

PATRICIA BARBOZA DA SILVA

ESTABILIZAÇÃO DE MISTURAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE
DEMOLIÇÃO E DA INDÚSTRIA CERÂMICA PARA USO EM CAMADAS
DE PAVIMENTOS VIÁRIOS

São Paulo
2014

PATRICIA BARBOZA DA SILVA

ESTABILIZAÇÃO DE MISTURAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE
DEMOLIÇÃO E DA INDÚSTRIA CERÂMICA PARA USO EM CAMADAS
DE PAVIMENTOS VIÁRIOS

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de doutor em engenharia

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora: Prof.^a Titular Liedi Legi
Bariani Bernucci

São Paulo
2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 30 de janeiro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Patricia Barboza da

Estabilização de misturas de resíduos sólidos de demolição e da indústria cerâmica para uso em camadas de pavimentos de vias / P.B. da Silva. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.

172 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Pavimentação 2.Resíduos de construção I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

*Com amor, à minha filha Júlia, razão de
tudo, e ao meu marido Willian.*

AGRADECIMENTOS

Registro aqui meus agradecimentos a todos os colaboradores e amigos que contribuíram de alguma forma para que este trabalho pudesse ser realizado. Especialmente gostaria de agradecer:

Primeiramente a Deus, energia constante em toda minha vida e ainda mais forte nos tempos mais difíceis.

As pessoas mais duras e mais difíceis que encontrei em meu caminho, pois certamente sem estas “pancadas” hoje eu não seria tão eu!

À minha orientadora, “Profe” Liedi, pelo apoio e incentivo e, principalmente, por acreditar mais em mim do que eu mesma.

Ao professor Sérgio Cirelli Angulo, meu co-orientador de fato, pela ajuda e incentivo no desenvolvimento deste trabalho e por despertar em mim o interesse pelos resíduos de construção quando acreditou em meu potencial para desenvolver esta pesquisa.

À família LTP, grandes companheiros e amigos, ainda mais próximos no final desta jornada;

... ao querido amigo-professor Edson de Moura, pela amizade e apoio em todas as horas, fáceis e difíceis, e pelas longas discussões no “confessionário” sobre como e por onde andar nas estabilizações das misturas;

... ao tecnólogo-amigo Vanderlei (“Vand”) pela amizade, pela ajuda em todos os ensaios, pela paciência em repetir, repetir e repetir módulos de resiliência sempre que necessário e pela companhia já nos primeiros dias deste ano;

... ao amigo Igor Beja, companheiro de “RCDs”, pela ajuda com ensaios, discussões dos mais diversos assuntos sobre o nosso tema e também pelas boas e divertidas conversas do dia a dia;

... ao Tecnólogo Kendi, pela ajuda com os longos ensaios na MTS;

... ao Engenheiro Robson (Rob) pela continuidade dos longos ensaios na MTS;

... a Diomária e Erasmo, sempre prestativos e atenciosos;

... aos novos e bons amigos Iuri e Rodrigo, pela convivência sempre agradável e pelas boas e acalentadoras conversas, principalmente nos dias difíceis;

...à Manu (*flower!!*), presença alegre e motivadora, mesmo pelo curto período de tempo em que dividimos a sala;

... à amiga-professora Kamilla Vasconcelos (Kamis), pelas valiosas dicas e pela incentivadora frase “Calma, vai dar tudo certo!”;

... à minha querida amiga-irmã-professora Rosângela Motta (Rô), por todo apoio e incentivo neste e em outros momentos da vida, pela ajuda com o texto, pela calma e tranquilidade diária e pela amizade e parceria de sempre;

... à Marcinha, Antônio, Serginho, Thiago, Matheus, Kazou, Letícia, pela agradável companhia diária;

... aos funcionários do Departamento de Transportes: Patrícia, Simone e Edson pela ajuda sempre que necessário.

Ao Laboratório de Microestrutura da Escola Politécnica da USP, pela realização de ensaios químicos, em especial ao Prof. Vanderley John e ao Tecnólogo Mario Takeashi.

