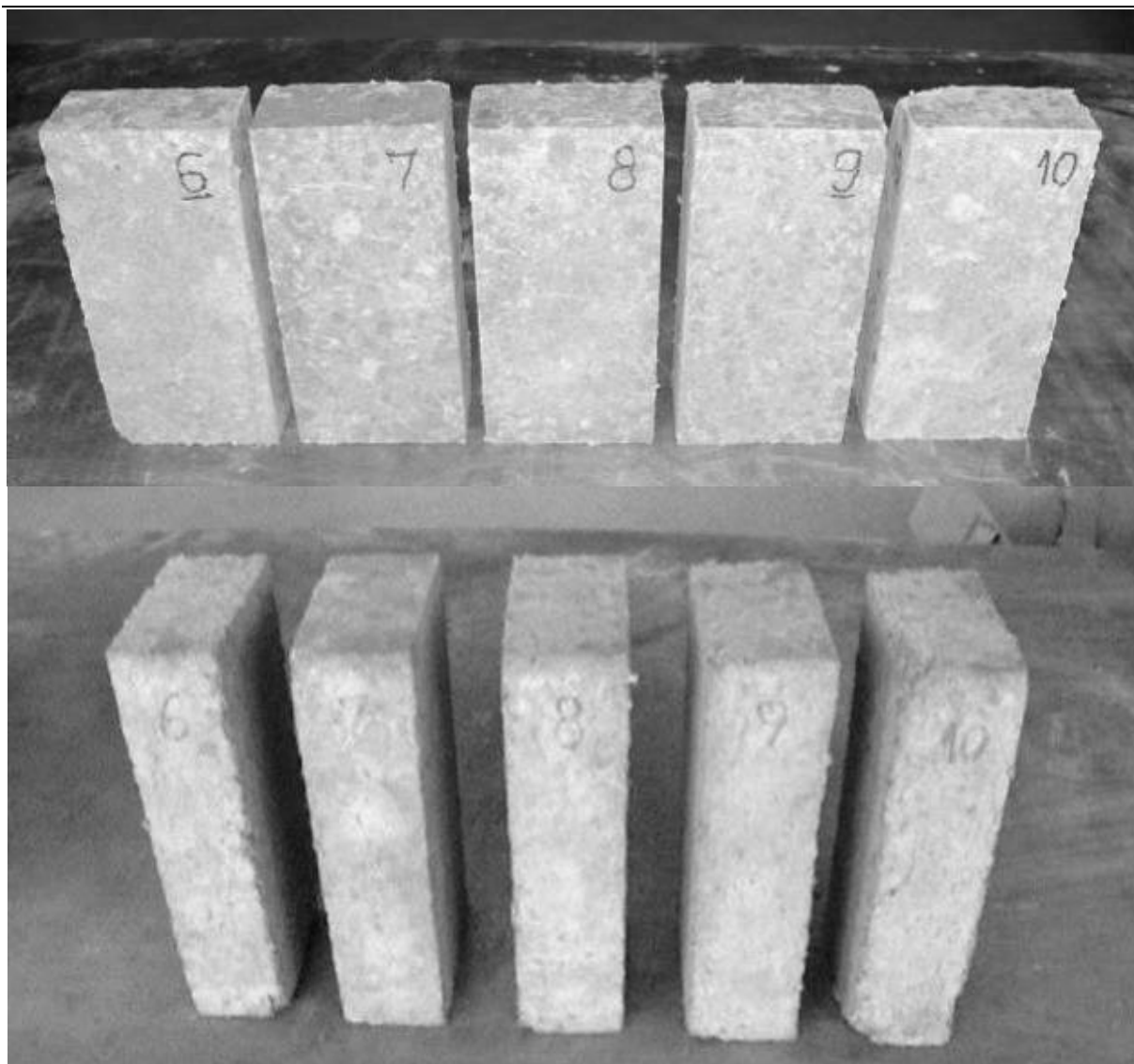


Fig. 46 – BTCs de Kraftterra (6 a 10) antes (acima) e depois (abaixo) dos ensaios de envelhecimento acelerado.

5.7 Absorção de água por imersão - BTCs

A comparação direta entre o desempenho dos BTCs de solo-cimento e Kraftterra sem a adição de seiva demonstrou mais uma vez que a incorporação de fibras ao compósito aumenta significativamente o índice de absorção de água. A média dos valores percentuais de absorção de água dos BTCs de solo-cimento foi de 18,08% e dos BTCs de Kraftterra foi de 25,67% (aumento de 7,65%).

Cabe ressaltar que este comportamento não inviabiliza o uso do Kraftterra e sim que tal característica deve ser considerada ao se trabalhar com o Kraftterra, sendo recomendado o uso de solos com baixo índice de absorção de água ou a incorporação de aditivos ao compósito para minimizar tal comportamento.

Os ensaios com a adição de seiva de babosa nos compósitos de Kraftterra demonstraram ser eficiente o uso deste material para a fabricação de BTCs, uma vez que foi comprovada a redução dos valores de absorção de água pelos BTCs. Os CPs com 1% de seiva apresentaram o valor médio de absorção de água de 23,08%, ou seja, uma redução de 2,59% em comparação com os valores dos BTCs sem qualquer adição da seiva. Já com os CPs com 4% de concentração de seiva a média foi de 22,62%, o que representa uma redução percentual da absorção de água de 3,05%.

Foi possível perceber visualmente a redução dos índices de absorção de água com a adição da seiva da babosa em BTCs de Kraftterra através da imersão simultânea de três BTCs de Kraftterra com percentuais de concentração de seiva nas misturas de 0%, 1% e 4% em tanque com paredes transparentes. Foi feito um registro fotográfico e em vídeo. Nas imagens da Fig. 47 observa-se a diminuição progressiva da quantidade de bolhas de ar que saem dos BTCs. A redução da quantidade de bolhas que saem dos BTCs com a presença de seiva é bem mais rápida e evidente que no BTC sem a seiva. No primeiro minuto já se consegue perceber a diferença.

Conclui-se que os BTCs produzidos com o Kraftterra apresentam grande tendência em absorver água, bem mais que os componentes de solo-cimento. Por sua vez, esta característica pode ser controlada ou minimizada com aditivos, a exemplo do uso da seiva de Aloe vera inicialmente estudado.

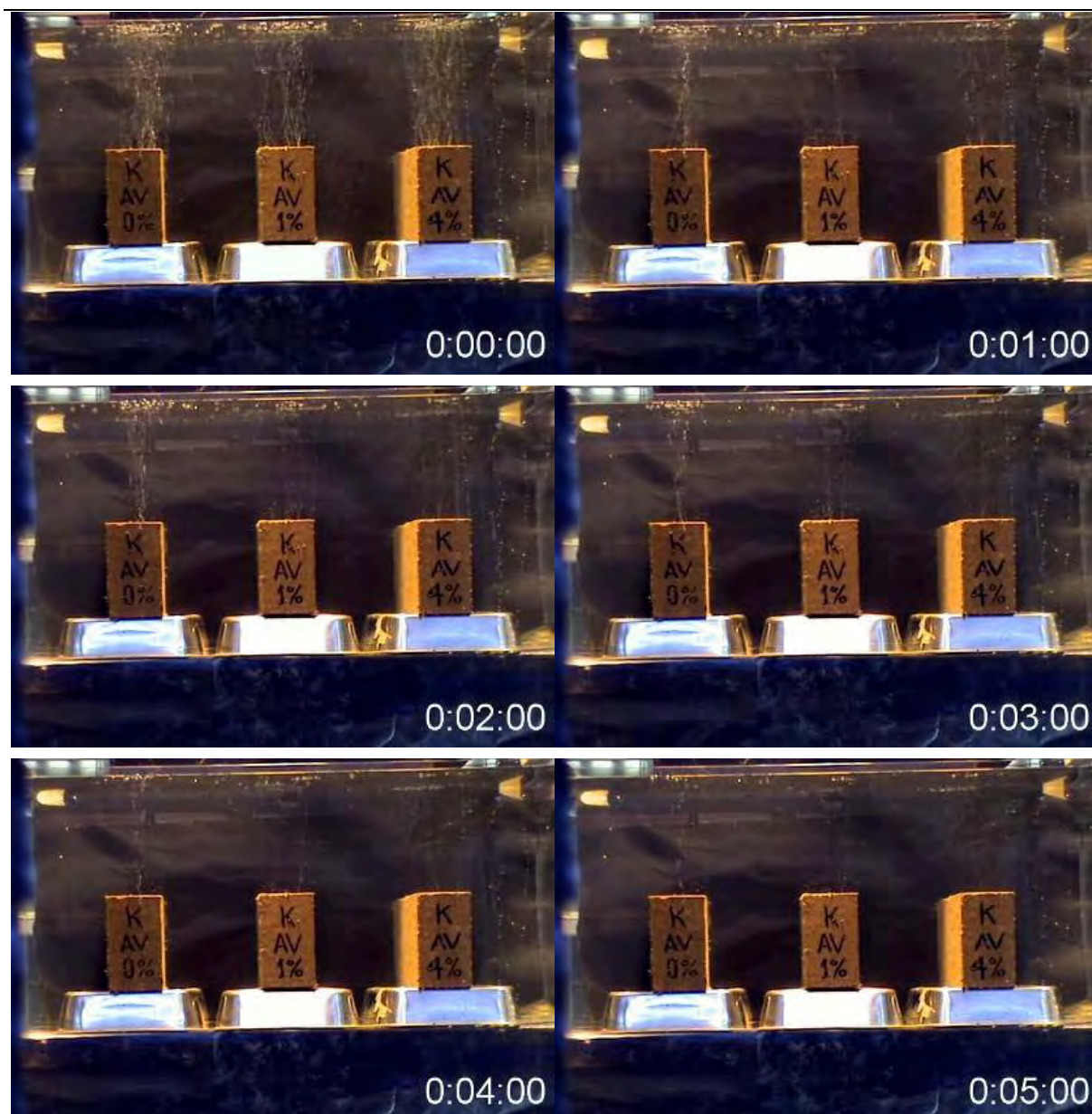


Fig. 47 – Ensaio visual comparativo para reconhecimento do comportamento de BTCs de Kraftterra quanto à absorção de água com o uso de tanque com paredes transparentes.

5.8 Resistência à compressão simples - paredes

Em geral, o comportamento dos prismas ao carregamento foi bastante uniforme e semelhante, excetuando-se um ensaio onde o carregamento atingiu o valor máximo admissível do anel dinamométrico de 50 kN (11000 divisões) e o ensaio não pode ser concluído. O maior valor de tensão de ruptura à compressão simples, 6,22 MPa, foi registrado exatamente neste prisma, PK2 (Fig. 50 e Anexo 18), a qual certamente apresentaria valor ainda maior caso o ensaio não tivesse sido interrompido. Ficou patente neste ensaio que o posicionamento do prisma no equipamento foi bem feito e que o carregamento ocorreu uniformemente

sobre toda o prisma. Através do vídeo foi possível perceber que os extensômetros das barras verticais apresentavam pequenas variações nos valores de deformação. Ao final do ensaio também foi possível perceber que o prisma não apresentou deslocamentos para fora do eixo de carregamento, fato que ocorreu com os demais.

Com os equipamentos e ferramentas disponíveis ficou clara a dificuldade em se posicionar de maneira perfeita o centro de gravidade dos prismas em relação ao eixo do carregamento. Como já comentado acima, em quatro dos cinco ensaios foram registrados deslocamentos para fora do eixo de carregamento, o que resultou numa perda de resistência prematura. Esta dificuldade também resultou em carregamentos não uniformes, os quais foram percebidos ao serem analisadas as imagens dos vídeos e verificadas deformações diferenciadas entre os três extensômetros das barras verticais. Os resultados destas dificuldades podem ser percebidos nas imagens da Fig. 48.

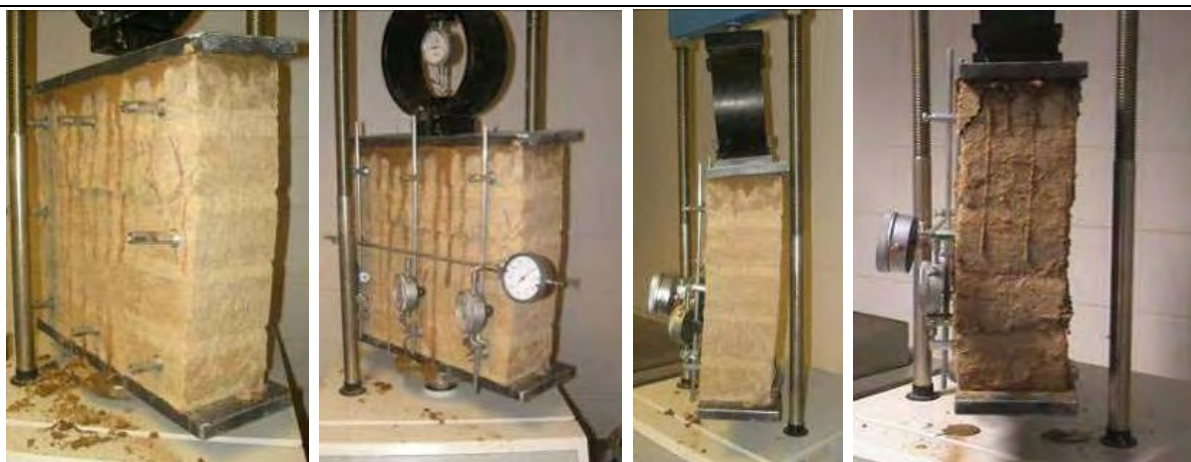


Fig. 48 – Deslocamentos para fora do eixo de carregamento durante ensaios de compressão simples em prismas de BTCs de Kraftterra.

Mesmo com estas dificuldades foi possível perceber o bom desempenho dos prismas quanto à resistência à compressão simples. A média dos valores máximos de tensão foi de 5,66 MPa (o ensaio interrompido não entrou no cálculo), sendo que as variações entre prismas foram muito pequenas, com mínimo de 5,37 MPa e máximo de 5,87 MPa (Fig. 50), desvio padrão igual a 0,21. A média das deformações paralelas ao eixo de carregamento, registradas no centro dos prismas quando da tensão máxima de ruptura, foi de 5,49%.

Os prismas apresentaram comportamento bem uniforme. O desvio padrão dos valores das deformações paralelas ao eixo de carregamento registradas no centro dos prismas quando da tensão máxima de ruptura foi igual a 0,05 (PK5 não considerado). Apenas o PK5 apresentou deformações bem fora da média, alcançando o valor de 7,09%, como pode ser visto no gráfico de tensão/deformação (Fig. 50).

A média dos valores de resistência à compressão simples registrados nos ensaios com os prismas foi bem próxima da média registrada nos ensaios com os BTCs, 5,66 MPa e 6,04 MPa respectivamente. Por sua vez, as médias dos valores percentuais de deformação axial específica quando do momento de ruptura à compressão simples foram relativamente distintas, sendo de 5,49% para os prismas e de 8,00% para os BTCs.

Estes dados indicam que os elementos de vedação tiveram excelente comportamento quanto à compressão simples e que a argamassa de assentamento produzida com Kraftterra resultou em fortes ligações entre blocos e produziu elementos construtivos homogêneos e com características e desempenhos uniformes.

A aparência dos prismas após o encerramento dos ensaios de resistência à compressão simples retratam este comportamento uniforme. As distribuições das fissuras pelos prismas indicam que as rupturas ocorreram por esmagamento em todos os casos e que o carregamento foi distribuído por todos os prismas de maneira bem uniforme, como pode ser visto nas imagens da Fig. 49. Foram constatadas fissuras em todas as direções tanto nos BTCs quanto nas juntas horizontais e verticais.



Fig. 49 – Prismas de Kraftterra após ensaios de resistência à compressão simples. As fissuras foram ressaltadas com tinta vermelha diretamente nos prismas.

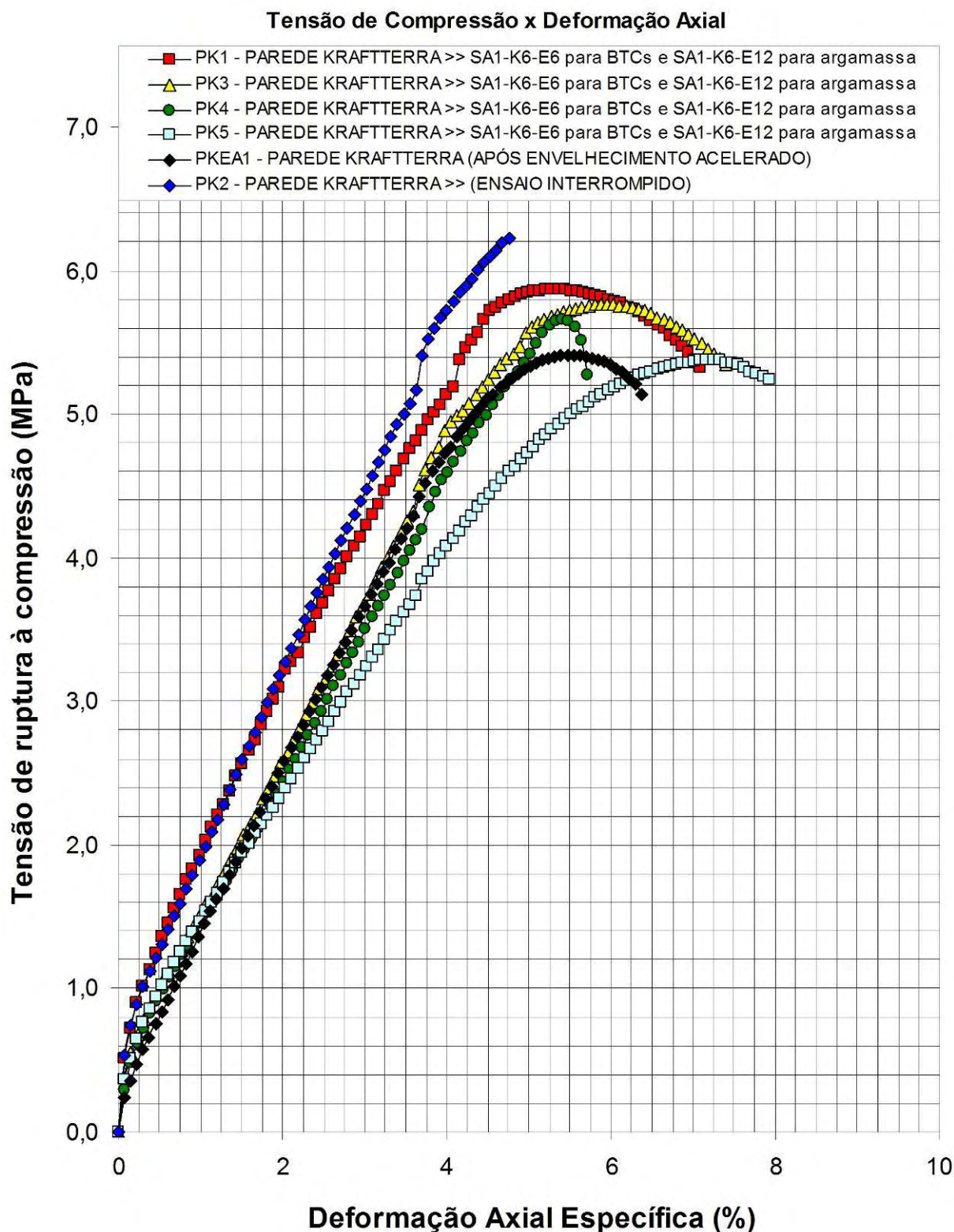


Fig. 50 – Gráfico “Tensão de compressão x deformação axial” de ensaios de resistência à compressão simples de prismas de Kraftterra.

O prisma submetido a ciclos de envelhecimento acelerado apresentou comportamento e desempenho similar aos demais já ensaiados à compressão simples. Alcançou um valor máximo de tensão de 5,41 MPa com uma

deformação axial específica de 5,39%. Sua aparência ao final do ensaio demonstrou que os ciclos de umedecimento e secagem não comprometeram seu desempenho quanto à compressão simples e nem provocaram qualquer enfraquecimento ou desgaste físico. Isto pode ser verificado nas imagens produzidas ao final do ensaio (Fig. 51).



Fig. 51 - Prismas de Kraftterra após ensaios de resistência à compressão simples. Este prisma passou por ciclos de envelhecimento acelerado.

Os valores registrados das deformações perpendiculares ao eixo de carregamento dos vários prismas também foram bem próximos, média de 4,69%. A semelhança do que ocorreu com os valores das deformações axiais, apenas o PK5 registrou um valor fora da média, de 6,29%. Não por coincidência esta amostra foi a que apresentou pior desempenho nos ensaios de compressão simples. O comportamento dos prismas foi bem parecido, com incremento uniforme dos valores à medida que aumentavam as deformações axiais. Em nenhum momento ficou caracterizada alguma ruptura brusca, grande perda de resistência ou variação acentuada das deformações, o que demonstrou que as fibras presentes tanto nos BTCs quanto na argamassa de assentamento atuaram muito bem na contenção dos esforços de tração decorrentes das deformações horizontais ao longo dos ensaios. Mesmo após os prismas terem apresentado grandes deformações nos dois sentidos ainda assim demonstravam boa resistência aos esforços atuantes.

5.9 Resistência à compressão diagonal - paredes

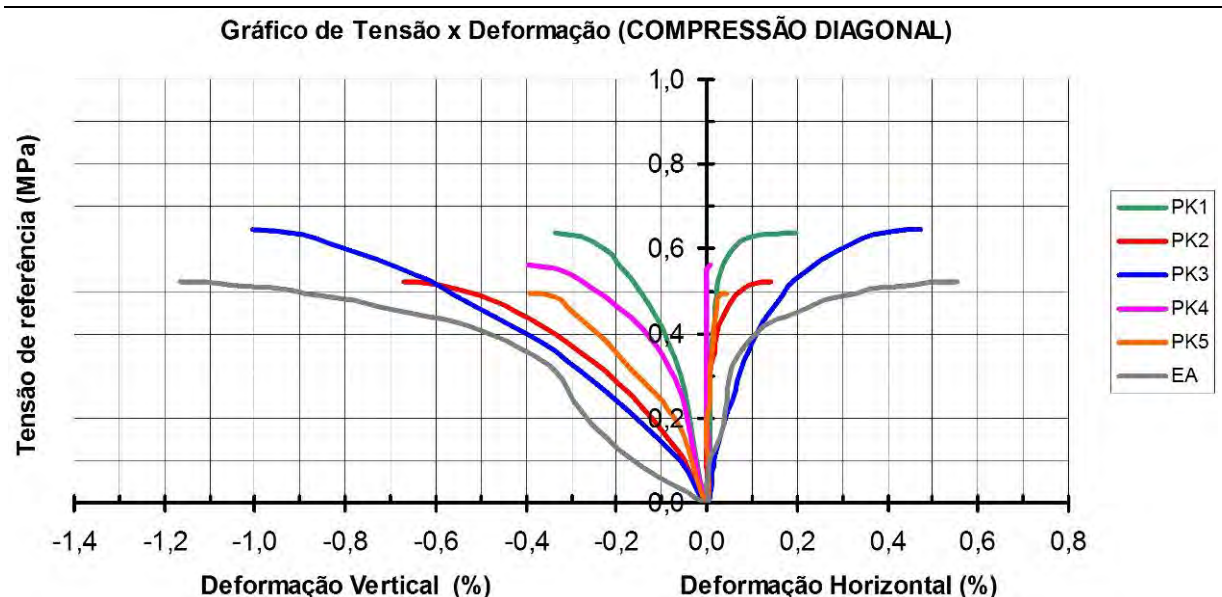
Na Tabela 5 são discriminadas as informações dos seis prismas ensaiados à compressão diagonal e os respectivos valores de tensão de cisalhamento (S_s) e do módulo de elasticidade transversal (G). O prisma "EA" passou por ciclos de envelhecimento acelerado conforme descrito em item específico.

Tabela 5 – Ensaio de compressão diagonal em prismas. Tensão de cisalhamento (S_s) e Modulo de elasticidade transversal (G)

	P (kN)	ℓ (mm)	h (mm)	t (mm)	n	A_n (mm ²)	S_s (MPa)	ΔV (mm)	ΔH (mm)	g (mm)	γ	G (MPa)
PK1	32,93	345	345	106	1	36570	0,636	1,20	0,70	358	0,0053	119,97
PK2	27,02	345	345	106	1	36570	0,522	2,40	0,50	358	0,0081	64,49
PK3	33,35	343	345	106	1	36464	0,646	3,60	1,69	358	0,0147	43,77
PK4	28,92	344	343	106	1	36411	0,561	1,40	3,00	356	0,0123	45,44
PK5	26,17	345	344	106	1	36517	0,506	1,80	0,50	357	0,0064	78,67
EA	27,23	347	348	106	1	36835	0,522	4,20	1,99	360	0,0171	30,40

O valor médio das tensões de cisalhamento alcançado nos ensaios de compressão diagonal (0,566 MPa) está muito próximo de 1/10 do valor médio das tensões máximas à compressão simples (5,66 MPa). Este comportamento já foi mencionado por Varum et. al (2006) em trabalho com paredes de adobe.

Pelo gráfico de tensão/deformação é possível perceber que o prisma que passou por ciclos de envelhecimento acelerado teve desempenho comparativamente inferior, com diminuição da capacidade de resistência à compressão diagonal e com maiores deformações tanto na vertical quanto na horizontal. Ressalta-se que no gráfico da Fig. 52 constam valores até a tensão máxima de ruptura.

Fig. 52 – Compressão diagonal, gráfico Tensão (S_s) x Deformações vertical e horizontal.

Os ensaios de resistência à compressão diagonal demonstraram que os prismas produzidos com BTCs e argamassa de assentamento de Kraftterra possuíam uma excelente aderência entre bloco e argamassa. A monolicidade dos prismas pode

ser comprovada visualmente pelo aspecto ao final dos ensaios de compressão diagonal. Cabe ressaltar que os ensaios foram interrompidos após o recuo do ponteiro em 10% do valor máximo alcançado. Todos os prismas apresentaram linhas de fissura muito próximas da linha normal de carregamento e as fissuras ocorreram tanto nos blocos quanto nas argamassas de maneira semelhante e sem descolamentos entre blocos e argamassa (Fig. 53).

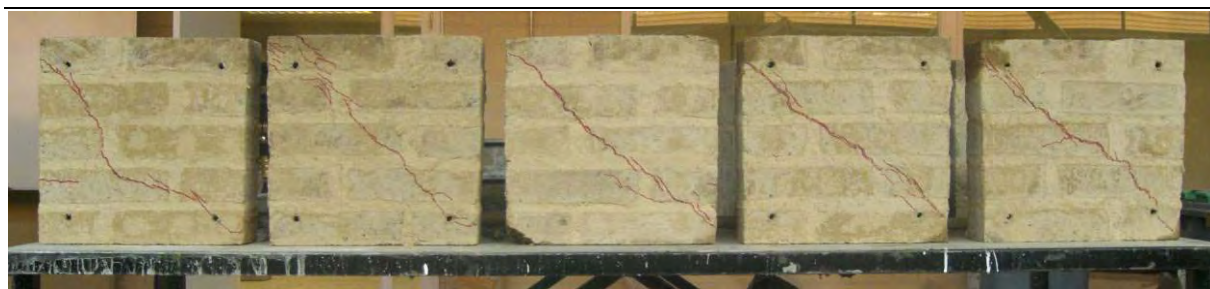


Fig. 53 – Prismas ao final de ensaios de compressão diagonal. As linhas de fissuras foram ressaltadas com tinta vermelha diretamente nos prismas.

Sabbatini (1984) afirma que da aderência bloco-argamassa dependem a monolicidade da parede e a resistência frente a deformações volumétricas, carregamentos excêntricos e os esforços ortogonais à parede, que é o resultado da conjugação das resistências à tração e ao cisalhamento como também da área superficial de contato entre a argamassa e o bloco.

Este autor também afirma que a aderência não é uma propriedade intrínseca da argamassa, depende da natureza e características da base, isto é, existe uma ação inter-relacionada entre base e argamassa formando uma interface. Da capacidade que esta interface possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela sem se romper, dependerá a monolicidade da parede e a resistência da alvenaria frente a solicitações provocadas por deformações volumétricas como a retração hidráulica, dilatação térmica, carregamentos perpendiculares, excêntricos e carregamentos ortogonais e tangenciais à parede tais como carga de vento, excentricidade de execução, sismos, etc.

Mesmos após o final dos ensaios de resistência à compressão diagonal os prismas ainda apresentavam aderência suficiente para evitar a separação das partes quando as mesmas eram levantadas tendo como apoio apenas um dos lados, como pode ser visto nas imagens da Fig. 54.

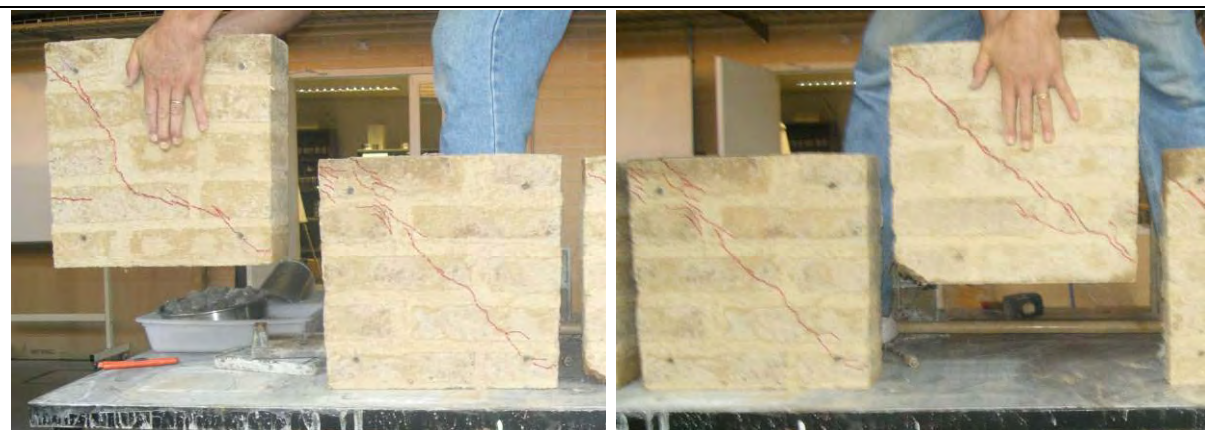


Fig. 54 – Prismas ao serem levantadas apresentam aderência na área de ruptura à compressão diagonal.

Apesar do prisma que passou por ciclos de envelhecimento acelerado ter apresentado um desempenho inferior aos demais sua aparência e o comportamento ao final do ensaio de resistência à compressão simples foram semelhantes aos que não passaram pelos ciclos, ou seja, a ruptura ocorreu seguindo a normal do carregamento e passando tanto pelos blocos quanto pelas áreas de argamassa, como pode ser visto na Fig. 55. Entretanto, é possível perceber a ocorrência de várias linhas de ruptura, diferente dos outros prismas onde as linhas de ruptura eram bastante evidentes e praticamente contínuas.



Fig. 55 – Prisma de Kraftterra que passou por ciclos de envelhecimento acelerado após ensaio de resistência à compressão diagonal.

A presença destas várias linhas de ruptura evidencia que os ciclos de envelhecimento acelerado diminuíram a resistência do prisma aos esforços cortantes e de cisalhamento. Por sua vez percebe-se a permanência da resistência a estes esforços mesmo depois da ruptura por compressão diagonal.

5.10 Resistência ao fogo - paredes

A temperatura ambiente registrada no laboratório quando do início do ensaio foi de 22,8 °C. Após 120 minutos do início do ensaio apresentou pequeno acréscimo passando para 23,0°C. Ao final do ensaio (após 412 minutos e já com o resfriamento da parede) a temperatura ambiente registrada foi de 31.2 °C.

Após atingidas as 2 horas de exposição, o forno foi desligado mas foram mantidos todos os sensores ligados para medição das temperaturas durante a fase de arrefecimento da parede e do forno.

Cabe informar que devido a avarias no termopar 28, localizado no centro do painel P5, não se registou a temperatura durante todo o ensaio neste ponto específico.

No gráfico da Fig. 56 é apresentada a evolução das temperaturas registadas em todos os termopares instalados na face externa da parede não exposta ao fogo. Inclui-se neste gráfico os registros dos termopares 25 e 26 posicionados dentro de um BTC de Kraftterra e do termopar 29 posicionado dentro de um BTC solo-cimento (termopar 28 sofreu avarias).

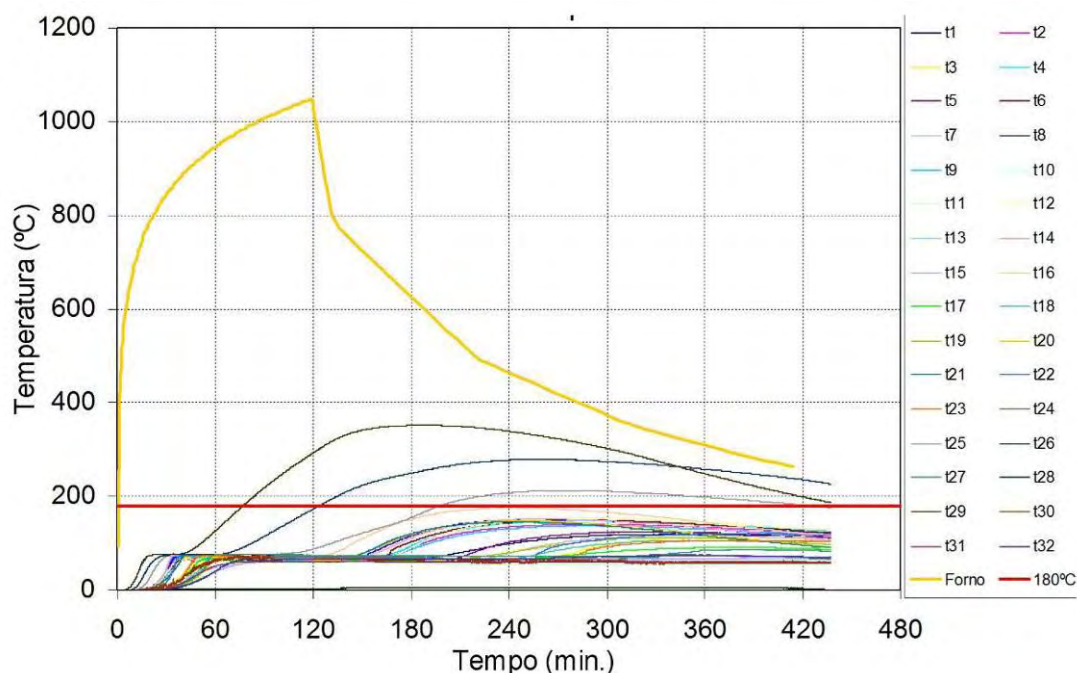


Fig. 56 – Gráfico de temperatura por tempo decorrido no ensaio de resistência ao fogo.

Segundo os critérios de comportamento propostos pela Norma Europeia EN 1363-1, o isolamento é definido através do tempo em minutos completos

durante o qual a parede continua mantendo sua função separadora durante o ensaio sem desenvolver temperaturas elevadas em sua face não exposta em função de que o incremento da temperatura média sobre a temperatura média inicial não seja superior a 140°C ou que o incremento de temperatura em qualquer ponto não sobre passe a temperatura inicial em mais de 180°C. Será considerada como temperatura média inicial aquela temperatura média na face da parede não exposta ao fogo ao início do ensaio.

A temperatura média inicial registrada foi de 22,8°C. Portanto as situações estudadas seriam consideradas como isolantes até o momento em que as temperaturas médias na face não exposta ao fogo alcançassem aproximadamente 160°C ou quando em algum ponto fosse registrada uma temperatura acima de 202,8°C.

Segundo a Instrução Técnica n.º 08/2004 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, que trata da segurança estrutural nas edificações quanto à resistência ao fogo dos elementos de construção, os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) devem ser determinados conforme tabela presente nesta instrução (Anexo 1).

Na tabela citada é possível verificar que o tempo máximo de resistência ao fogo requerido para todas as classificações de edificações é de 120 minutos, a exceção do Grupo M (especial) onde são encontrados valores de 150 minutos. Na Fig. 56 é possível perceber que o comportamento geral da parede foi excelente e que em nenhum ponto de medição na face externa a temperatura passou dos 70°C até o forno ser desligado, ou seja, após 120 minutos do início do ensaio. Isto demonstra que paredes de BTCs maciços assentados com argamassa podem ser consideradas como elemento de construção com excelente desempenho frente à ação do fogo para todos os tipos de edificações, pelo menos para os critérios de comportamento aqui analisados. Para isso considerou-se inexistente a possibilidade das temperaturas externas médias poderem alcançar valores próximos dos 160°C caso o forno permanecesse ligado por mais 30 minutos ou que as temperaturas externas pontuais pudessem ultrapassar os 202,8°C.

Ressalta-se que a parede e suas diferentes situações construtivas aqui analisadas apresentaram desempenho suficiente para potencializá-las como

paredes corta-fogo para uso em escadas de emergências ou em qualquer local destinado à compartimentação de ambiente. Para atestar esta possibilidade cabem análises dos demais critérios de comportamento, a integridade e capacidade portante (no caso de alvenaria estrutural).

Nos gráficos com a evolução das temperaturas de cada painel é fácil perceber o comportamento em cada situação construtiva analisada (Fig. 57 a 62). Para auxiliar na análise comparativa entre os painéis de Kraftterra e solo-cimento quanto ao desempenho e comportamento frente à ação do fogo os gráficos foram agrupados por situação construtiva.

Ao analisar os resultados por painel percebe-se o melhor desempenho dos BTCs de Kraftterra, principalmente nas situações construtivas sem reboco e com reboco nas duas faces. Entretanto, percebe-se também que os materiais demonstraram desempenho bem semelhante, sendo que a maior diferença identificada entre os dois está na menor transmissão de calor pelo Kraftterra. Isto pode ser visualmente identificado nos gráficos que seguem, uma vez que as curvas de temperatura após o desligamento do forno apresentam valores bem menores para o Kraftterra, principalmente para os painéis sem reboco (P2 e P5).

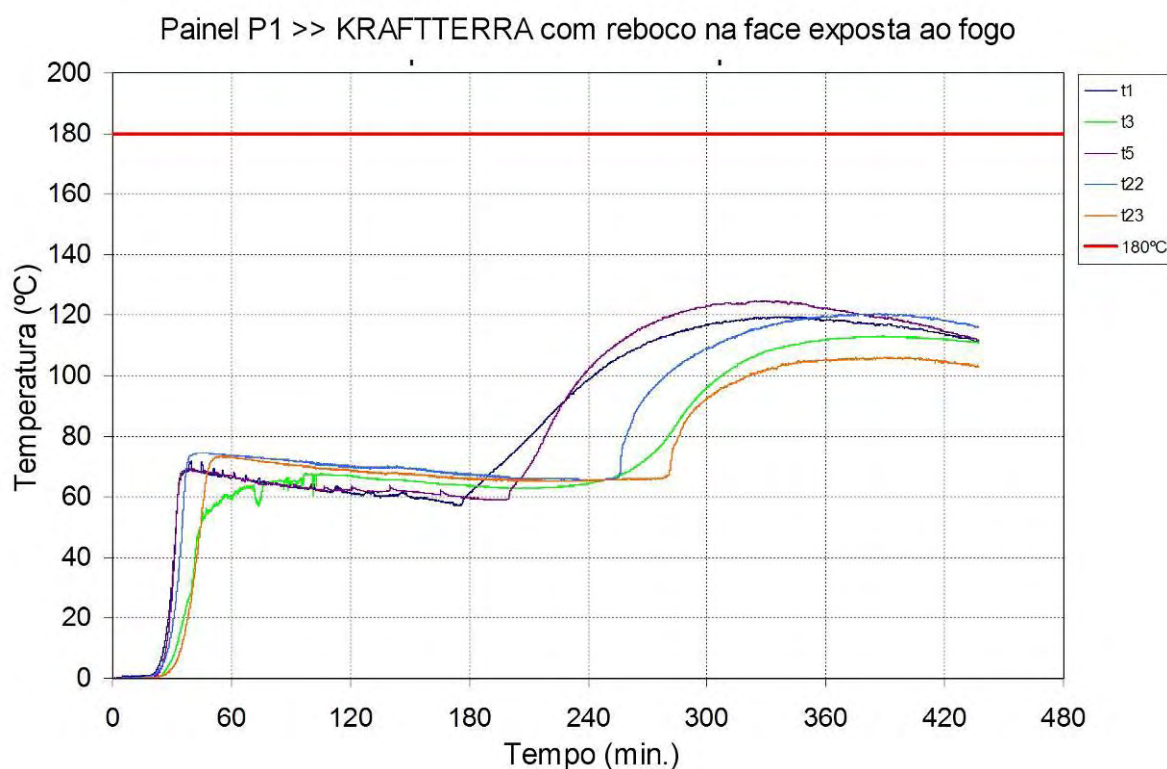


Fig. 57 - Evolução das temperaturas no painel P1, Kraftterra com reboco na face exposta ao fogo.