Novamente ao Prof. Vanderley John pelas valiosas contribuições e críticas no exame de qualificação que ajudaram, de forma muito significativa, a direcionar o final desta tese.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, pela possibilidade de fazer parte de seu quadro de pesquisadores e por conceder a licença não remunerada para que eu pudesse terminar esta tese;

... ao Dr. José Maria de Camargo Barros, diretor do CT-Obras / IPT, pela ajuda na concessão da licença, por possibilitar a realização de ensaios desta tese nos laboratórios do IPT e pela parceria de trabalho dos últimos anos;

... ao eng. Ronaldo Rocha, responsável pela Seção de Geotecnia / IPT também pela ajuda na concessão da licença e por possibilitar a realização dos ensaios desta tese no laboratório de Pavimentos e Mecânica dos Solos do IPT;

... ao químico Dr. Valdecir Quarcione, pelo apoio para realização de ensaios químicos e mineralógicos no Laboratório de Materiais de Construção Civil /IPT

... à minha querida equipe de trabalho: Marilene (D. Mari), Jorginho, Valmir, Rodrigo, Ronan, Benedito e Roberto, pela ajuda nos ensaios realizados no IPT e pela amizade e companhia diária;

... aos tecnólogos Elaine Soares e Rubens Vieira, por “segurarem as pontas” dos trabalhos no IPT enquanto eu terminava a tese;

... à Dra. Gisleine Coelho, pelo incentivo e apoio no início desta tese;

... aos geólogos Edson Del Monte, Dr. Luis Carlos Tanno e Dr. Marsis Cabral, pela ajuda na obtenção das amostras de resíduos de cerâmica vermelha;

...à equipe da creche do IPT por cuidarem com tanto carinho da minha pequena Júlia, para que eu pudesse me dedicar com maior tranquilidade a realizar este trabalho.

À empresa Fremix / Grupo Ane, pelo fornecimento do resíduo de demolição e pela britagem deste e do resíduo de cerâmica vermelha, nas pessoas do eng. Valmir Bonfim e dos técnicos Éder e Jader;

A Associação das Olarias de Cabreúva e Região pela coleta e fornecimento do resíduo de cerâmica vermelha, na pessoa do Sr. Elzo.

A Pedreira Serveng-Barueri, pelo fornecimento de agregados para composição da BGS, nas pessoas do eng. Sidnei e da técnica Keiti.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa durante os últimos meses de doutorado.

Aos meus pais, grandes incentivadores em todas as batalhas da minha vida, por estarem sempre ao meu lado;

À toda minha família, irmãos, cunhada, avós, sogro, sogra, tios, tias, primos, primas, todos sempre na torcida.

Ao meu marido-amigo Willian, pelo amor dedicado, paciência, incentivo, apoio e parceria de sempre, que apesar de não estar diariamente ao meu lado, sempre torce por mim.

A minha filha, “princesa” Júlia, por me fazer mais forte e mais feliz a cada dia desde que olhei em seus olhos pela primeira vez.

RESUMO

Esta pesquisa trata da estabilização de misturas de agregados reciclados por meio da ativação de seus finos, cujas composições possibilitam a ocorrência de reações químicas de cimentação. Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dois tipos de agregados reciclados: um proveniente de resíduo de demolição de natureza cimentícia e outro da indústria de cerâmica vermelha. O uso dos materiais foi feito por meio de dosagens para obtenção de misturas cujas combinações de materiais pudessem, quimicamente, potencializar a ocorrência de hidratação do cimento anidro existente nos finos do agregado reciclado cimentício e de reação pozolânica pela pozolanicidade da cerâmica vermelha. Com isso foram obtidas cinco misturas, compostas pelos agregados reciclados em estudo misturados entre si e com a adição de aglomerantes hidráulicos, sobre as quais foram realizados ensaios em laboratório para verificação da ocorrência das reações químicas esperadas com consequente estabilização das misturas, de modo a influenciar nos respectivos comportamentos mecânicos. Também foi realizada a avaliação de características do empacotamento dos grãos como forma de verificar se o arranjo físico, neste caso, exerce influência significativa na melhora do comportamento mecânico das misturas estudadas. Os resultados obtidos indicaram que, de fato, ocorreram as reações químicas esperadas, comprovadas pelos resultados dos ensaios de termogravimetria e difração de raios x, realizados em três diferentes idades de cura. Verificou-se, também, a melhora no comportamento mecânico das misturas por meio do aumento da resistência à compressão simples e do módulo de resiliência com a evolução da cura, além de baixa deformabilidade aos 91 dias de cura. Com isso foi comprovada a estabilização das misturas em estudo, com a consequente melhora de seus desempenhos, sendo devida, principalmente, à ocorrência das reações químicas de hidratação do cimento anidro e pozolânica. A pesquisa demonstrou a possibilidade de se estabilizar misturas de agregados reciclados cimentícios e de cerâmica vermelha por meio da ocorrência de reações químicas de cimentação promovidas pela combinação destes materiais.