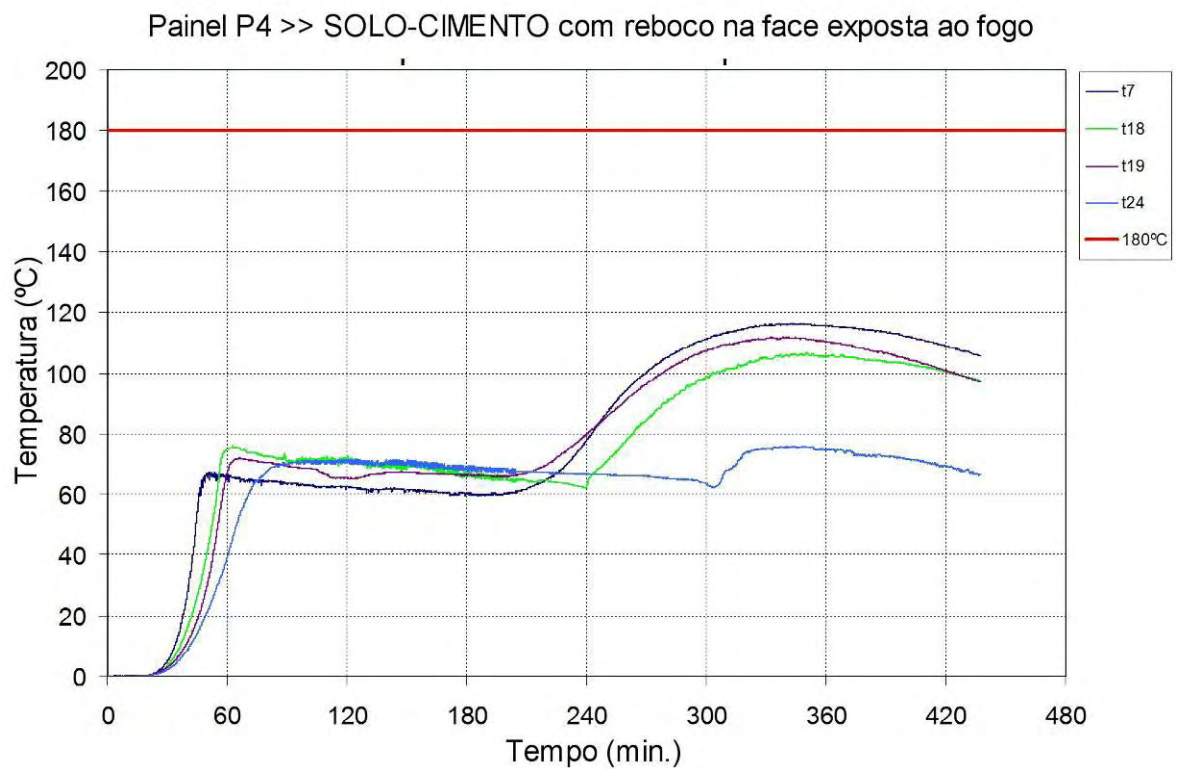


Fig. 58 - Evolução das temperaturas no painel P4, solo-cimento com reboco na face exposta ao fogo.

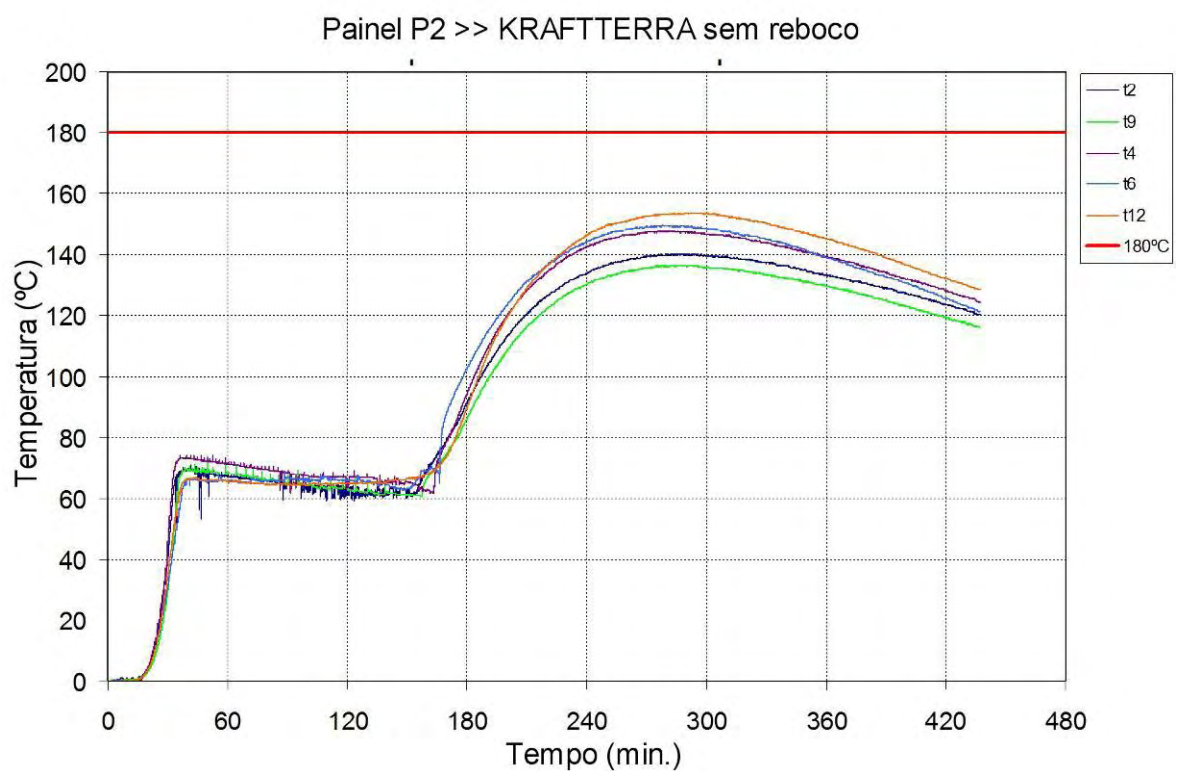


Fig. 59 - Evolução das temperaturas no painel P2, Kraftterra sem reboco.

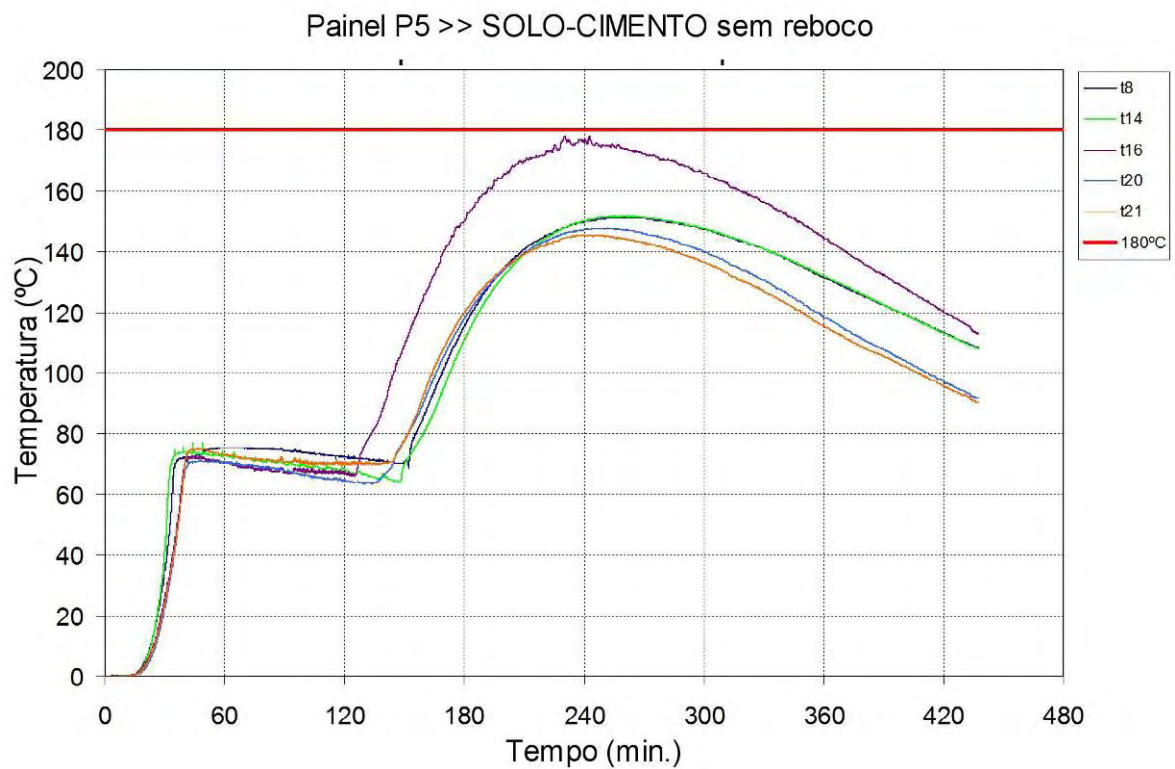


Fig. 60 - Evolução das temperaturas no painel P5, solo-cimento sem reboco.

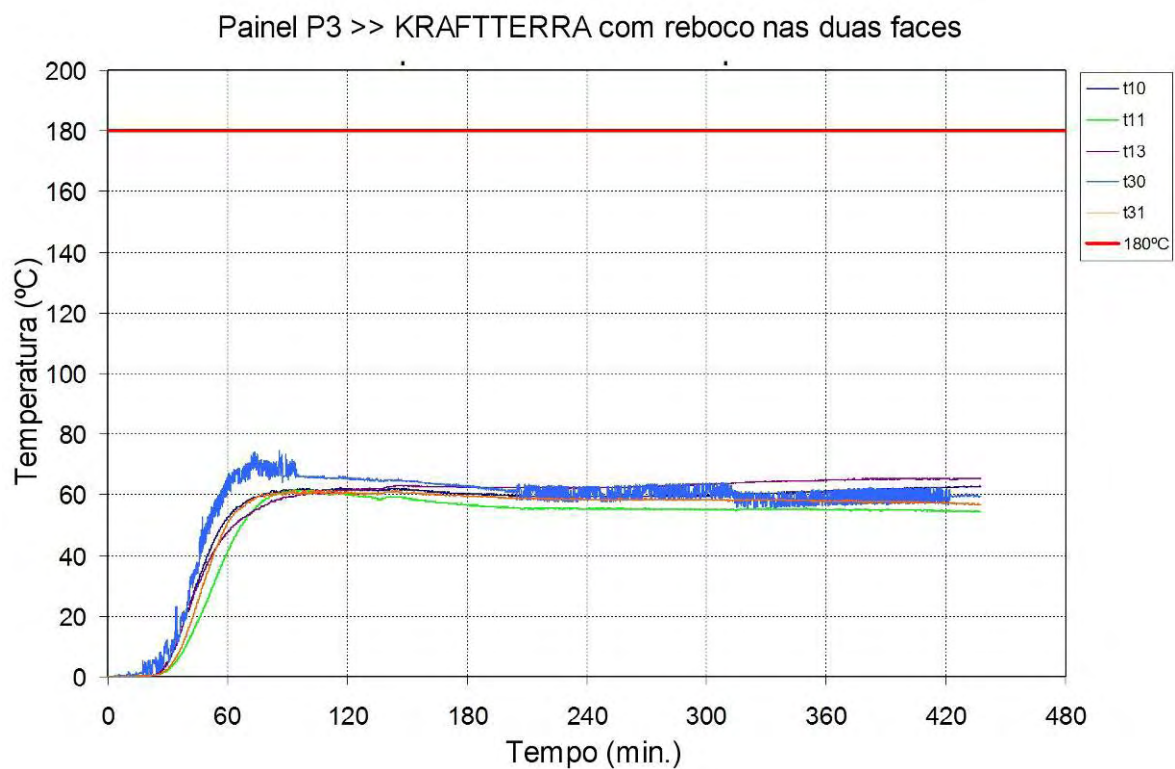


Fig. 61 - Evolução das temperaturas no painel P3, Kraftterra com reboco nas duas faces.

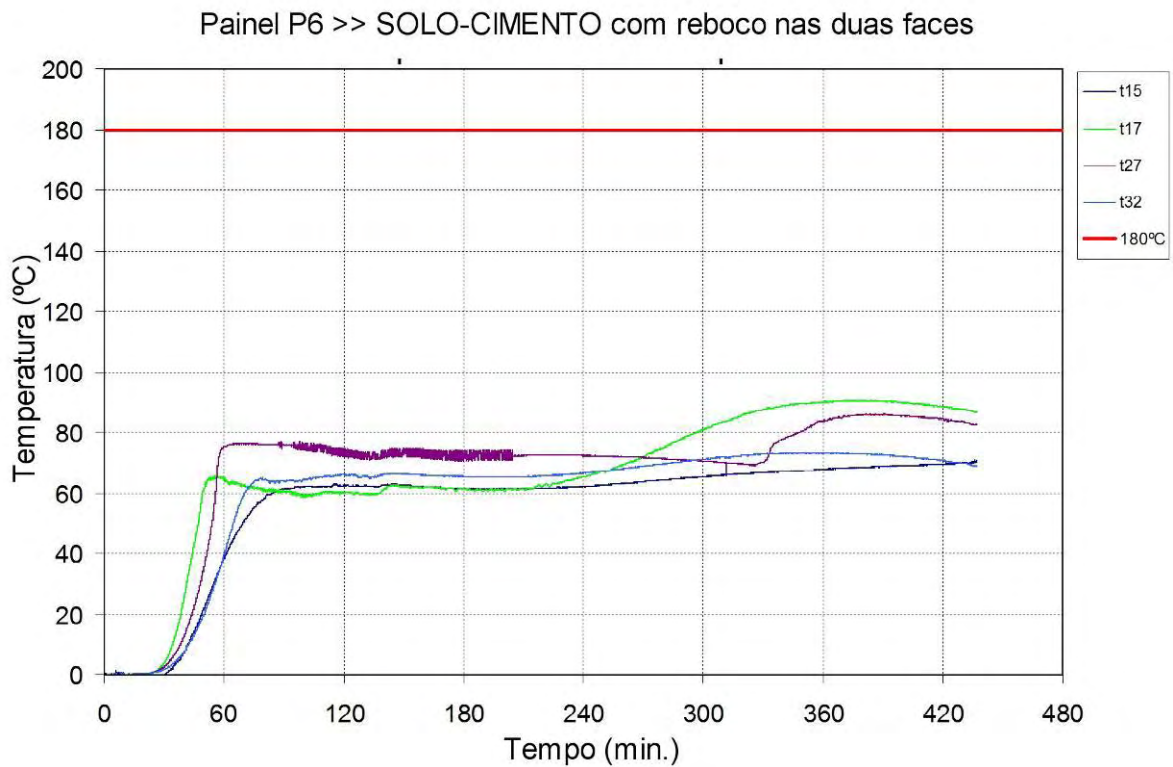


Fig. 62 - Evolução das temperaturas no painel P3, Kraftterra com reboco nas duas faces.

Na Tabela 6 são apresentados os valores das deformações medidas nos diversos pontos instrumentados da parede (ver localização na Fig. 35). Os pontos A, B e C são os localizados no centro dos painéis de Kraftterra e os D, E e F no centro dos painéis de solo-cimento.

Tabela 6 - Deformações (em mm) medidas em pontos médios, próximo de junções de materiais diferentes e nas extremidades da parede ao longo do ensaio de resistência ao fogo (tempo em minutos).

(t)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-12	-12	-10	-3	-9	-6	-9	-8	-13	-12	-8	-5	-10	-4	6	-8
20	-13	-16	-11	-9	-16	-9	-10	-13	-16	-20	-11	-9	-1	-5	8	-9
30	-14	-16	-12	-9	-17	-11	-11	-12	-15	-19	-13	-10	-4	-6	6	-9
40	-12	-10	-8	-9	-16	-10	-7	-12	-13	-15	-11	-9	-8	-4	3	-9
50	-11	-11	-10	-9	-17	-12	-4	-12	-10	-15	-11	-8	-3	-4	6	-9
60	-13	-10	-8	-10	-18	-13	-6	-12	-11	-16	-10	-10	-12	-7	4	-12
70	-14	-8	-8	-10	-18	-14	-8	-13	-8	-16	-11	-9	-11	-7	4	-10
80	-14	-8	-10	-11	-18	-15	-10	-13	-7	-15	-10	-11	-12	-7	3	-13
90	-15	-6	-6	-11	-17	-15	-6	-15	-7	-15	-11	-11	-9	-7	6	-13
100	-16	-5	-11	-14	-17	-15	-9	-16	-6	-13	-11	-14	-7	-6	3	-13
110	-14	-6	-11	-10	-14	-14	-8	-14	-3	-10	-9	-10	-8	-4	3	-10
120	-11	-3	-10	-7	-11	-15	-2	-11	0	-11	-20	-21	-2	-1	-7	-10
220	-1	7	-6	-6	-4	-9	2	-5	11	4	-2	-2	-4	-3	-16	-12
310	-2	7	-6	-4	-2	-7	7	-1	13	6	2	1	-7	-3	-30	-12
414	1	6	-7	-2	-1	-6	7	3	14	8	1	1	-6	-1	-41	-10

É possível perceber que nos pontos médios dos painéis de solo-cimento (D, E e F) ocorreram variações dimensionais bem mais acentuadas que nos de Kraftterra. O mesmo ocorreu nos pontos próximos das junções entre materiais diferentes, os pontos H, J e L de solo-cimento também apresentaram maiores variações e deformaram mais que os de Kraftterra.

Entretanto, cabe informar que após 1h53min do início do ensaio observou-se a ocorrência de uma fissura vertical, na face não exposta ao fogo, inicialmente no meio do painel P2, como se pode observar na Fig. 63.



Fig. 63 – Fissura vertical no centro da parede, face não exposta ao fogo.

Esta fissura percorreu verticalmente toda a extensão central da parede (P2 e P5), sendo mais bem visualizada na parte exposta ao fogo (Fig.64). Nesta face também ocorreram descolamentos de partes das faixas laterais de reboco.



Fig. 64 – Fissura vertical no centro da parede, face exposta ao fogo. Detalhe dos descolamentos de parte das duas faixas laterais de reboco.

Conclui-se com o ensaio de resistência ao fogo que a inclusão de fibras dispersas de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento na produção de BTCs resultou em elemento com excelente desempenho e boas características de resistência ao fogo, em discordância do que muitos esperavam ou consideravam ao se pensar em paredes produzidas com papel.

*"A experiência não leva a conclusões universais".
(Thomas Hobbes)*

6. Conclusões principais

O uso das fibras dispersas de papel kraft proveniente da reciclagem de sacos de cimento demonstra por si só a preocupação ambiental do tema proposto. Entretanto esta possibilidade de uso de resíduo tão abundante em nossa sociedade não pode ser vista apenas como a única contribuição do trabalho, tendo em consideração que este uso também repercute numa melhoria significativa de algumas das propriedades físicas e mecânicas e do desempenho final de componentes (BTCs) e elementos (paredes) construtivos.

Comprovou-se a hipótese de que as fibras dispersas de papel kraft provenientes da reciclagem dos sacos de cimento podem ser utilizadas como estabilizante para melhorar algumas características e propriedades físicas e mecânicas de Blocos de Terra Compactada - BTCs.

Não só a hipótese que norteou esta tese foi comprovada, como também, após ensaios laboratoriais e análises comparativas entre o novo compósito e o solo-cimento, constatou-se o melhor desempenho do Kraftterra em paredes quanto à resistência à compressão simples e diagonal (antes e depois de ciclos de envelhecimento acelerado) e quanto à resistência ao fogo.

O Kraftterra apresentou bom desempenho tanto em compósitos produzidos com solos lateríticos arenosos quanto com argilosos.

Para os diversos tipos de solos utilizados nesta pesquisa o percentual de 6% de kraft na mistura foi o que obteve os melhores resultados, sendo o mais recomendado para a produção do Kraftterra. Por sua vez, também se constatou que dentre os solos lateríticos estudados os mais recomendados para a produção de BTCs com o Kraftterra são os que apresentam percentuais de argila em torno dos 30%.

A inclusão das fibras dispersas de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento nos BTCs e nas argamassas de assentamento proporciona um grande aumento da capacidade das paredes em resistir bem aos esforços de compressão simples e também dos esforços de tração transversal decorrentes das tensões de compressão, mesmo depois da tensão máxima de ruptura e mesmo após sofrerem grandes esmagamentos. O Kraftterra tem um comportamento mais dúctil que o do solo-cimento.

A argamassa de assentamento produzida com Kraftterra resulta em fortes ligações entre blocos e produz elementos construtivos homogêneos e com desempenho uniforme, ou seja, com alta monolicidade.

A parede e suas diferentes composições (com e sem reboco) produzidas com BTCs e argamassa de assentamento de Kraftterra apresentaram desempenho suficiente para potencializá-las como paredes corta-fogo para uso em escadas de emergências ou em qualquer local destinado à compartimentação de ambiente. Ressalta-se que para atestar esta possibilidade cabem análises dos demais critérios de comportamento, a integridade e capacidade portante (no caso de alvenaria estrutural).