Palavras-chave: Agregados reciclados. Resíduo cimentício. Cerâmica vermelha, Reação pozolânica. Hidratação do cimento.

ABSTRACT

This research deals with the stabilization of mixtures constituted by recycled aggregates through the activation of its fines portions, whose components enable the occurrence of chemical cementation reactions. In order to develop this research, two types of recycled aggregates were used: one from demolition waste with cementitious origin, and the other one from the red ceramic industry. The use of these materials was done through mix designs to obtain mixtures whose combinations of materials could chemically increase the occurrence of hydration of the anhydrous existing in fine portion of the recycled cementitious aggregates, and pozzolanic reactions due to the pozzolanicity of red ceramics. Thus, five mixtures were obtained, and they were composed by the studied recycled aggregates, mixed together and with the addition of hydraulic binders, on which laboratory tests were performed in order to verify the occurrence of the expected chemical reactions with consequent stabilization of the mixtures, in order to influence their mechanical behavior. Furthermore, it was performed the evaluation of packing characteristics of the particles to verify if the physical arrangement, in this case, has any significant influence on improving the mechanical behavior of the mixtures studied. The results obtained indicated that in fact the expected chemical reactions occurred, which was verified by the results from thermogravimetry and X-ray diffraction tests performed at three different times of curing. The improvement of the mixtures' mechanical behavior by increasing of their compressive strength and their resilient modulus was also verified as the mixtures were cured, in addition to low deformability at 91 days of curing. Thus, the stabilization of the mixtures studied was confirmed, which was mainly due to the occurrence of chemical hydration reactions of the anhydrous cement and pozzolanic reactions. The study demonstrated the possibility of stabilizing mixtures of recycled aggregates cementitious waste and red ceramic by the occurrence of cementing chemical reactions promoted by combination of these materials.

Keywords: Recycled aggregates. Cementitious waste. Red ceramic waste. Pozzolanic reactions. Cement hydration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fases constituintes dos solos e materiais para pavimentação, respectivos volumes e relações volumétricas	45
Figura 2 – Granulometria de densidade máxima.....	49
Figura 3 – Exemplo de granulometria com pontos de controle e zonas de restrição adequada à especificação Superpave	50
Figura 4 - Fluxograma do experimento	57
Figura 5 – Demolição dos Edifícios São Vito e do Moinho.....	59
Figura 6 – Resíduo cimentício selecionado, antes da britagem	60
Figura 7 – Aspecto do resíduo de tijolo cerâmico antes da britagem	61
Figura 8 – Aspecto do agregado reciclado de tijolo cerâmico	61
Figura 9 – Curvas granulométricas adotadas para os dos agregados reciclados Cim e Cv.....	63
Figura 10 – Faixa granulométrica A para Brita Graduada Simples (ABNT, 1991) e curva utilizada para BGS e Cim	64
Figura 11 – Curvas granulométricas do Cim antes e após a compactação na energia modificada, em percentual passado em massa	65
Figura 12 – Curvas granulométricas do Cim antes e após a compactação na energia modificada, em percentual retido em massa.....	66
Figura 13 – Curvas granulométricas dos agregados reciclados cimentício (Cim) e de cerâmica vermelha (Cv), em distribuição de volume.....	67
Figura 14 – Equipamento utilizado nos ensaios de FRX.....	72
Figura 15 – Difratorômetro-utilizado nos ensaios de difração de raios X	73
Figura 16 – Conjunto da termobalança utilizada nos ensaio de termogravimetria	75
Figura 17– Curvas granulométricas por peneiramento das misturas estudadas, obtidas pelo método NBR 7181 (ABNT, 1988a), em porcentagem de massa	85
Figura 18– Curvas granulométricas das misturas estudadas, obtidas pelo equipamento Camsizer, em porcentagem de massa	86
Figura 19 – Curvas granulométricas das misturas estudadas, obtidas pelo equipamento Camsizer, em porcentagem de volume retido	86
Figura 20 – Liofilizador utilizado para liofilização das pastas estudadas.....	91
Figura 21 – Porosidade (η) das misturas estudadas.....	100
Figura 22– Densidade relativa de empacotamento (ρ_{emp}) para as misturas estudadas	100
Figura 23 – Comparativo de \square_{total} ao longo da cura	102
Figura 24 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.....	105
Figura 25 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura Cim aos 7, 28 e 91 dias e para a BGS.....	107
Figura 26 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura Cim+Cv<0,15mm aos 7, 28 e 91 dias	108
Figura 27 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura Cim+cP aos 7, 28 e 91 dias	108

Figura 28 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura 70%Cim+30%Cv+cal aos 7, 28 e 91 dias	109
Figura 29 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura Cv+cal aos 7, 28 e 91 dias.....	109
Figura 30 – Representação gráfica dos deslocamentos sofridos pelo corpo de prova durante o ensaio triaxial cíclico	113
Figura 31 – Ensaio de deformação permanente conduzido na MTS (<i>Material Test System</i>)	114
Figura 32 – Resultados dos ensaios de deformação permanente	116
Figura 33 – Variação do módulo de resiliência durante os ensaios de deformação permanente	117
Figura 34 – Relação entre perda de água combinada de hidratos e resistência à compressão simples das misturas estudadas.....	119
Figura 35 – Relação entre perda de água combinada de hidratos e módulo de resiliência das misturas estudadas.....	120
Figura 36 – Relação entre porosidade total (η_{total}) e resistência à compressão simples para as misturas com agregado reciclado cimentício (Cim) e para a mistura com cerâmica vermelha (Cv+cal).....	121
Figura 37 – Relação entre porosidade total (η_{total}) e módulo de resiliência para as misturas com agregado reciclado cimentício (Cim) e para a mistura com cerâmica vermelha (Cv+cal)	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do agregado reciclado para aplicação em camadas de pavimentos conforme as normas ABNT NBR 15115:2004 e PMSP/SP ETS 001/2003	26
Tabela 2 - Composição dos agregados reciclados Cim e Cv	63
Tabela 3 – Parâmetros granulométricos para os agregados reciclados cimento (Cim) e de cerâmica vermelha (Cv) e para a BGS	66
Tabela 4 – Massas específicas e absorção dos materiais utilizados	68
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de índice de forma dos grãos	68
Tabela 6 – Resultados obtidos nos ensaios de FRX realizados nos agregados reciclados Cim e Cv	72
Tabela 7 – Condições utilizadas nos ensaios de difração de raios X.....	74
Tabela 8 – Fases mineralógicas identificadas nos ensaios de difração de raios X realizados nos agregados reciclados Cim e Cv.....	74
Tabela 9 – Análise termogravimétrica do Cim.....	75
Tabela 10 – Análise termogravimétrica do Cv.....	76
Tabela 11 – Resultados do ensaio de resíduo insolúvel e da estimativa do teor de cimento no Cim	77
Tabela 12 – Massas atômicas dos elementos envolvidos na reação de hidratação do cimento e na reação pozolânica.....	80
Tabela 13 – Quantidade de cal e pozolana a ser acrescentada nas misturas Cim+Cv<0,15mm, 70% Cim+30%Cv+Cal e Cv+Cal	83
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de compactação na energia modificada	84
Tabela 15 – Parâmetros granulométricos para as misturas estudadas.....	87
Tabela 16 - Porcentagens e quantidades de material empregados para moldagem das pastas.....	89
Tabela 17 – Fases mineralógicas determinadas pelos ensaios de DRX nas amostras de pastas das misturas estudadas	92
Tabela 18 – Análise termogravimétrica da mistura Cim	93
Tabela 19 – Análise termogravimétrica da mistura Cim+Cv<0,15mm.....	93
Tabela 20 – Análise termogravimétrica da mistura Cim+cP.....	94
Tabela 21 – Análise termogravimétrica da mistura 70%Cim+30%Cv+cal.....	94
Tabela 22 – Análise termogravimétrica da Cv+cal	94
Tabela 23 – Porcentagens de volumes de hidratos estimados para as misturas estudadas.....	96
Tabela 24 – Porosidades estimadas considerando o aumento no volume de hidratos com a evolução da cura	101
Tabela 25 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples	105
Tabela 26 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm considerando $\sigma_3 = 0,1$ MPa	110
Tabela 27 – Análise de variâncias entre as misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm	112
Tabela 28 – Análise de variâncias entre as misturas Cim+cP, 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal	112