Entretanto foi verificado no Kraftterra a tendência de aumento da absorção de água quando comparados aos do solo-cimento. Fato este que pode ser contornado ou minimizado através de procedimentos já conhecidos e utilizados na arquitetura de terra e com BTCs, como, por exemplo, o uso de aditivos impermeabilizantes, ou mesmo a utilização de prensas com maior força de compactação.

Com os resultados da pesquisa também ficou patente que com o Kraftterra viabiliza-se a redução ou até a eliminação do material mais caro do processo de produção de blocos de terra compactada e estabilizada, o cimento.

Considera-se, portanto, o Kraftterra como sendo mais uma alternativa para a produção de componentes e elementos construtivos. Esta conclusão não se baseia exclusivamente nos resultados dos ensaios, mas principalmente no desenvolvimento e comprovação da viabilidade técnica e construtiva de vários aspectos do processo construtivo para a produção de BTCs e elementos de vedação com o Kraftterra. Para isto foram desenvolvidas, testadas e analisadas

as etapas de reciclagem dos sacos de cimento, bem como o processo de mistura e preparo do novo compósito; foram analisados diversos tipos de solos para a produção do Kraftterra; foram produzidos e analisados BTCs de solo-cimento e Kraftterra e algumas paredes foram levantadas e testadas.

*"É preciso sentir a necessidade da experiência, da observação, ou seja, a necessidade de sair de nós próprios para aceder à escola das coisas, se as queremos conhecer e compreender".
(Émile Durkheim)*

7. Estudos futuros e recomendações

Embora os estudos e análises tenham procurado abordar ao máximo os aspectos relativos ao desenvolvimento, produção e uso do novo compósito ainda considera-se que haja muito para se conhecer, analisar e experimentar com o Kraftterra.

Esta tese abordou apenas o uso do novo compósito para a produção de BTCs, porém o seu uso pode ser estudado para muitas outras técnicas da arquitetura de terra, como com blocos de adobe, taipa de pilão, taipa de mão, bahareque, COB e outras.

Para o BTCs certamente outras análises podem e devem fazer parte de estudos futuros, como a definição do desempenho e comportamento quanto à tração na flexão, erosão, abrasão, condutibilidade térmica, caracterização termofísica e outros tantos necessários para um melhor entendimento das características e comportamento do novo compósito, bem como para se garantir seu adequado uso na construção civil.

Foram utilizados nos estudos e análises um único tipo de BTC (maciço, liso e sem reentrâncias) e um único tipo de assentamento (com argamassa). Certamente outros estudos devem ser realizados com outros tipos de BTCs já existentes e quem sabe com o desenvolvimento de novos desenhos, bem como com outros tipos de assentamento.

Das conclusões deste trabalho, como já mencionado anteriormente, fica mais que certa a necessidade de se estudar, analisar e propor materiais, situações e técnicas construtivas para se controlar e minimizar a característica do Kraftterra em absorver mais água que o solo-cimento.

Mesmo com os ensaios de envelhecimento acelerado não se pôde chegar a conclusões exatas sobre o comportamento do Kraftterra frente às intempéries,

motivo pelo qual são sugeridos estudos com protótipos a serem testados em situações climáticas reais fora de laboratórios.

Face aos esforços para se minimizar os impactos ambientais e à crescente aceleração do crescimento das emissões de CO₂ a reciclagem faz parte de um novo argumento, "reciclar para reduzir a emissão de CO₂". Recomenda-se, portanto, o estudo da análise do ciclo de vida do Kraftterra.

Mesmo com todo o trabalho experimental desenvolvido nos laboratórios da Universidade de Brasília e Universidade de Aveiro consideram-se os estudos como preliminares frente aos aspectos que ainda podem e devem ser analisados para um correto e adequado entendimento das características do novo compósito e do seu comportamento em construções civis.

"Os estudos aperfeiçoam a natureza e são aperfeiçoados pela experiência".
(Francis Bacon)

Referências Bibliográficas

- ACHENZA, M; and FENU, L. (2006): **On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction**. Materials and Structures, Springer.
- ALVES, José Dafico (2002): **Manual de tecnologia do concreto**. UCG, Goiânia. 4ª ed. v. 1. 220 p.
- ÂNGULO, Sérgio C.; ZORDAN, Sérgio; e JOHN, Vanderley M. (2001): **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. Evento: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. CT206 - IBRACON. São Paulo - SP.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2006): **Armazenamento dos sacos de cimento**. Disponível em http://www.abcp.org.br/duvidas_frequentes.shtml. Acesso em 02/2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1998): **Construção de paredes monolíticas com solo-cimento compactado**. 3ª ed. São Paulo. 16p. (BT-110)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1988): **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. 2ª edição. São Paulo. 8p. (BT-111)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1989): **Fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento com a utilização de prensas hidráulicas**. 2ª edição. São Paulo. 8p. (BT-112)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984): **NBR 6459 – Solo – determinação de limite de liquidez, método de ensaio**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984): **NBR 7180 – Solo – determinação de limite de plasticidade, método de ensaio**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984): **NBR 7181 – Solo – análise granulométrica, método de ensaio**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984): **NBR 8491 – Tijolo maciço de solo-cimento, especificação**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984): **NBR 8492 – Tijolo maciço de solo-cimento, determinação da resistência à compressão e da absorção d'água**. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1989): **NBR 10832 – Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual, procedimento**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1989): **NBR 10833 – Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica, procedimento**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1990): **NBR 12025 – Solo-cimento, ensaio de compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992): **NBR 12023 – Solo-cimento, ensaio de compactação**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992): **NBR 12024 – Solo-cimento, moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1996): **NBR 13554 – Solo-cimento, ensaio de durabilidade por molhagem e secagem**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1996): **NBR 13555 – Solo-cimento, determinação da absorção d'água**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1999): **NBR 14321 – Paredes de alvenaria estrutural – determinação da resistência ao cisalhamento**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2007): **Projeto de norma ABNT/CB-02:136.01 - Desempenho de Edificações de até 5 pavimentos para paredes de vedação externas**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA E CELULOSE E PAPEL - BRACELPA (2009): **Relatório Estatístico 2007-8**. Disponível em <http://www.bracelpa.org.br/bra/estatisticas/pdf/anual/rel2007.pdf>. Acesso em 08/2009.
- BARBOSA, Normando Perazzo; MATONNE, Roberto; e MESBAH, Ali (2002): **Blocos de Concreto de Terra: Uma Opção Interessante Para a Sustentabilidade da Construção**. Anais do 44º Congresso Brasileiro de Concreto, Belo horizonte – MG. Disponível na página eletrônica do SEBRAE – Biblioteca On Line, em <http://www.biblioteca.sebrae.com.br/>. Último acesso em 05/2007.
- BARBOSA, Normando Perazzo (2003): **Transferência e aperfeiçoamento da tecnologia construtiva com tijolos prensados de terra crua em comunidades carentes**. In Coletânea Habitare, Volume 2 – Inovação, Gestão da Qualidade & Produtividade e Disseminação do Conhecimento na Construção Habitacional, p. 12-39. ANTAC. Porto Alegre.
- BARBOSA, Normando Perazzo; GONÇALVES, Jameson; GHAVAMI, Khosrow (2005): **Proposta de uma norma brasileira de construção com adobe**. Trabalho apresentado no Seminário Internacional SismoAdobe 2005 – Arquitectura, Construcción y Conservación de Edificaciones de Tierra en Áreas Sísmicas. Lima, Peru, 16 a 19 de Maio de 2005.

- BASHA, E.A.; HASHIM, R.; MAHMUD, H.B.; and MUNTOHAR, A.S. (2005): **Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement.** Construction and Building Materials, Volume 19, Issue 6, July 2005, Pages 448-453.
- BINICI, Hanifi; AKSOGAN, Orhan; BODUR, Mehmet Nuri; AKCA, Erhan; and KAPUR, Selim (2006): **Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials.** Construction and Building Materials, In Press, Corrected Proof, Available online 21 February 2006.
- BLASCO, Antonio Blanco (presidente Comitê Especializado) et al. (2000): **Norma Técnica de Edificación NTE E.080 ADOBE.** In Reglamento Nacional de Construcciones, Lima, Peru.
- BLUMENSCHHEIN, Raquel (2005): **Diretrizes para intervenções urbanas e em moradias de comunidades remanejadas em áreas de construção de usinas hidroelétricas.** Projeto encaminhado a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. UnB, Brasília.
- BOUHICHA, M.; AOUISSI, F.; and KENAI, S. (2005): **Performance of composite soil reinforced with barley straw.** Cement and Concrete Composites, Volume 27, Issue 5, Natural fibre reinforced cement composites, May 2005, Pages 617-621.
- BUSON, Márcio Albuquerque (2007): **Autoconstrução com tijolos prensados de solo estabilizado.** Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UnB. 1ª edição, 100p. Il. ISBN 978-85-60762-00-2. Brasília.
- CALDERONI, Sabetai (1997): **Os Bilhões Perdidos no Lixo.** Humanitas Publicações, FFLCH/USP. São Paulo.
- CAMPOS, José Eloi G. (2007): **Estudo sobre a APA do Cafuringa – DF.** Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal – SEMARH. Texto disponível no http://www.semarh.df.gov.br/semarh/site/cafuringa/Sec02/Sec_02_03.htm. Último acesso 05/2007.
- CAMPOS, José Eloi G.; SILVA, Flávio Henrique F. e (2007): **Textos sobre geologia, hidrogeologia, solos e geomorfologia em parte adaptados do Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal.** Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal – SEMARH. Disponível no <http://www.semarh.df.gov.br/semarh/site/lagoparanao/cap03/04.htm>. Último acesso 05/2007.
- CAPUTO, Homero Pinto (1998): **Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos, Volume 1.** LCT – Livros Técnicos e Científicos Editora. 6ª ed., 234 p. Rio de Janeiro.
- CELULOSEONLINE – Portal Celulose On Line (2009): **Coletânea dos principais tipos de papel fabricados no país, com suas características, composição, terminologia, mais usada, acabamento, formas de comercialização e formatos e pesos mais comuns.** Disponível em <http://www.celuloseonline.com.br/pagina/pagina.asp?iditem=193#K>. Último acesso 07/2009.

- CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, Programa THABA (1999): **Manual de Construção com solo-cimento**. Associação Brasileira de Cimento Portland. Convênio CEPED/BNH/URBIS/CONDER/PMC/OEA/CEBRACE, 4ª ed. São Paulo.
- COLLANTES, M. C.; FRANCO, L. S (1995): **Resistência de aderência ao cisalhamento da alvenaria estrutural não armada de blocos cerâmicos**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil - BT/PCC/140. São Paulo.
- CONAMA (2002): **Resíduos da Construção Civil – Resolução 307 de 05/07/2002**, Ministério do Meio Ambiente, Brasília. Disponível na página eletrônica http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamentoo/legislacao/federal/resolucoes/2002_Res_CONAMA_307.pdf. Acesso em 02/2006.
- CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO (2004): **Instrução Técnica n.º 08 - Segurança estrutural nas edificações / Resistência ao fogo dos elementos de construção**. Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. São Paulo.
- FARIA, Obede Borges (2002): **Utilização de macrófitas aquáticas na produção de adobe: um estudo de caso no reservatório de Salto Grande (Americana - SP)**. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
- GHAVAMI, Khosrow; TOLEDO Filho, Romildo D.; and BARBOSA, Normando P. (1999): **Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres**. Cement and Concrete Composites, Volume 21, Issue 1, Pages 39-48.
- GHIASSIAN, H; POOREBRAHIM, G.; and GRAY D. H. (2004): **Soil reinforcement with recycled carpet wastes**. Waste Management & Research, Vol. 22, No. 2, 108-114.
- GRANDE, Fernando Mazzeo (2003): **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos.
- HATAF, N.; and RAHIMI, M.M. (2006): **Experimental investigation of bearing capacity of sand reinforced with randomly distributed tire shreds**. Construction and Building Materials, Volume 20, Issue 10, December 2006, Pages 910-916.
- HIWATASHI, Erica (1998): **O estudo de cadeias no processo de reciclagem dos resíduos domiciliares inorgânicos de Porto Alegre**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- HENDRIKS, Ch. F.; NIJKERK, A. A.; e VAN KOPPEN, A. E. (2007): **O ciclo da construção**. Tradução: Cláudia Naves David Amorim e Rosana Stockler Campos Clímaco. Editora Universidade de Brasília, Brasília.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC (2004): **Norma Técnica Colombiana NTC 5324: Bloques de suelo cemento para muros y divisiones, definiciones, especificaciones, métodos de ensayo, condiciones de entrega**. ICONTEC, Bogotá, Colombia.

- JIMÉNEZ, Yolanda Guadalupe Aranda* (2008): **Utilización de savias vegetales para la fabricación de BTC**. In Anais do VII Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra e II Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil – TerraBrasil 2008, São Luís, ISBN 978-85-86036-41-5.
- JOHN, Vanderley M.; e AGOPYAN, Vahan* (2000): **Reciclagem de Resíduos da Construção**, Artigo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Construção Civil, São Paulo. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/CETESB.pdf>. Acesso em 02/2006.
- JOHN, Vanderley M.; ÂNGULO, Sérgio Cirelli* (2003a): **Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos**. In Coletânea Habitare, Volume 4 – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, p. 8-71. ANTAC. Porto Alegre.
- JOHN, Vanderley M.; ANGULO, Sérgio C.; e AGOPYAN, Vahan* (2003b): **Sobre a necessidade de metodologia de pesquisa e desenvolvimento para reciclagem**. Evento: I Fórum das Universidades Públicas Paulistas - Ciência e Tecnologia em resíduos. Lindóia - SP.
- MALHÃES, Adriana Pellegrini* (2008): **Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil - abordagem preliminar**. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal do Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- MARTINS, Eder de Souza* (2000): **Petrografia, mineralogia e geomorfologia de rególitos lateríticos no Distrito Federal**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Publicado na Internet no endereço <http://www.unb.br/ig/posg/dout/tese026/>. Acesso em 27/06/2009.
- MATEOS, Manuel* (2006): **Los Residuos - Su uso ecologico en la construccion**. Disponível na página do Colégio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos – CICCIP em <http://www.ciccp.es/imgweb/sede%20nacional/colaboraciones/residuos.pdf> Acesso em 02/2006.
- MATONNE, Roberto; BARBOSA, Normando Perazzo; e PASERO, Gloria* (2004): **Processo construtivo com blocos prensados de terra crua tipo "Mattone"**. Publicação do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas – LABEMEC/CT/UFPA. Disponível na página eletrônica do SEBRAE – Biblioteca On Line, em <http://www.biblioteca.sebrae.com.br/>. Último acesso em 05/2007.
- MATTONNE, Roberto* (2005): **Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique**. Cement and Concrete Composites, Volume 27, Issue 5, Natural fibre reinforced cement composites, May 2005, Pages 611-616.
- MATTONNE, Roberto*: **La muratura in terra cruda fibrorinforzata: tra tradizione e innovazione**. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colômbia; Universidad Santo Tomas, Tunja, Colômbia; Escuela Colombiana de Ingenieria Julio Garavito; CYTED; ProTerra. Sem ano ou local de publicação (texto incluído nos Anexos).
- MESBAH, A.; MOREL, J. C.; WALKER, P.; and GHAVAMI, Kh* (2004): **Development of a direct tensile test for compacted earth blocks**

- reinforced with natural fibers**. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 16 (1), p. 95-98.
- MILANI, Ana Paula da Silva (2005): **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz**. Dissertação apresentada na Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções Rurais e Ambiente. Campinas.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES: **Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade na Construção Habitacional – PBQP-H**. Disponível em <http://www.cidades.gov.br/pbqp-h/Apresentacao.htm>. Acesso em 02/2006.
- NEVES, Célia Maria Martins (2003): **Componentes habitacionais de argamassa celulósica e espuma de poliuretano**. In Coletânea Habitar, Volume 4 – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, p. 176-217. ANTAC. Porto Alegre.
- NEW MEXICO COMMISSION OF PUBLIC RECORDS (2006): **New Mexico Earthen Building Materials Code, 14.7.4 NMAC**. Novo México, EUA. Disponível em <http://www.nmcpr.state.nm.us/nmac/parts/title14/14.007.0004.htm>. Acesso em 04/2009.
- NORMA TÉCNICA DE EDIFICACION – NTE E.080 ADOBE (2000): **Reglamento Nacional de Construcciones**. Lima, Peru.
- OLIVEIRA, Mário Mendonça de; SAWITZKI, Roberto Luiz; FONSECA, Tatiana de Cássia Coutinho S. da (2005): **A seiva de cactos como aditivo de argamassas antigas**. Anais do VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas e I International Symposium on Mortars Technology. Florianópolis .
- PEREIRA, Henrique Clemente (2008): **Caracterização do comportamento estrutural de construções em adobe**. Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Portugal.
- PIMENTEL, Lia Lorena; BERALDO, A. L.; SAVASTANO JR, Holmer (2003): **Cellulose cement composite modified by polymer**. In: 1st Inter American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in the Eco-Construction and Infrastructure, João Pessoa. Proceedings. João Pessoa: Graphic Design, 2003. v. 1. p. 1-12.
- PIMENTEL, Lia L.; BERALDO, Antonio L.; SAVASTANO JUNIOR, Holmer. (2006): **Durabilidade de compósito biomassa vegetal-cimento modificado por polímero**. Eng. Agríc. [online]. Vol. 26, n. 2, pp. 344-353. ISSN 0100-6916.
- PIÑERO, Víctor; REYES, Angélica; VIÑA, Jean Carlos (2008): **Evaluación de la pasta de papel periódico en morteros para frisos en muros de tierra**. In Anais do VII Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra e II Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil – TerraBrasil 2008, São Luís, ISBN 978-85-86036-41-5.
- PITTA, Márcio Rocha; e NASCIMENTO, Aurinilce A. Port (1983): **Dosagem de solo melhorado com cimento por modificações físicas, químicas e mecânicas do solo original**. Estudo Técnico ET-53 da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, São Paulo.

- RIGASSI, Vincent (1985): **Compressed earth blocks – manual of production**. CRATerre-EAG, vol.1, GATE/GTZ/BASIN, ISBN 3-528-02079-2, Alemanha.
- RILEM Technical Committees - TC 24-BW (1980): **General recommendations for methods of testing load-bearing walls**. Materials and Structures, Vol. 13, No. 78, Nov/Dec 1980.
- ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik (2003): **Aproveitamento de resíduos na construção**. In Coleção Habitare, Volume 4 – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, p. 72-93. ANTAC. Porto Alegre.
- ROLIM, Mário M.; FREIRE, Wesley Jorge; e BERALDO, Antonio L. (1999): **Análise comparativa da resistência à compressão simples de corpos-de-prova, tijolos e painéis de solo-cimento**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.1, p.89-92, 1999, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB.
- SABBATINI, Fernando Henrique (1984): **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico calcária**. Dissertação apresentada à Engenharia Civil da EPUSP. São Paulo.
- SANTOS, Rodrigo R. de B. D. P. dos (2004): **Análise numérica e experimental do comportamento da alvenaria estrutural submetida à compressão diagonal**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.
- SILVA, Aloísio Caldas e (2002): **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP. São Paulo.
- SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2008): **Relatório Anual 2007-8**. Disponível em http://www.snic.org.br/25set1024/relat_2007-8.html. Acesso em 08/2009.
- SOLÀ, Gabriel Barbeta i (2002): **Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el siglo XXI**. Tese de Doutorado apresentada na Escola Técnica Superior D'Arquitectura de Barcelona – ETSAB/UPC. Disponível em http://www.tdx.cesca.es/TDX-1105102-161519/index_cs.html. Acesso em 02/2006.
- SOUZA, Márcia I. B.; SEGANTINI, Antonio A. S.; e PEREIRA, Joelma A. (2008): **Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.12, n.2, p.205-212, Campina Grande.
- SOUZA, Ubiraci Espinelli Lemes de; PALIARI, José Carlos; AGOPYAN, Vahan; ANDRADE, Artemária Coêlho de (2004): **Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva**. AMBIENTE CONSTRUÍDO, Porto Alegre, V4 N4, p. 33-46.
- STACHERA Jr., Theodozio; CASAGRANDE Jr., Eloy Fassi(2008): **Desenvolvimento e a aceleração do crescimento de emissões de co2 no Brasil: cenário de um projeto do PAC no Paraná**. Anais do Tenth International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies - NOCMAT 2008. Cali, Colombia.