Tabela 29 – Características da seção de pavimento hipotética adotada para determinação das tensões pelo Elsym 5.....	115
Tabela 30 – Tensões utilizadas nos ensaios de deformação permanente.....	115

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 ENQUADRAMENTO TEMÁTICO	17
1.2 OBJETIVO DA TESE	19
1.2.1 Objetivo Principal	19
1.2.2 Objetivos secundários:.....	20
1.3 METODOLOGIA	20
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Agregado reciclado de resíduo de construção e demolição.....	23
2.1.1 Uso em pavimentação: Normas e experiências.....	25
2.2 Estabilização de misturas de agregado reciclado cimentício e de cerâmica vermelha por ativação de finos	31
2.2.1 Reação de hidratação do cimento	32
Hidratação dos aluminatos	34
Hidratação dos silicatos	35
2.2.2 Reação pozolânica	36
2.3 Materiais estabilizados com aglomerantes hidráulicos para uso em camadas de pavimentos.....	38
2.3.1 Brita graduada tratada com cimento (BGTC).....	39
2.3.2 Solo-cimento.....	39
2.3.3 Solo melhorado com cimento	40
2.3.4 Solo-cal.....	41
2.4 Empacotamento das partículas.....	42
2.4.1 Fatores que afetam o empacotamento	47
2.4.1.1 Distribuição granulométrica	47
2.4.1.2 Outros fatores que afetam o empacotamento	52
Forma	52
Textura superficial das partículas	52
Porosidade das partículas	53
Resistência das partículas	53
Método e energia de compactação	53
2.4.2 Fatores relativos ao empacotamento que interferem no comportamento de camadas de pavimento.....	54

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS, MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
3.1 Materiais: origem e natureza.....	58
3.1.1 Agregado reciclado de resíduo cimentício (Cim)	58
3.1.2 Agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv)	60
3.1.3 BGS (Brita Graduada Simples)	61
3.1.4 Cimento Portland e cal CH-I	61
3.2 Materiais: ensaios de caracterização	62
3.2.1 Caracterização física	62
3.2.1.1 Granulometria dos agregados reciclados estudados.....	62
3.2.1.2 Massas específicas dos materiais	68
3.2.1.3 Forma dos grãos	68
3.2.1.4 Discussões dos ensaios de caracterização física.....	69
3.2.2 Caracterização química	70
3.2.2.1 Fluorescência de raios X (FRX).....	71
3.2.2.2 Difração de raios X	72
3.2.2.3 Termogravimetria (TG)	74
3.2.2.4 Ensaio Chapelle modificado	76
3.2.2.5 Determinação do resíduo insolúvel (RI).....	76
3.2.2.6 Discussões dos ensaios de caracterização química	77
3.3 Dosagem das misturas	78
3.3.1 Metodologia utilizada	79
3.3.1.1 Cálculo da massa atômica do hidróxido de cálcio na reação de hidratação do cimento	80
3.3.1.2 Cálculo da massa atômica da pozolana na reação pozolânica	80
3.3.1.3 Determinação do teor relativo, em massa, de hidróxido de cálcio e pozolana na reação pozolânica	81
3.3.1.4 Estimativa da quantidade de CH disponível no agregado reciclado cimentício (Cim).....	82
3.3.1.5 Determinação dos teores de cal e pozolana nas misturas estudadas	83
3.3.1.6 Misturas estudadas	83
3.3.2 Compactação.....	84
3.3.3 Composição granulométrica das misturas	85
3.3.4 Considerações acerca da metodologia e dos ensaios relativos à dosagem das misturas	87