- STULZ, Roland; and MUKERJI, Kiran* (1993): **Materiales de construcción apropiados - Catálogo de soluciones potenciales revisado edición ampliado**. SKAT & IT Publications, 442 p., Suíça. Disponível em: <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms00.htm#Contents>. Acesso em 09/2009.
- TAVES, Sylla John Lerro; POIANI, Luiz Marcio; SILVA, Estela Regina* (2001): **Projeto da cooperativa dos produtores de papel ecológico e artesanal de São Carlos**. Anais do IV SEMPE – Seminário de Metodologia para Projetos de Extensão, São Carlos 29-31 ago 2001.
- UNE-EN 1363-1* (2000): **Ensayos de Resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales**. Norma Espanhola, versão oficial, em espanhol, da Norma Europeia EN 1363-1 de agosto de 1999.
- VAN VLACK, Lawrence Hall* (1970): **Princípios de ciência dos materiais**. Edgard Blücher, 427 p., São Paulo.
- VARUM, Humberto Salazar Amorim* (2003): **Seismic assessment, strengthening and repair of existing buildings**. Tese de doutorado apresentada no Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- VARUM, H.; Costa, A.; Pereira, H.; Almeida, J.* (2006): **Comportamento estrutural de elementos resistentes em alvenaria de adobe**. In Anais do TerraBrasil 2006 - I Seminário Arquitetura e Construção com Terra no Brasil e IV Seminário Arquitectura de Terra em Portugal - Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 4 a 8 de Novembro de 2006.

"A ciência não pode prever o que vai acontecer.
Só pode prever a probabilidade de algo acontecer".
(César Lattes)

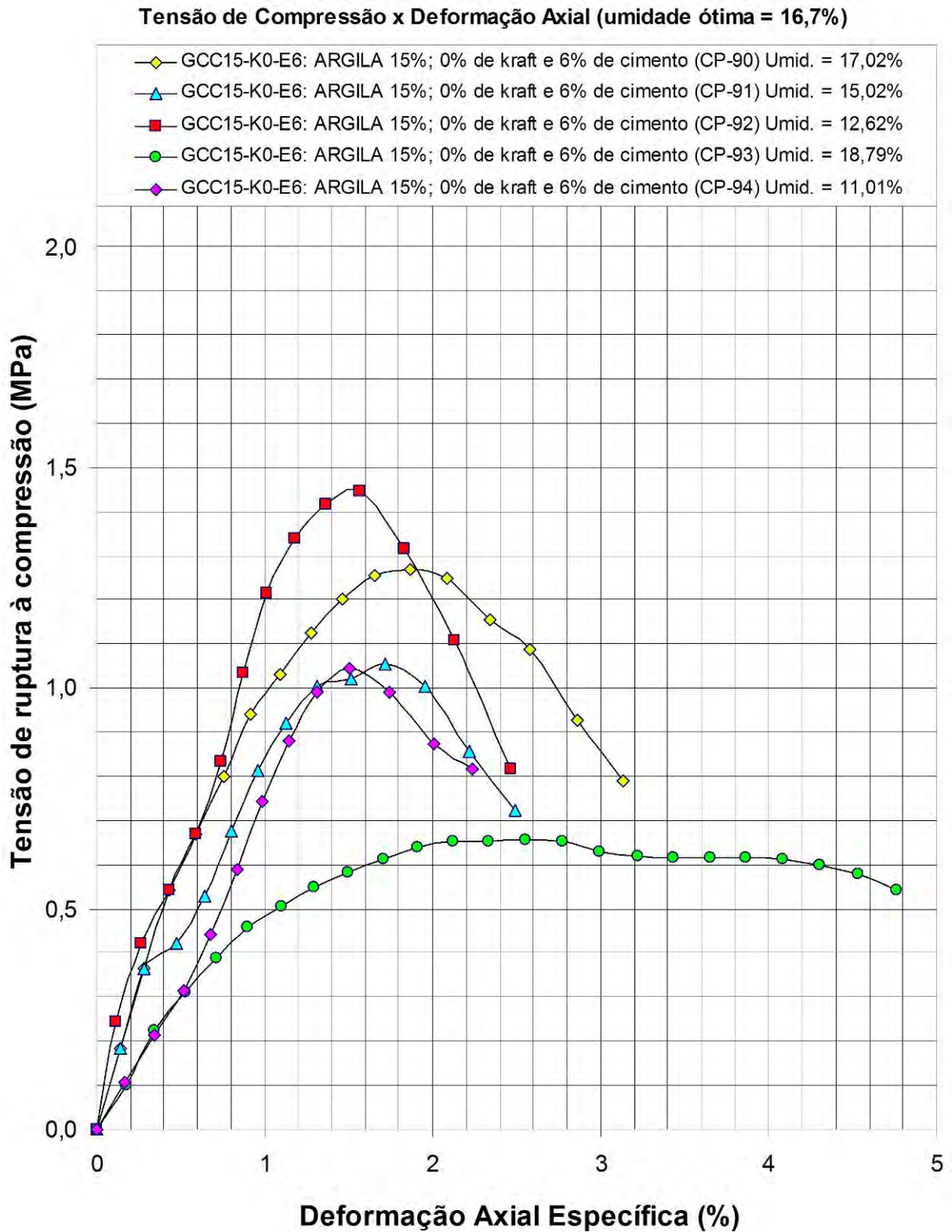
Anexos

Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF)
Para a classificação detalhada das ocupações (Grupo e Divisão), consultar a Tabela I do Decreto Estadual nº 46.076/01.

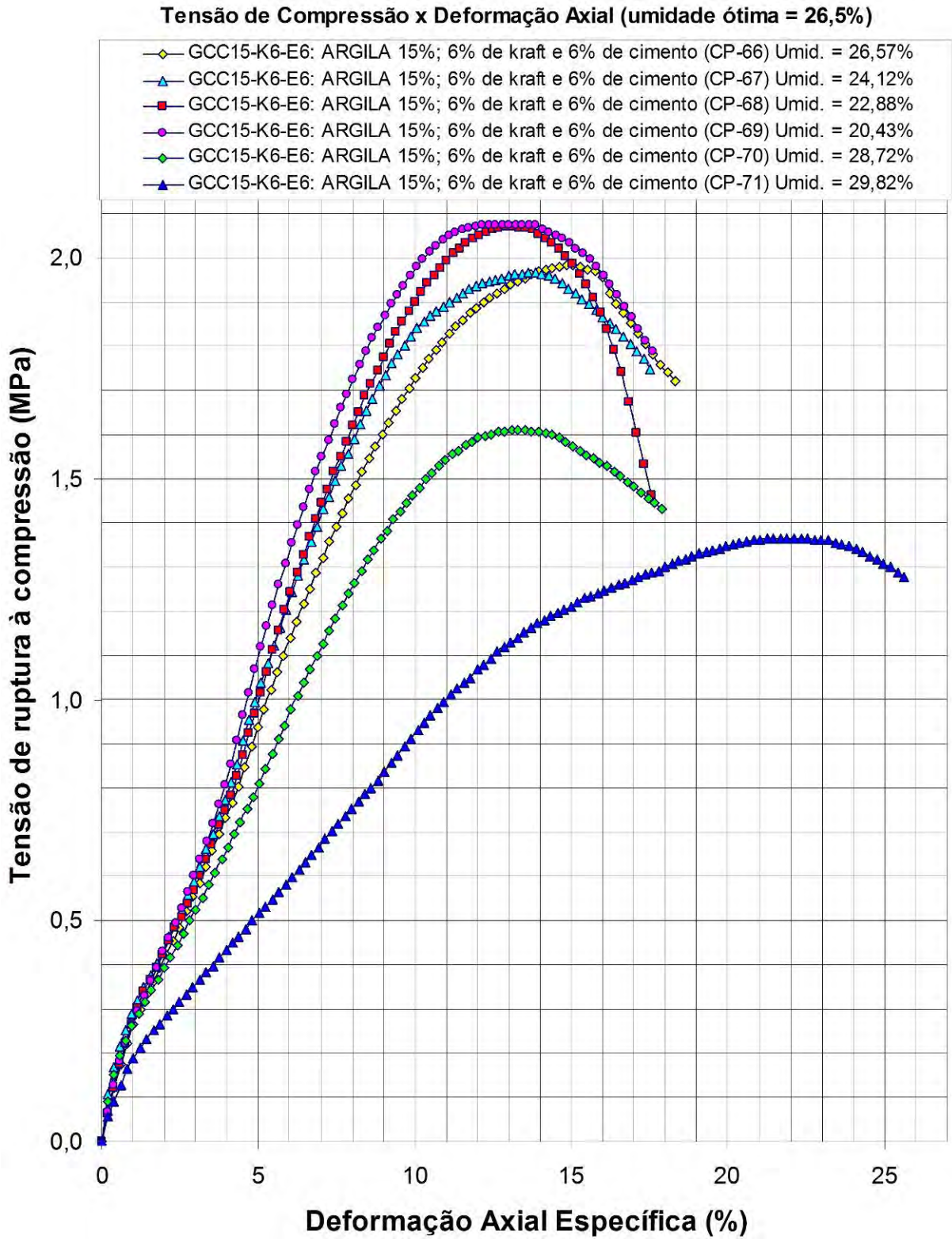
Grupo	Ocupação/Uso	Divisão	Profundidade do Subsolo hs		Altura da edificação h					
			Classe S ₂ hs > 10m	Classe S ₁ hs ≤ 10m	Classe P ₁ h ≤ 6m	Classe P ₂ 6m < h ≤ 12m	Classe P ₃ 12m < h ≤ 23m	Classe P ₄ 23m < h ≤ 30m	Classe P ₅ 30m < h ≤ 80m	h > 80m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60	30	30	60	90	120	CT
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60	60	90	120	CT
C	Comercial varejista	C-1	90	60	60	60	60	90	120	CT
		C-2 e C-3	90	60	60	60	60	90	120	CT
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60	30	60	60	90	120	CT
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60	30	30	60	90	120	CT
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6, F-8 e F-10	90	60	60	60	60	90	120	CT
		F-3, F-4 e F-7	90	60	ver item A2.3.4.	30	60	CT	CT	CT
		F-9								CT
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60	30	60	60	90	120	CT
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60	30	30	30	60	60	120
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 e H-4	90	60	30	60	60	90	120	CT
		H-2, H-3 e H5	90	60	30	60	60	90	120	CT
I	Industrial	I-1	90	60	30	30	30	60	120	CT
		I-2	120	90	30	30	60	90	120	CT
		I-3	120	90	60	60	120	120	120	CT
		J-1	60	30	ver item A2.3.5.	30	30	60	60	CT
		J-2	90	60	30	30	30	60	60	CT
		J-3	90	60	30	60	60	120	120	CT
		J-4	120	90	60	60	90	120	120	CT
L	Explosivos	L-1, L-2 e L-3	120	120	120	CT	CT	CT	CT	CT
		M-1	150	150	150	CT	CT	CT	CT	CT
M	Especial	M-2								CT
		M-3	120	90	90	90	120	CT	CT	CT

NOTAS:

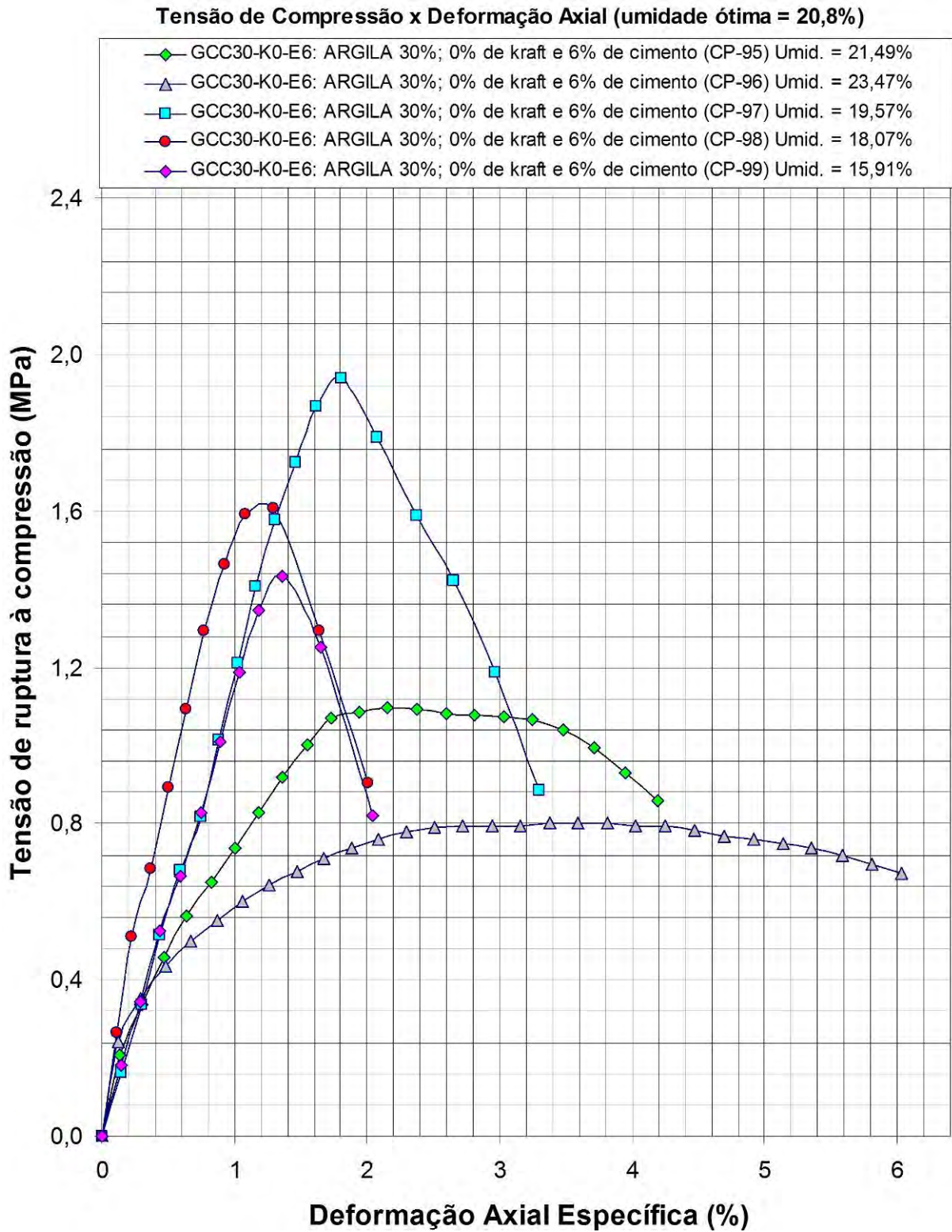
1. CT = Utilizar Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo
2. O TRRF dos subsolos não pode ser inferior ao TRRF dos pavimentos situados acima do solo (ver item 5.10)



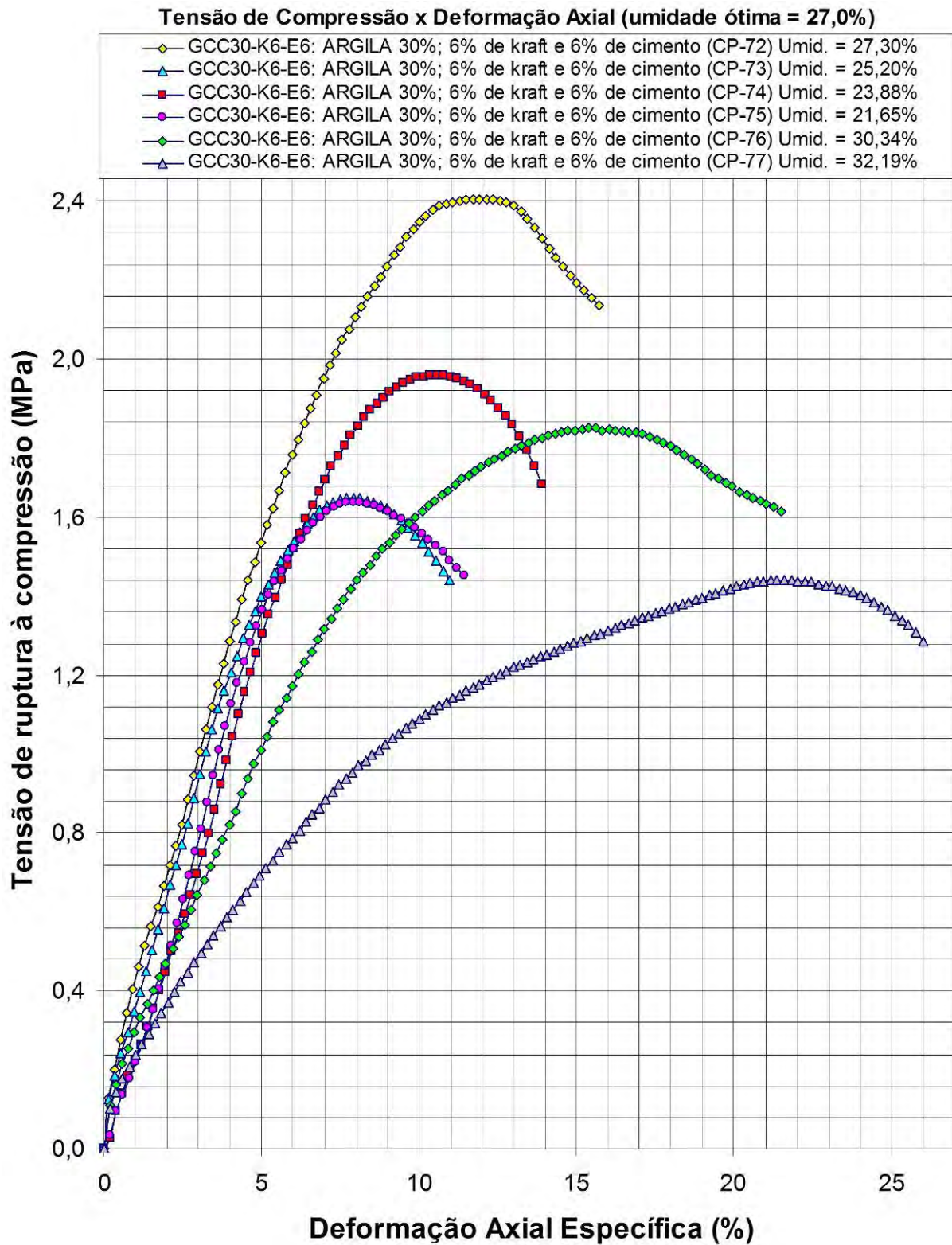
Anexo 2 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de solo-cimento GCC15-K0-E6.



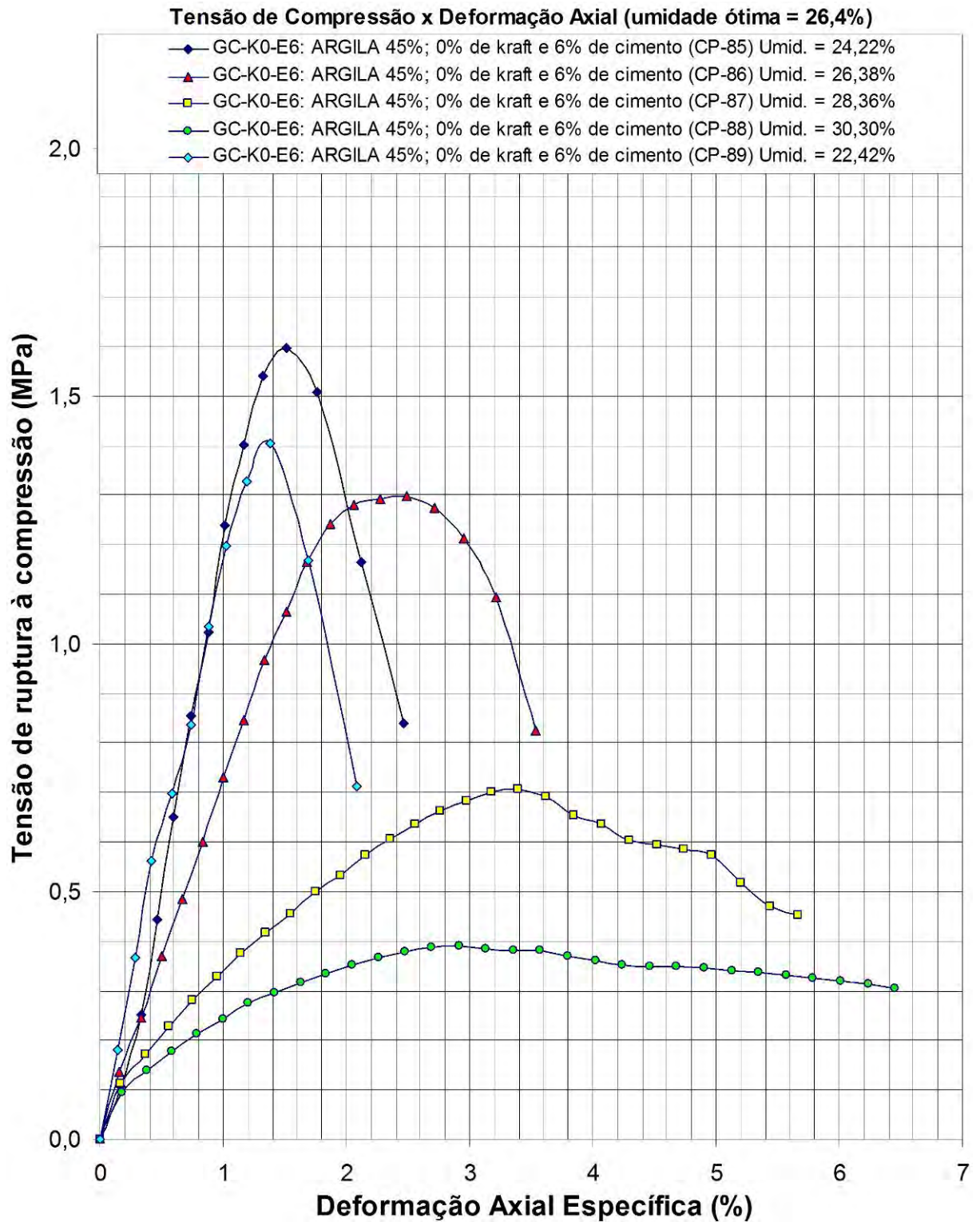
Anexo 3 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de Kraftterra GCC15-K6-E6.



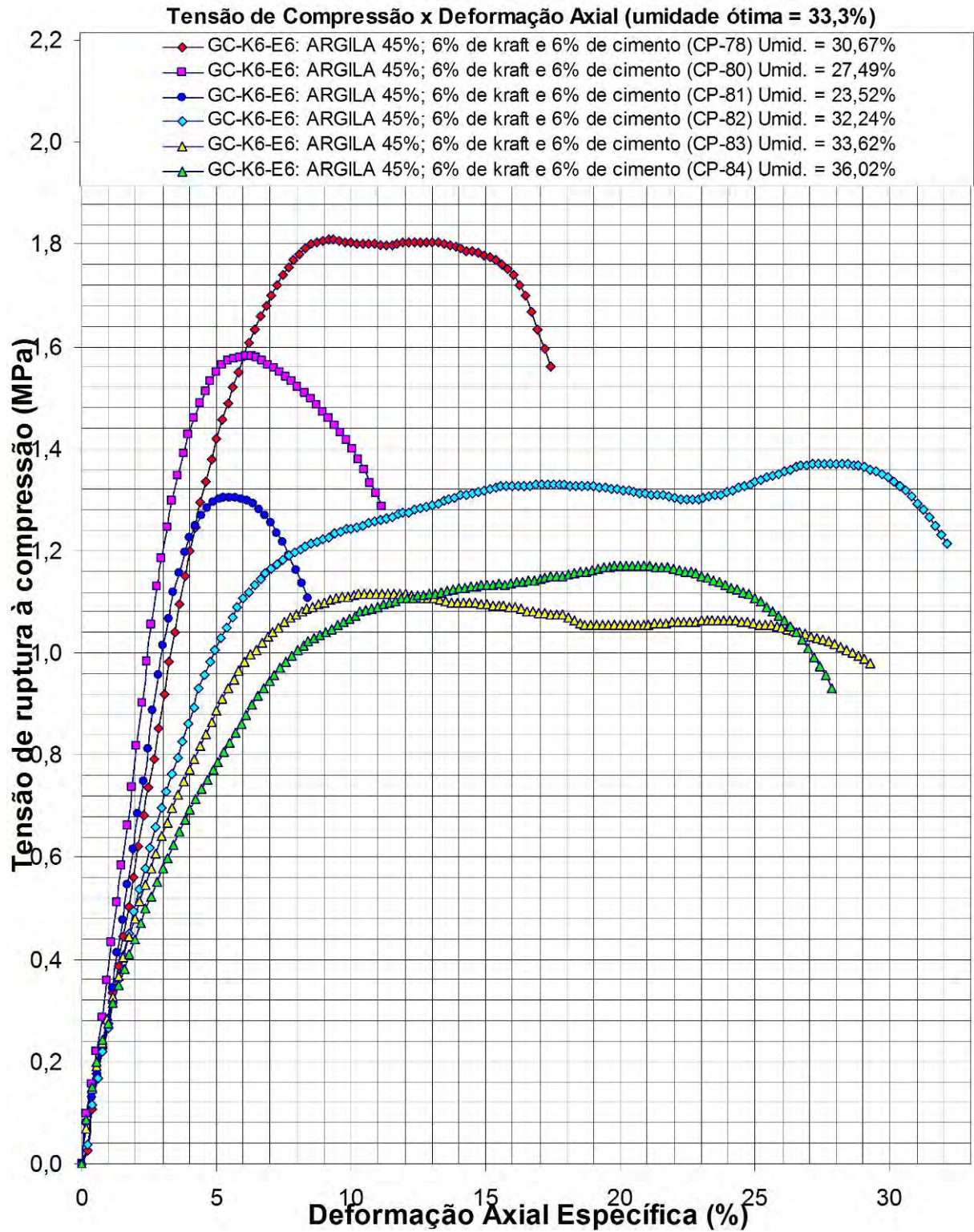
Anexo 4 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de solo-cimento GCC30-K0-E6.



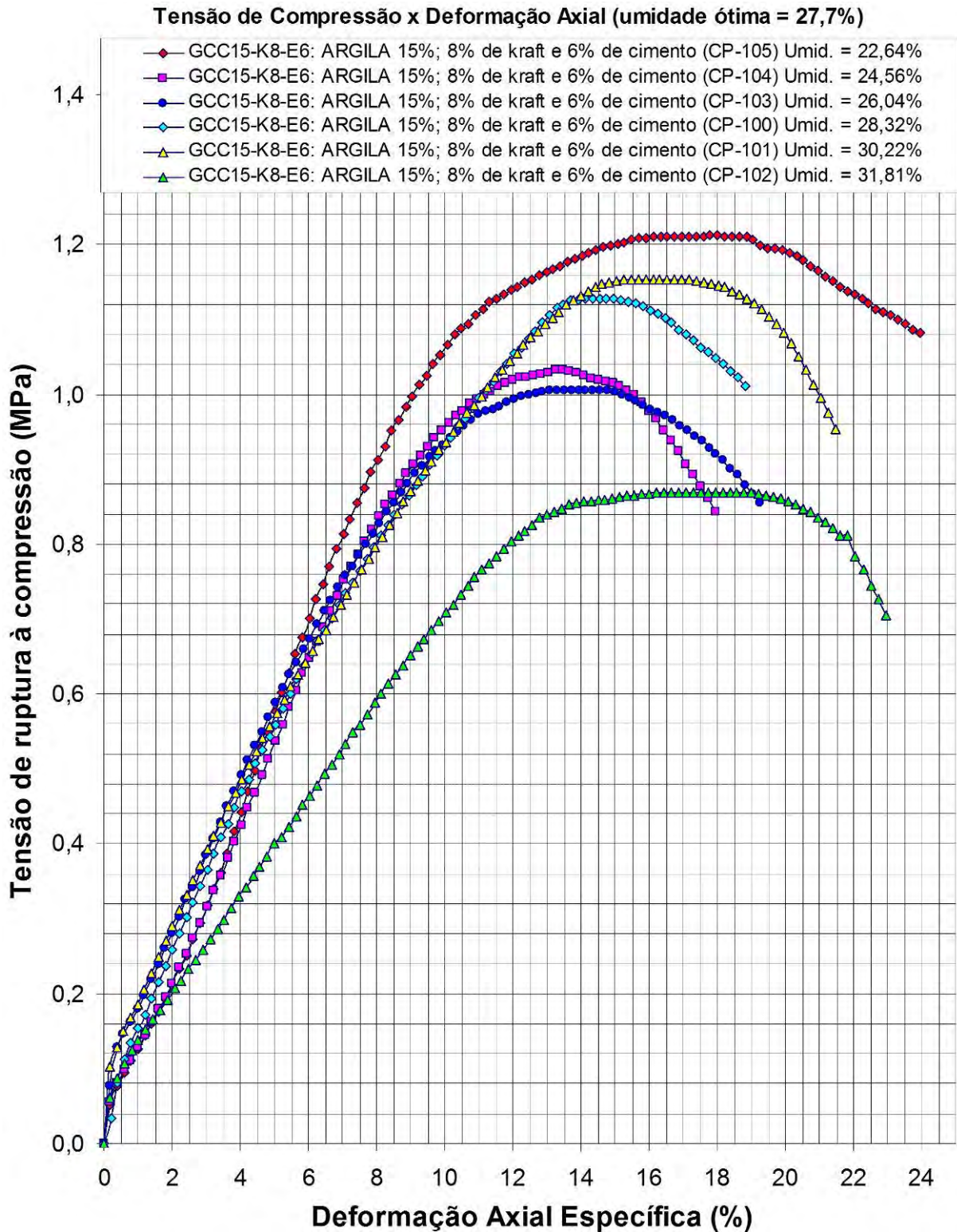
Anexo 5 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de Kraftterra GCC30-K6-E6.



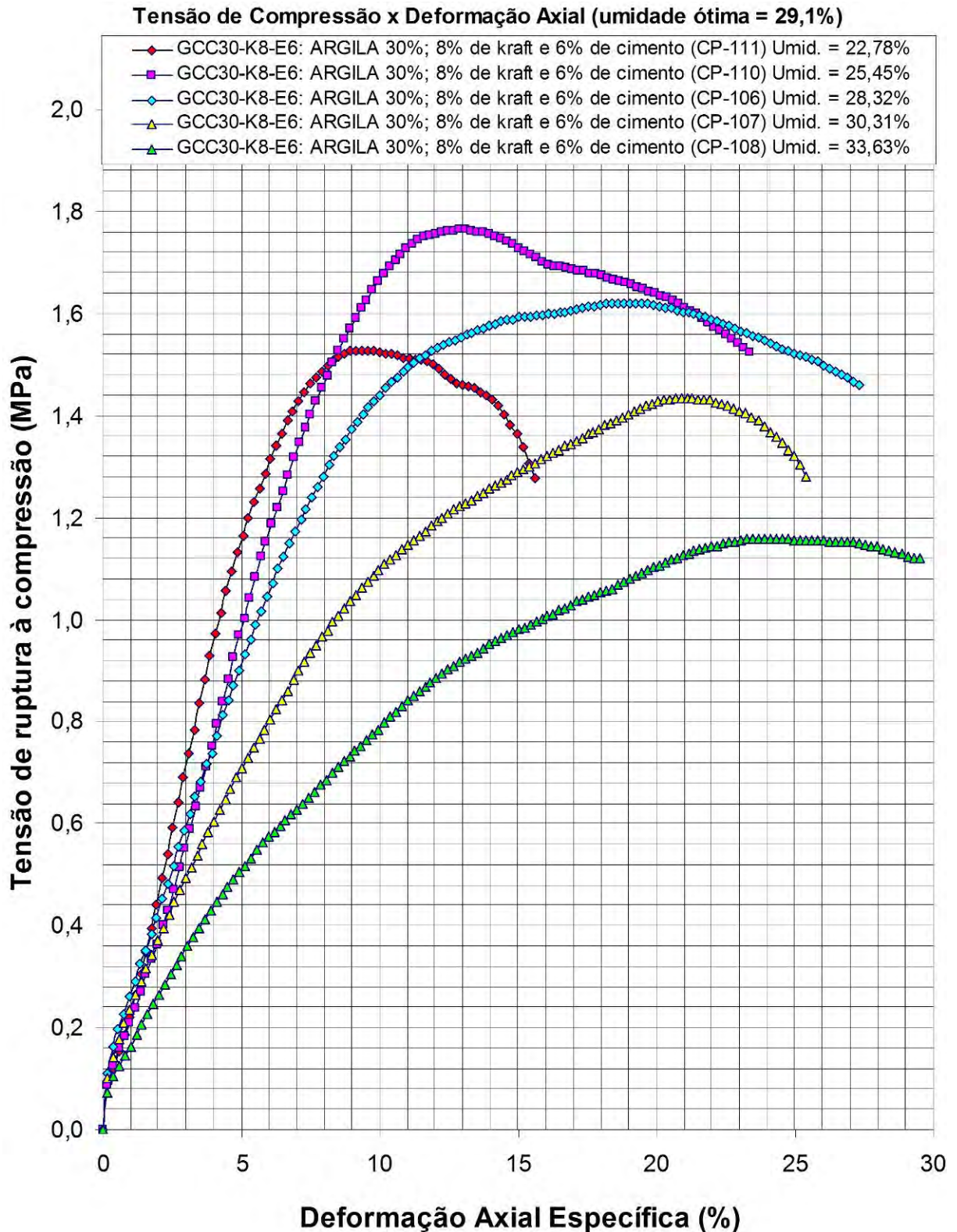
Anexo 6 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de solo-cimento GC-K0-E6.



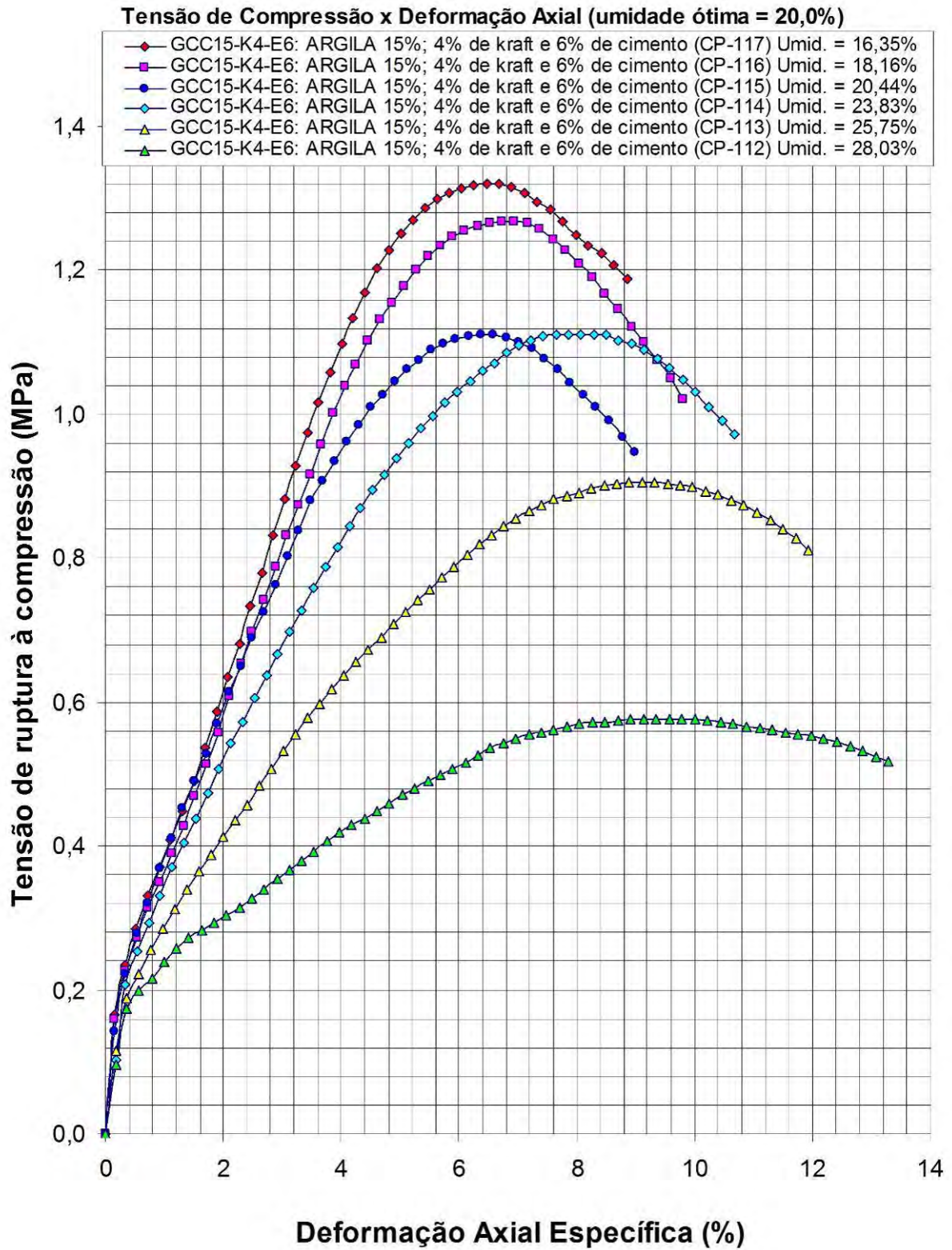
Anexo 7 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de Kraftterra GC-K6-E6.



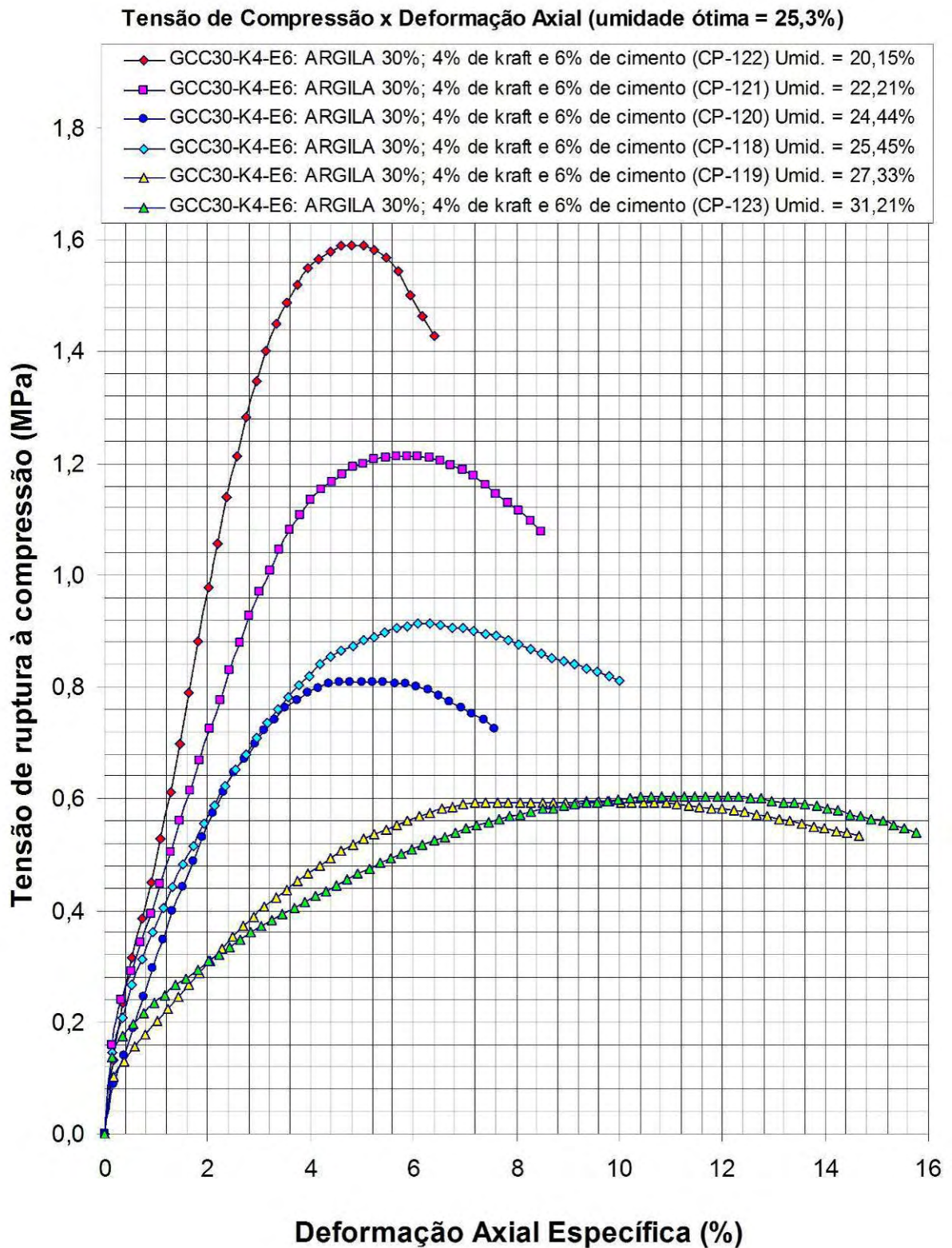
Anexo 8 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de Kraftterra GCC15-K8-E6. Estudo da variação do percentual de kraft (8%).



Anexo 9 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de Kraftterra GCC30-K8-E6. Estudo da variação do percentual de kraft (8%).