3.4 Ensaio para avaliação das reações químicas	87
3.4.1 Preparação das amostras para o ensaio: Congelamento, liofilização e moagem.....	90
3.4.2 Difração de raios X (DRX)	91
3.4.3 Termogravimetria (TG)	93
3.4.3.1 Determinação do volume de hidratos produzidos nas misturas com a evolução da cura	95
3.4.4 Discussões dos resultados dos ensaios para avaliação das reações ocorridas	97
3.5 Avaliação do empacotamento	99
3.5.1 Estimativa da diminuição da porosidade com o aumento do volume de hidratos produzidos pelas reações químicas de hidratação e pozolânica	101
3.5.2 Discussões dos resultados relativos ao empacotamento das misturas estudadas	102
3.6 Ensaio para avaliação do comportamento mecânico	104
3.6.1 Resistência à compressão simples.....	104
3.6.2 Módulo de resiliência	106
3.6.3 Deformação permanente	113
3.6.4 Discussões dos ensaios mecânicos	117
3.7 Análise conjunta dos resultados dos ensaios químicos, do empacotamento e dos ensaios mecânicos.....	118
4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	125
4.1 Conclusões	125
4.2 Recomendações para pesquisas futuras	130
REFERÊNCIAS.....	131
APÊNDICE A - DIFRATOGRAMAS E TERMOGRAMAS	140
APÊNDICE B – ESTIMATIVA DE VOLUME DE HIDRATOS PRODUZIDOS PELAS REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO E DIMINUIÇÃO DAS POROSIDADES	167

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO TEMÁTICO

Atualmente a questão do gerenciamento adequado de todos os tipos de resíduos sólidos tem sido uma preocupação mundial, tanto que em alguns países essa prática é tratada como lei.

A Comunidade Européia, por exemplo, regulamenta o gerenciamento de seus resíduos por meio da Diretiva 2008/98/CE (EUROPEAN UNION, 2008), que estabelece que cada um dos países membros tenha um plano de gerenciamento de seus resíduos sendo uma importante recomendação a necessidade de se agregar valor ao resíduo, seja pelo reaproveitamento ou pela reciclagem.

No Brasil, embora o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos ainda encontre obstáculos, a Lei nº 12.305 sancionada em 2010 e atualizada em 2012 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012) que, entre outras ações, estabelece a necessidade da existência de um Plano Nacional de Resíduos Sólidos, elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente, que está em fase de consulta pública e contemplará os diversos tipos de resíduos gerados, as alternativas de gestão e gerenciamento destes resíduos, programas, projetos e ações correspondentes (BRASIL, 2011).

Dentre os diversos tipos de resíduos gerados estão os de construção civil, ou resíduos de construção e demolição, cuja geração nacional vem aumentando ano a ano, impulsionada pelo crescimento da economia que promoveu maior desenvolvimento das cidades e uma conseqüente aceleração na indústria da construção civil.

Segundo a ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Coleta de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2008; 2012), em 2007 a coleta de resíduos sólidos de construção e demolição no país era de 72.597 toneladas/dia, cerca de 26,5 milhões de toneladas/ano. Em 2012 esse número chegou a 112.248 toneladas/dia o que representa aproximadamente 41 milhões de toneladas/ano, um aumento de 54% em apenas cinco anos.

Dentre os possíveis usos para este resíduo, o mais comum é em camadas de pavimentos, uma vez que envolve volumes expressivos de resíduos. Especificamente, sua aplicação tem sido em camadas de base e sub-base de pavimentos, que desde 2004 é regulamentada por normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004a; 2004b).