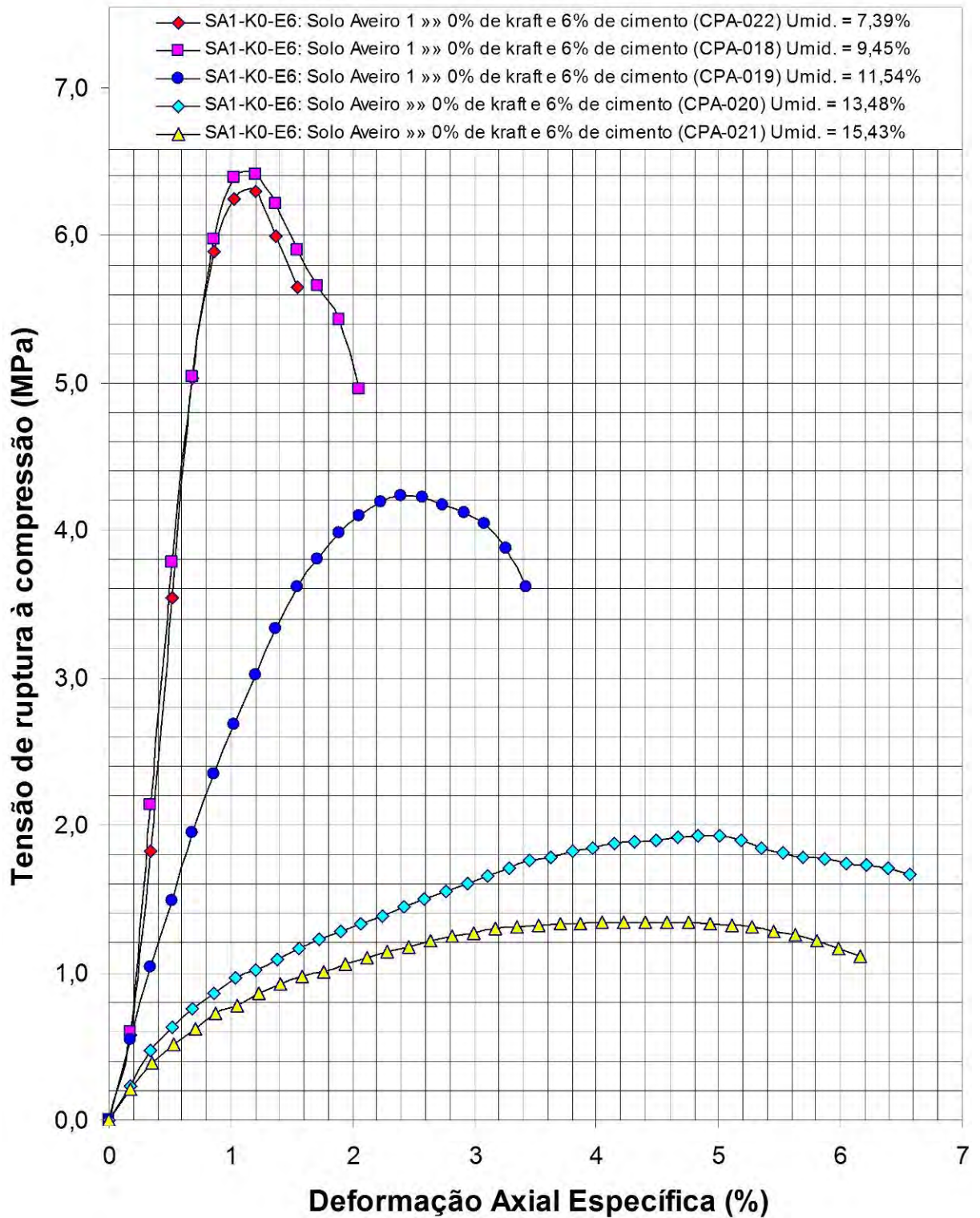


Anexo 10 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de Kraftterra GCC15-K4-E6. Estudo da variação do percentual de kraft (4%).

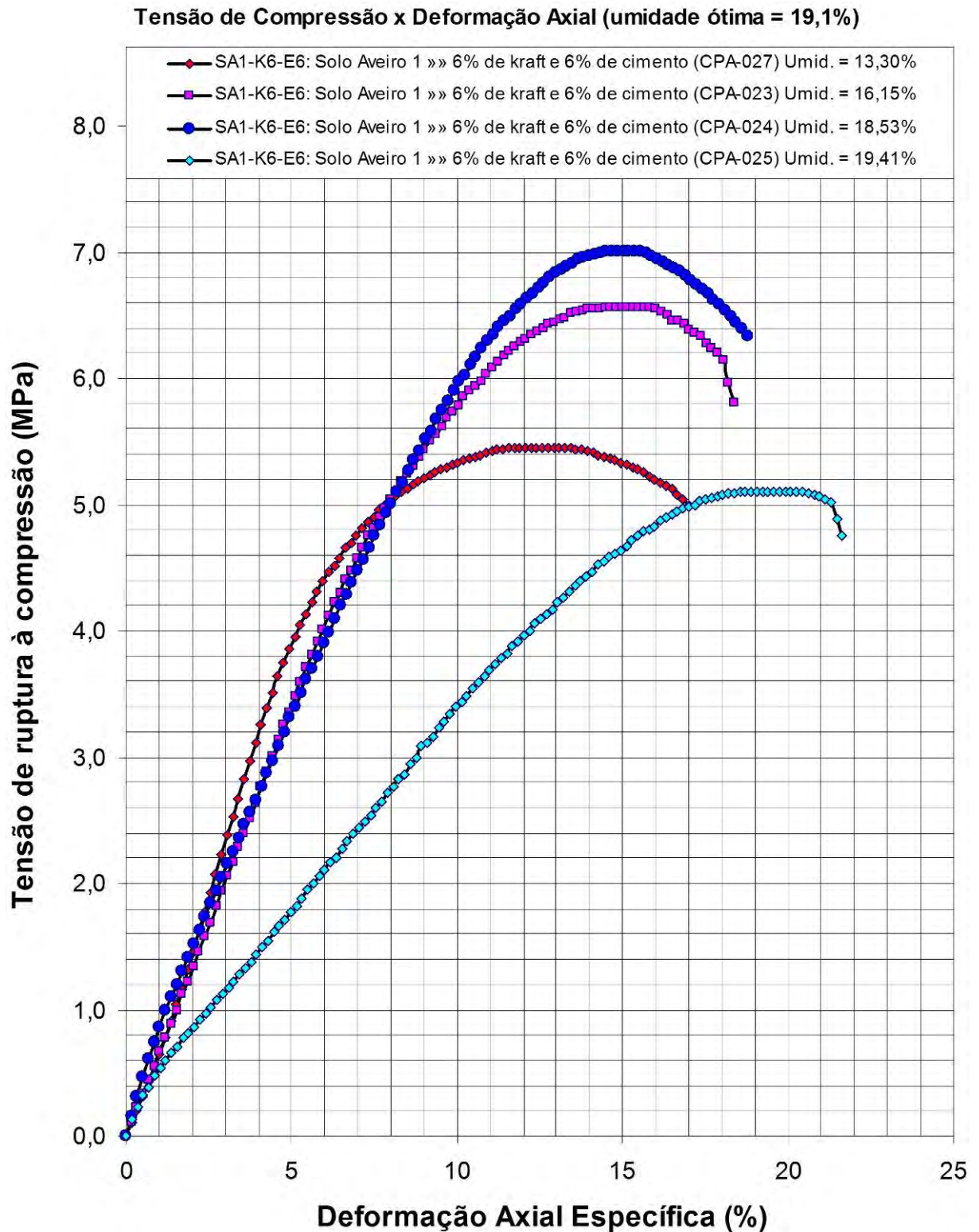


Anexo 11 – Gráfico de tensão/deformação dos CPs de Kraftterra GCC30-K4-E6. Estudo da variação do percentual de kraft (4%).

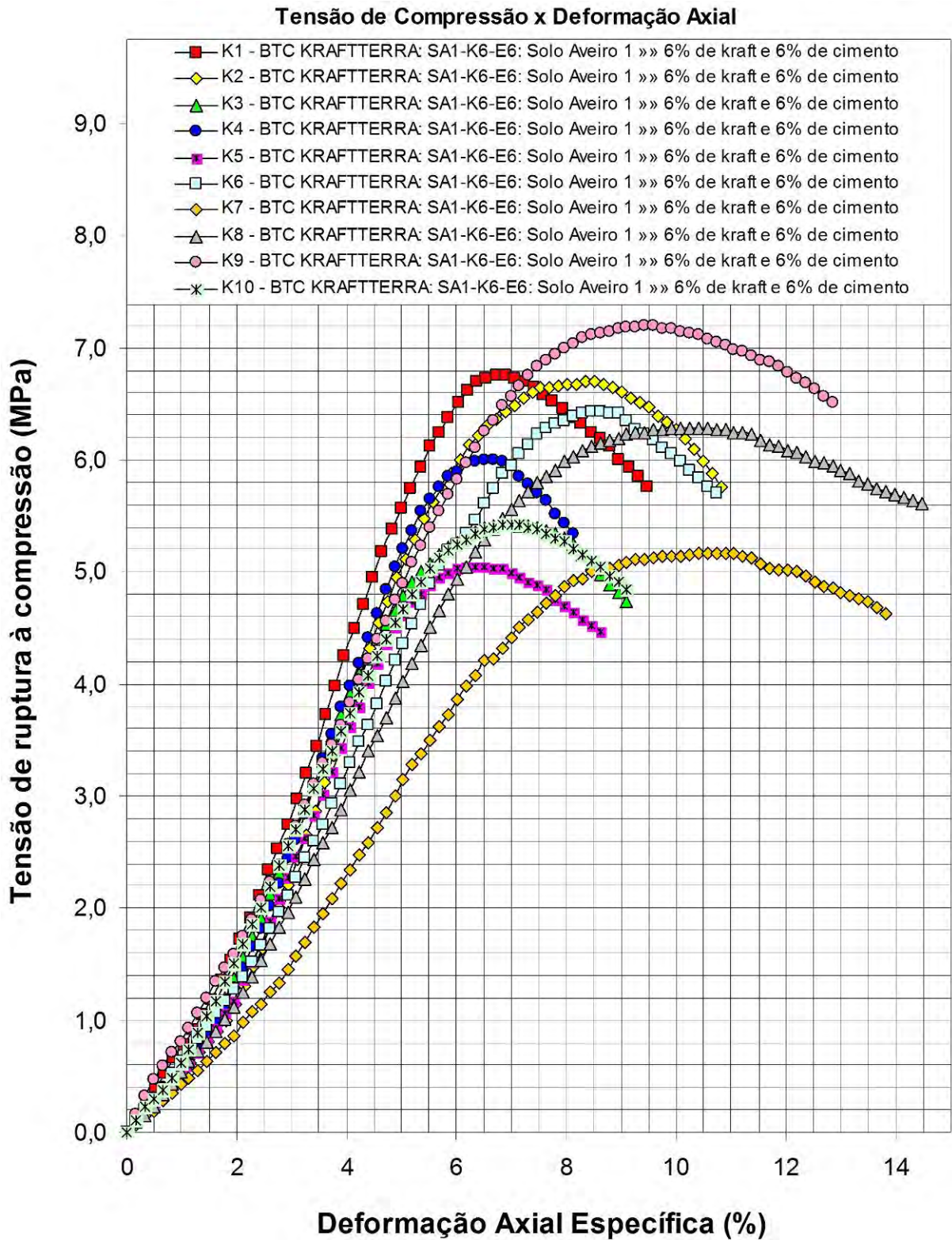
Tensão de Compressão x Deformação Axial (umidade ótima = 11,5%)



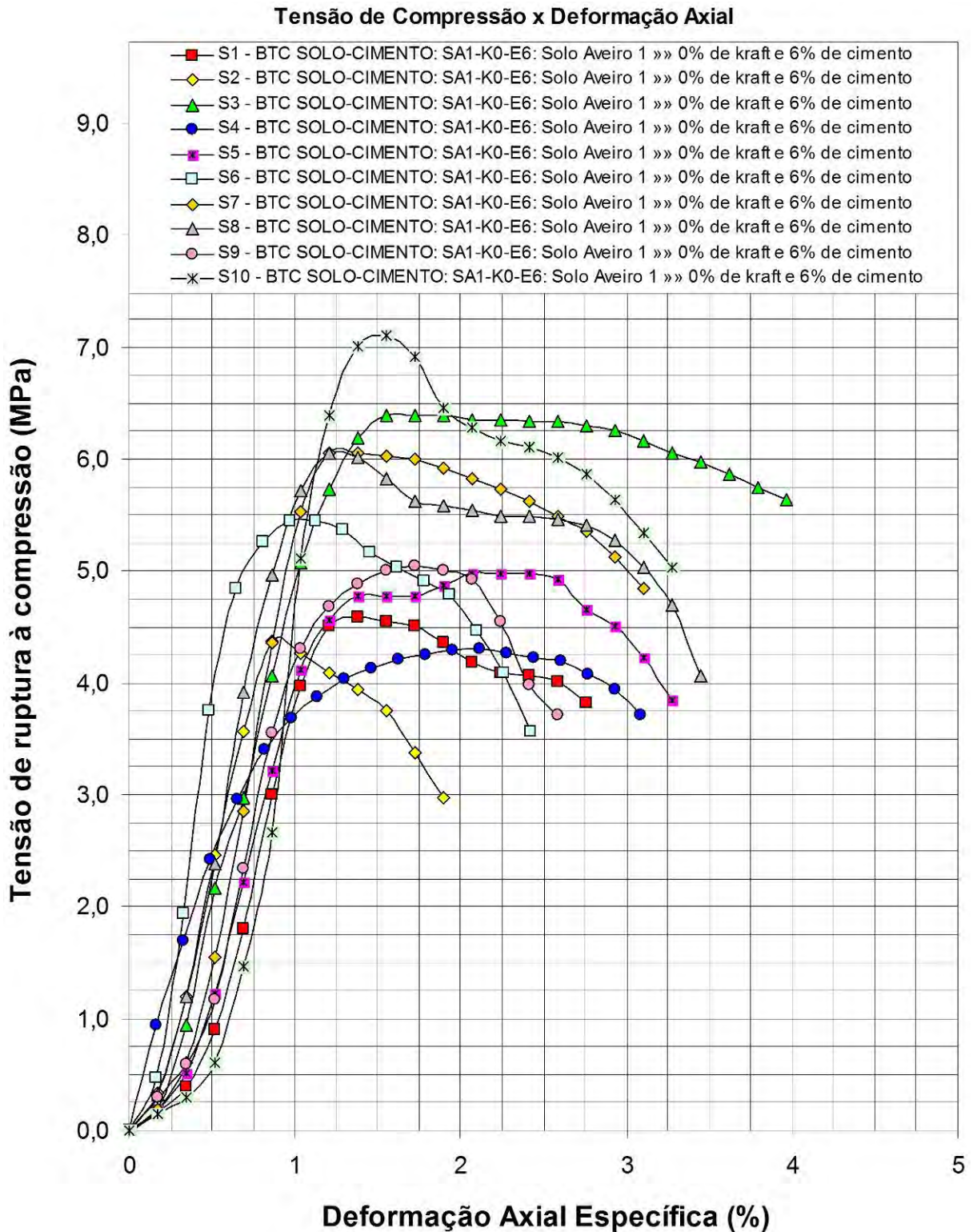
Anexo 12 – Gráfico de tensão/deformação para caracterização do solo de Aveiro e definição do valor de umidade ótima de compactação para a produção de BTCs de solo-cimento (SA1-K0-E6).



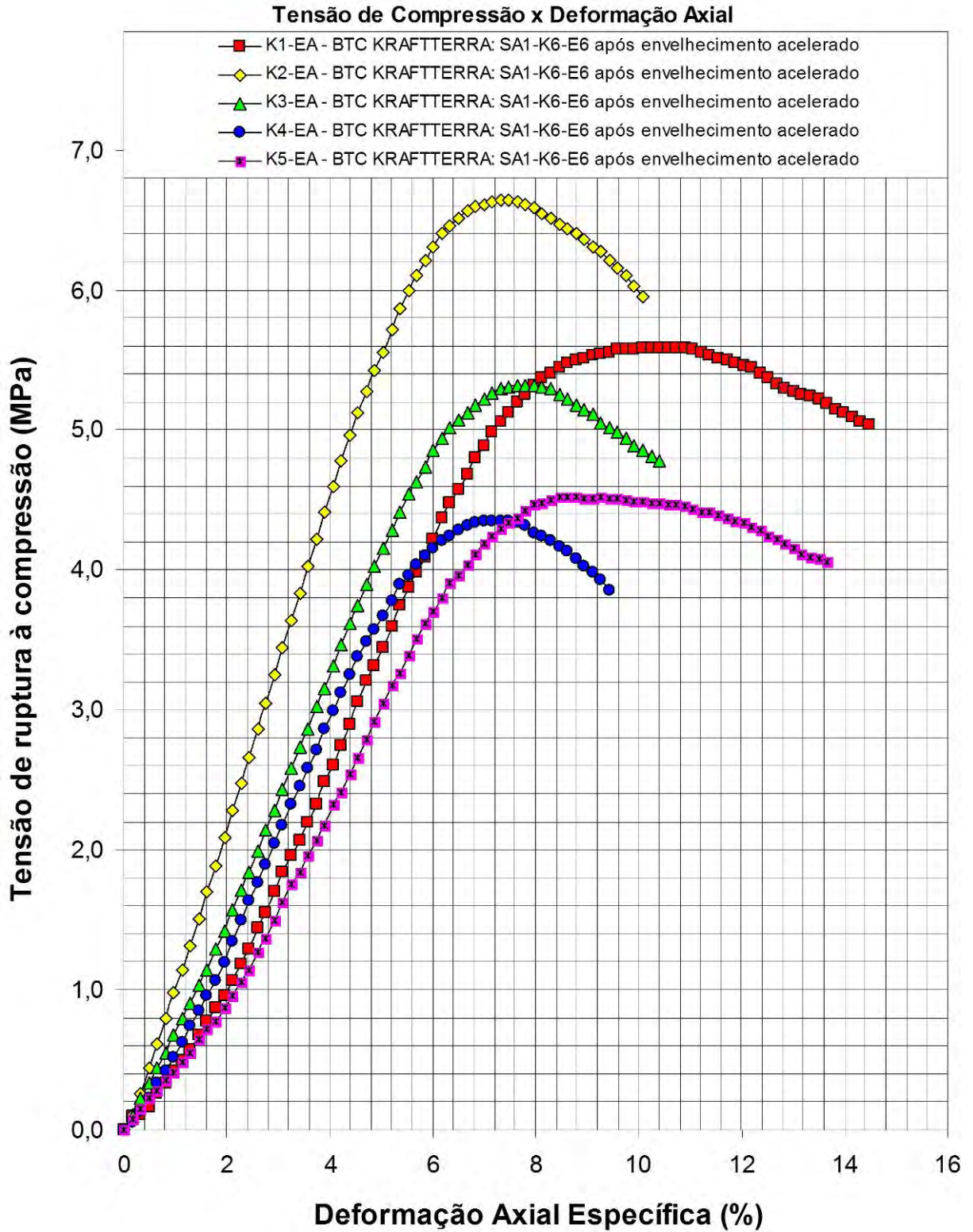
Anexo 13 – Gráfico de tensão/deformação para caracterização do solo de Aveiro e definição do valor de umidade ótima de compactação para a produção de BTCs de Kraftterra (SA1-K6-E6).