Outro tipo de resíduo com potencial para uso em pavimentação é o resíduo da indústria de cerâmica vermelha, principalmente em locais onde há a concentração de empreendimentos produtores (olarias artesanais ou indústrias), pois, apesar dos esforços em controlar seus procedimentos e padronizar os produtos, sofrem com perdas ao longo do processo produtivo que, segundo Dias (2004) podem variar entre 3 e 30% das unidades de produtos acabados (por exemplo: tijolos, blocos, telhas, etc.)

De acordo com dados da ANICER (2012)¹, a produção anual no país chega a 63 bilhões de peças, sendo que 48 bilhões são de tijolos e blocos cerâmicos. Considerando que nesta produção ocorra a perda de 3% das unidades e que a massa do tijolo mais comumente utilizado (tijolo tipo “baiano”) é, em média, 1,5 kg, a massa de resíduo de tijolos de cerâmica vermelha gerado no Brasil é aproximadamente 2,1 milhões de toneladas/ano.

Quando as perdas ocorrem antes da queima, os produtos extrudados podem ser reprocessados, porém quando ocorrem após a queima, as peças defeituosas não apresentam, até o momento, um aproveitamento em larga escala. Esse resíduo, em geral, é descartado junto aos empreendimentos cerâmicos sendo empregado, às vezes, no cascalhamento das vias de acesso e no interior destes empreendimentos.

Artefatos de cerâmica vermelha, principalmente os tijolos cerâmicos produzidos em olarias, podem ser considerados uma pozolana artificial, dada a semelhança durante a produção de ambos os materiais, ou seja, pela queima num intervalo de temperatura que varia entre 600°C e 800°C, temperatura que cria instabilidade interna dos argilominerais favorecendo o aumento da porosidade das partículas e aumentando sua superfície ativa (BARONIO e BINDA, 1997).

¹ Disponível em:

<<http://www.anicer.com.br/index.asp?pg=institucional.asp&secao=3&categoria=60&selMenu=3>>. Acesso em: 10 out. 2012.

Por definição, pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, porém, quando finamente moídos e na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentantes (ABNT, 1992).

Sabe-se, ainda, que no resíduo de construção e demolição há quantidade significativa de materiais de natureza cimentícia que, por sua vez, apresentam em sua composição hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento, além de partículas de cimento não hidratado.

Com o aproveitamento em conjunto do resíduo de construção e demolição de origem cimentícia e do resíduo de cerâmica vermelha, surge a ideia de concepção desta tese: produzir misturas que empreguem agregados reciclados obtidos a partir de ambos os resíduos por meio de dosagens visando a estabilização destas misturas pelo aproveitamento do potencial químico existente na fração fina destes agregados reciclados.

Sendo assim, estas dosagens servirão para que sejam feitas combinações que aproveitem o potencial pozolânico existente no resíduo de cerâmica vermelha e a possibilidade de ocorrência de cimentação residual existente no resíduo cimentício.

1.2 OBJETIVO DA TESE

1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal desta tese é o de produzir misturas de agregados reciclados cimentício e de cerâmica vermelha, estabilizadas pelo potencial de reatividade química presente nos finos destes materiais para o desenvolvimento de reações de cimentação, que podem ocorrer tanto por hidratação do cimento anidro remanescente existente no resíduo cimentício, como por reação pozolânica promovida pelo resíduo de cerâmica vermelha.

Com isso pretende-se obter misturas que apresentem maior estabilidade e comportamento mecânico capaz de resistir às solicitações impostas às camadas de pavimentos.

1.2.2 Objetivos secundários:

- a) Verificar se realmente existem partículas de cimento anidro no agregado reciclado cimentício que possibilitem a ocorrência de reações de hidratação capazes de influenciar de forma significativa o comportamento mecânico deste material.
- b) Verificar se ocorrem reações químicas de cimentação nas misturas obtidas pelas dosagens propostas, e se estas reações proporcionam a estabilização destas misturas.
- c) Verificar qual efeito contribui mais para a estabilização das misturas obtidas pela dosagem: se o efeito químico, obtido pelas reações de hidratação do cimento anidro e reações pozolânicas, ou se o efeito físico obtido pelo arranjo de partículas (empacotamento).