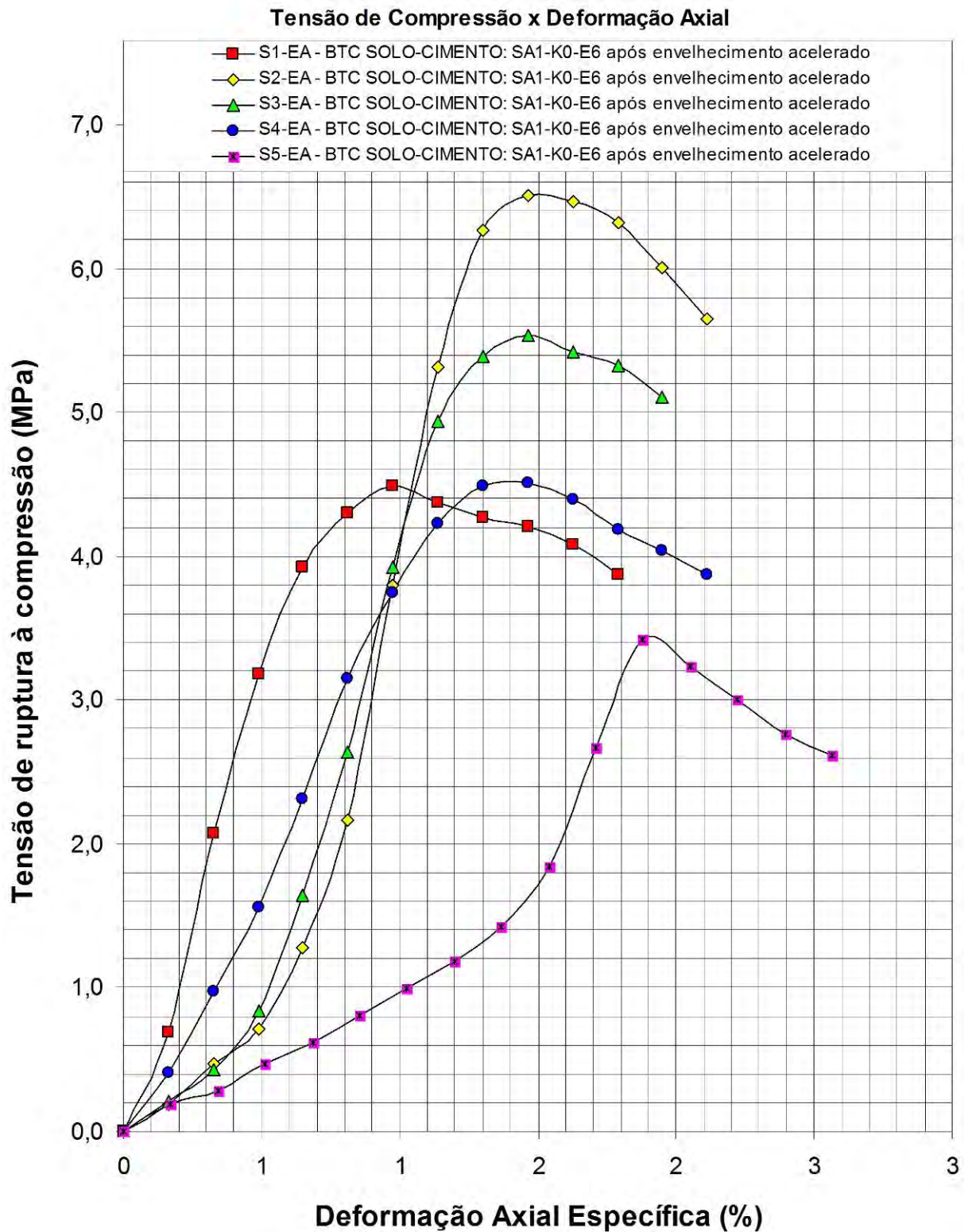
Anexo 14 - Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com BTCs de Kraftterra.



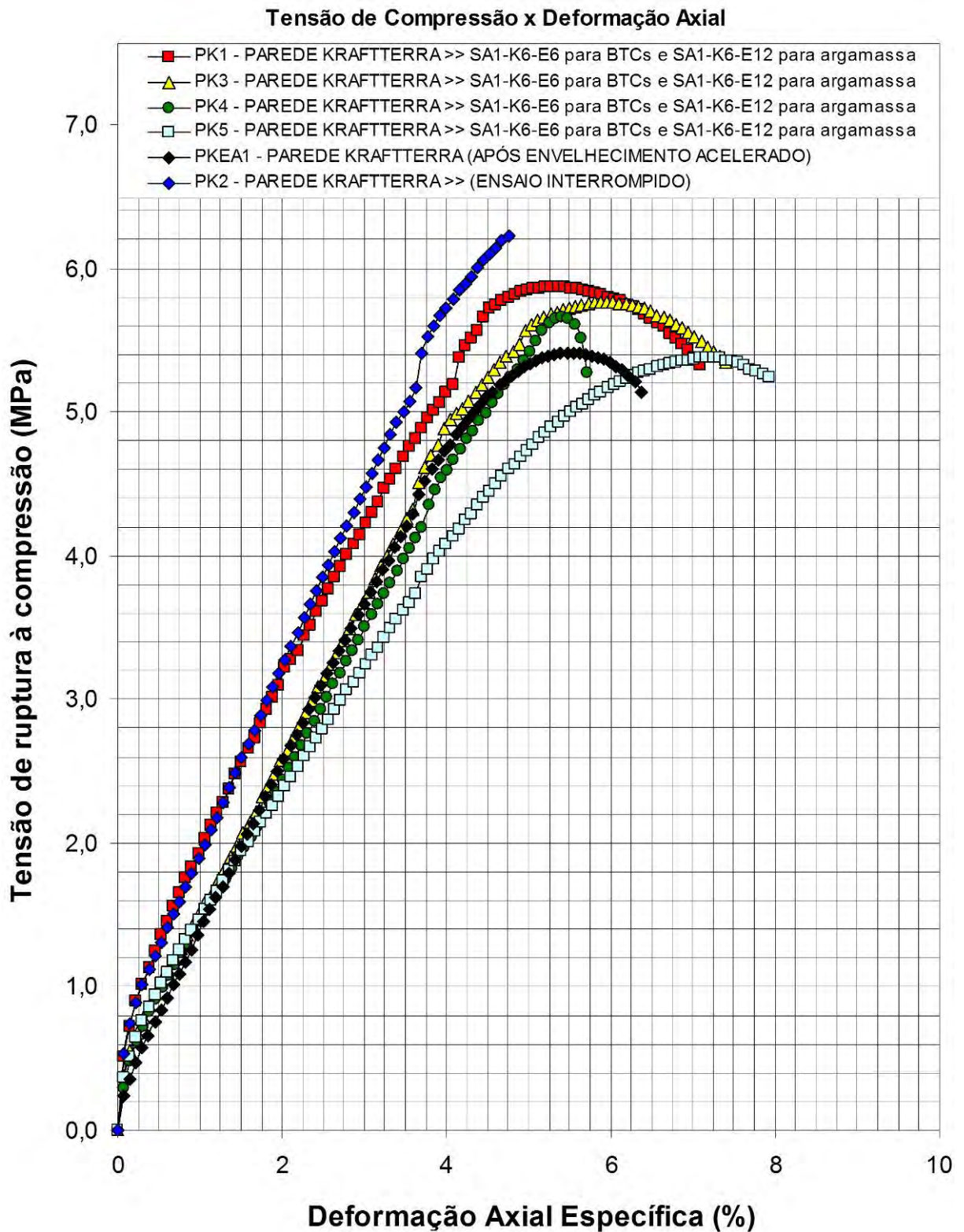
Anexo 15 – Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com BTCs de solo-cimento.



Anexo 16 – Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com BTCs de Kraftterra que passaram por ciclos de envelhecimento acelerado.



Anexo 17 – Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com BTCs de solo-cimento que passaram por ciclos de envelhecimento acelerado.



Anexo 18 – Gráfico de tensão/deformação dos ensaios de resistência à compressão simples com prismas produzidos com BTCs de Kraftterra.



LA MURATURA IN TERRA CRUDA FIBRORINFORZATA: TRA TRADIZIONE E INNOVAZIONE

Roberto Mattone - Politecnico di Torino- Italy

L'uso di fibre vegetali o animali nelle costruzioni in terra cruda appartiene alla cultura e alla tradizione di molti Paesi. Allo stato attuale, il livello di innovazione tecnologica ed i processi produttivi disponibili richiedono una riconsiderazione delle potenzialità e delle problematiche che l'utilizzo delle fibre comporta, per ottimizzare l'impiego e le prestazioni.

PREMESSA

I processi produttivi dell'adobe sono, tradizionalmente, completamente manuali; aggiungere fibre di varia natura, lunghezza e quantità all'impasto di terra risulta, in tal caso, abbastanza agevole, e non comporta particolari complicazioni a livello produttivo.

L'impiego delle fibre ha lo scopo di ridurre la fragilità dei manufatti, limitare il fenomeno di ritiro e, nel caso di fibre vegetali, migliorarne l'essicazione e ottenere, talvolta, anche una certa riduzione di peso. La fibra svolge perciò, in questo caso, una funzione limitata sostanzialmente al miglioramento delle caratteristiche dell'adobe e di una fase del suo processo produttivo, senza intervenire in modo determinante sulla qualità globale della muratura.

OBBIETTIVI

Considerare l'impiego di blocchi in terra fibrorinforzata come mezzo per controllare le caratteristiche meccaniche della muratura richiede non solo una razionalizzazione dell'impasto terra-fibre, ma anche dei meccanismi attraverso i quali la presenza delle fibre può manifestare la sua efficacia.

L'interazione tra fibra e matrice è legata alla aderenza che può essere instaurata tra le due fasi ed è funzione della compattezza della matrice, della forma delle fibre e della loro lunghezza.

L'aderenza, se sviluppata al massimo grado ed abbinata ad una opportuna lunghezza e quantità di fibre, può conferire resistenza a trazione al composito, che mantiene tuttavia un comportamento a rottura di tipo fragile; al contrario, nel caso in cui l'aderenza non sia tale da raggiungere il cedimento per trazione delle fibre, si verifica un fenomeno di pull-out, attraverso il quale è possibile controllare il meccanismo di rottura, ottenendo duttilità.

Tra queste due situazioni limite deve essere ricercato il comportamento più idoneo per la muratura in terra fibrorinforzata, rendendolo compatibile con le esigenze del processo produttivo.

Le fibre possono essere impiegate nella malta, nel blocco o in entrambi i casi.

Come si è detto prima, l'aderenza tra fibra e matrice è funzione - a parità di condizioni - della compattezza di quest'ultima; nella malta dei giunti - costituita anch'essa da terra stabilizzata, certamente meno compatta rispetto ai blocchi pressati - la minore aderenza può essere compensata da una maggiore lunghezza e quantità delle fibre, senza trascurare tuttavia, una possibile maggiore deformabilità dei giunti ed una certa difficoltà di lavorazione.

Nel caso di blocchi pressati la migliore aderenza dovuta alla maggiore compattezza della matrice può consentire, a parità di prestazioni, di intervenire sul quantitativo e sulla lunghezza delle fibre, tenendo conto delle esigenze derivanti da un sistema produttivo anche solo sommariamente meccanizzato, come nel caso in cui sia previsto l'uso di presse manuali.



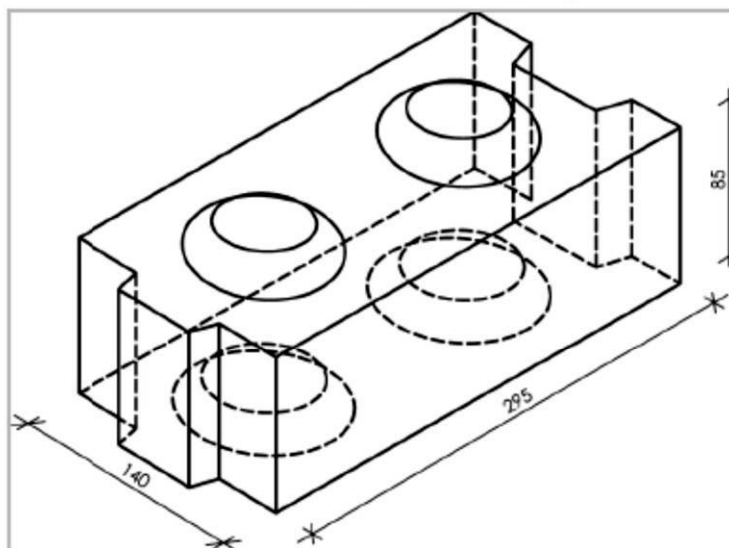
In una valutazione globale del comportamento della muratura appare quindi della massima importanza il collegamento tra i vari blocchi, affidato alla malta dei giunti o ad accorgimenti diversi. Solo con un buon collegamento tra blocco e blocco è possibile attivare i meccanismi di resistenza generati dalla presenza delle fibre: quanto maggiore è la potenziale efficacia delle fibre, tanto migliore dovrà essere il collegamento.

LA FASE SPERIMENTALE

A seguito delle esperienze effettuate con diversi tipi di muratura (2, 3, 4, 5), si è preferito migliorare la qualità globale delle murature in blocchi di terra pressata stabilizzata e fibrorinforzata attraverso la messa a punto di una forma di interconnessione meccanica tra i blocchi, ottenibile con semplici attrezzature.

I blocchi, anche se prodotti con una semplice pressa manuale, hanno dimensioni costanti e, in virtù delle interconnessioni predisposte (fig. 1), consentono la realizzazione della muratura con giunti di malta in terra stabilizzata dello spessore di circa 4 mm, facilitando l'attività di autocostruzione anche a persone non esperte.

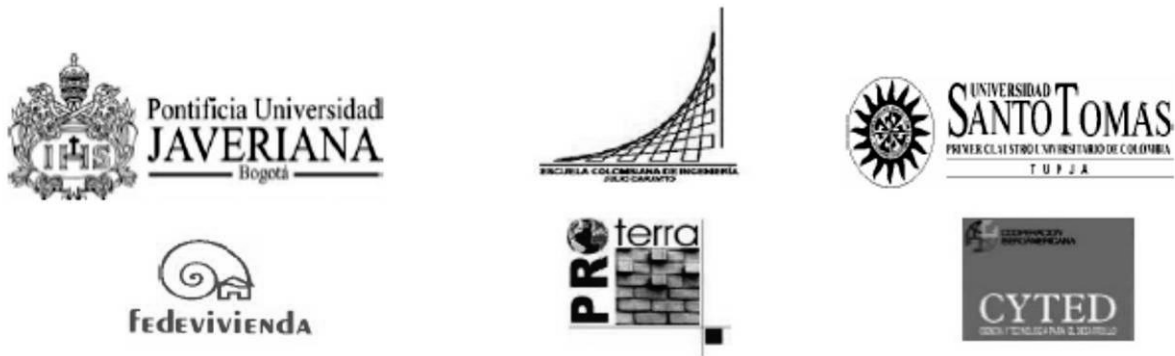
FIGURA 1: dimensioni e forma del blocco sagomato



A parità di condizioni, il ridottissimo spessore del giunto di malta comporta già un miglioramento della qualità della muratura e un buon collegamento tra i blocchi; abbinato alla presenza delle fibre consente una redistribuzione degli sforzi, interessando alla rottura una zona più ampia nella quale il cedimento dei blocchi avviene per trazione. Tale comportamento si evidenzia nella prova a compressione e spinta laterale e, in maggiore misura, nella prova di compressione diagonale.

La difficoltà di pervenire normalmente, avvalendosi di una semplice impastatrice, ad una uniforme distribuzione random 3D delle fibre, ha richiesto una ottimizzazione della loro lunghezza e quantità in vista di un efficace contributo alla resistenza a trazione della muratura.

La sperimentazione - che ha previsto l'utilizzo di una matrice in terra stabilizzata con il 6% di cemento e fibre di sisal di diversa lunghezza - ha indicato, come valore già significativo; una lunghezza delle fibre di 2,5 cm ed un $V\% \approx 0,71$.



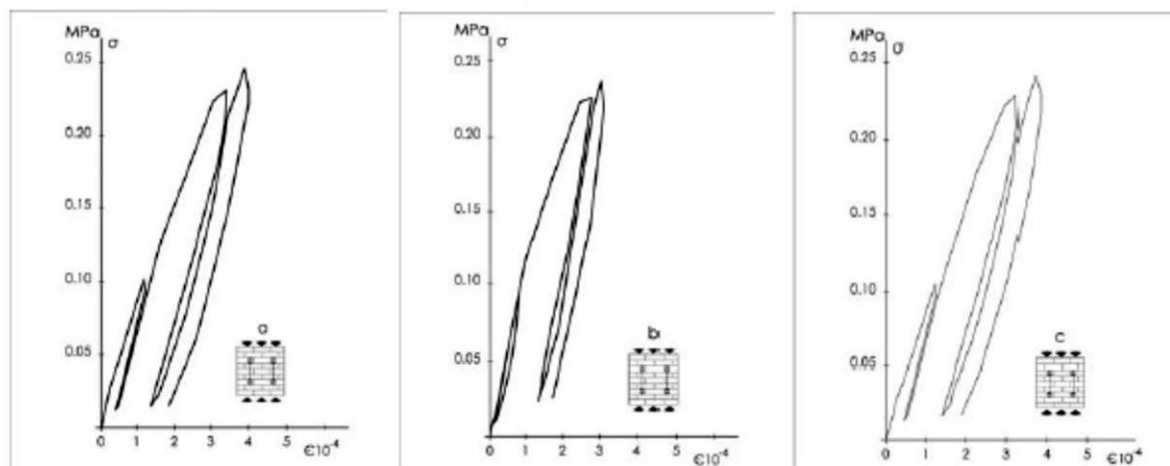
In fig. 2 sono posti a confronto il comportamento di provini di muratura (dimensioni cm 90x90, spessore cm 14) realizzati con blocchi sagomati – fibrorinforzati (c) e non (b) - con quello di analoghi provini eseguiti con blocchi semplicemente parallelepipedi (a), sottoposti a compressione semplice e spinta laterale.

Durante la prova, la sollecitazione di compressione verticale è stata mantenuta costante e pari a 0,25 MPa (corrispondenti ad un ipotetico carico di esercizio); è stata invece fatta variare la spinta orizzontale assestandola, per i diversi tipi di provini, al limite del ribaltamento .

Come è possibile rilevare in fig.2, il provino di muratura realizzato con blocchi parallelepipedi è giunto a collasso sotto l'azione di una spinta orizzontale di ≈ 14 KN; i provini realizzati con blocchi sagomati, invece, superato tale valore di spinta, hanno raggiunto il limite di rotazione senza danneggiamenti apparenti, sia pure con deformazioni maggiori per il provino fibroso.

A tale valore limite le prove sono state interrotte , in quanto la rotazione dei provini li avrebbe sottoposti ad un regime di sollecitazione diverso, molto simile a quello di un test di compressione diagonale.

FIGURA 2: risultati provini sottoposti a compressioni

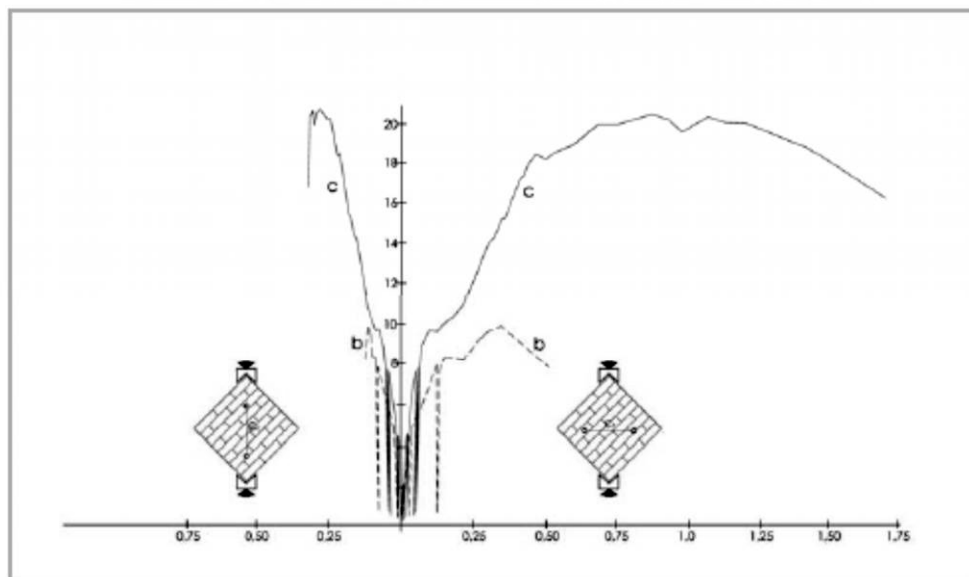


In fig. 3 sono posti a confronto i comportamenti dei provini sottoposti a compressione diagonale realizzati con blocchi sagomati, fibrosi e non. Non compaiono invece dati relativi alle prove su campioni di muratura realizzati con blocchi semplicemente parallelepipedi, in quanto l'insufficiente aderenza tra blocchi e malta ne ha causato la sconnessione sotto il semplice effetto del peso proprio.

La sperimentazione è ancora in corso, e non si esclude di poter aumentare il quantitativo di fibra e la sua lunghezza qualora siano messi a punto accorgimenti e attrezzature particolari per la miscelazione.



FIGURA 3: grafico risultati provini sottoposti a compressione diagonale



CONCLUSIONI

La sperimentazione condotta, per quanto non ancora conclusa, consente di formulare alcune considerazioni:

- La presenza delle fibre può migliorare la resistenza a trazione e conferire duttilità alla muratura in blocchi di terra pressata e stabilizzata ;
- La fibra richiede particolare attenzione nella miscelazione, ed il risultato può influire sulla qualità della produzione;
- L'uso della fibra deve essere valutato considerando le condizioni climatiche del sito in cui si costruisce ed il grado di protezione dall'umidità previsto in progetto, poiché essa può condurre l'acqua all'interno della muratura e, in situazioni di gelo e disgelo, può dare luogo alla disgregazione del manufatto;
- La muratura in terra stabilizzata può essere una valida alternativa per operare in modo diffuso nel territorio con semplici attrezzature, riducendo il costo energetico della costruzione e l'impatto ambientale delle infrastrutture.