1.3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta tese inicialmente foram efetuadas as coletas dos resíduos cimentício e de cerâmica vermelha, sendo o primeiro proveniente da demolição de dois edifícios no município de São Paulo e o segundo de olarias localizadas na região de Cabreúva/SP.

Os resíduos passaram, então, por processo de britagem para o beneficiamento granulométrico e, assim, produzir os agregados reciclados propriamente ditos.

De posse dos agregados reciclados foram realizadas dosagens que tiveram como principal objetivo a obtenção de misturas nas quais todo o potencial de reatividade química dos finos dos agregados reciclados fosse aproveitado, para isso

foram concebidas misturas que empregaram também adições de aglomerantes hidráulicos dos tipos cal CH-I e cimento Portland.

Estas misturas passaram por ensaios químicos para verificação da ocorrência das reações de cimentação esperadas, e por ensaios mecânicos para verificar de que forma a ocorrência destas reações influenciou o comportamento destas misturas.

Além disso, foi feita uma avaliação do empacotamento para verificar se, além das reações químicas, a melhora no comportamento mecânico das misturas em estudo poderia apresentar influência do arranjo físico dos grãos que as constituem.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O texto da tese está dividido em quatro capítulos, descritos de forma sucinta, a seguir.

O presente **Capítulo 1 – Introdução** apresenta o enquadramento temático do assunto, demonstrando a necessidade de se buscar usos alternativos para o consumo do resíduo de construção e demolição e do resíduo de cerâmica vermelha, dado o elevado volume gerado destes materiais e da possibilidade do uso destes resíduos em camadas de pavimentos. São apresentados, ainda, a metodologia empregada e os objetivos principal e secundários que se pretendem atingir ao final da pesquisa.

O **Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica** apresenta, inicialmente, um panorama geral do uso do agregado reciclado de construção e demolição descrevendo alguns dos conceitos relacionados a este tipo de material, em seguida, o texto é direcionado para a sua utilização em pavimentos, indicando a normalização encontrada e algumas das experiências nacionais e internacionais realizadas, aproximadamente, nos últimos dez anos. Na sequência é apresentada uma fundamentação teórica sobre o potencial de reatividade química dos finos dos agregados reciclados cimentícios e de cerâmica vermelha, na qual são revistos conceitos sobre as reações químicas de hidratação do cimento e pozolânica. Apresenta-se, também, um item a respeito das misturas estabilizadas com aglomerantes hidráulicos para o

uso em pavimentação, no qual são descritos, sucintamente, os princípios básicos de dosagem e o comportamento esperado destas misturas. E, por fim, é feita uma revisão dos conceitos sobre a teoria do empacotamento de partículas, apresentando uma adaptação destes conceitos para o uso em materiais granulares empregados em pavimentação.

O **Capítulo 3 – Programa experimental: materiais, métodos, resultados e discussões**, apresenta a descrição detalhada de todo o experimento realizado para o desenvolvimento da pesquisa, com a origem dos materiais, os procedimentos e os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, análise química e avaliação de comportamento mecânico, realizados nos materiais individuais e nas misturas estudadas, bem como os seus respectivos resultados. Apresenta-se, também, a metodologia detalhada para dosagem das misturas cujas combinações potencializam às reações químicas ocorridas nos finos dos agregados reciclados. No decorrer do capítulo são apresentadas, ainda, as análises e discussões dos resultados obtidos em todos os ensaios realizados.

O **Capítulo 4 – Conclusões e recomendações para pesquisas futuras** apresenta as conclusões obtidas no desenvolvimento desta tese e algumas recomendações para pesquisas futuras, complementares a esta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agregado reciclado de resíduo de construção e demolição

O agregado reciclado de resíduo de construção e demolição (RCD) é o agregado obtido a partir da reciclagem dos resíduos sólidos provenientes da construção civil que, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Ministério do Meio Ambiente, 2011) são os resíduos gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para estas obras.

A Resolução CONAMA n° 307 (2002), alterada pela Resolução CONAMA N°348 (2004), estabelece uma classificação para os resíduos de construção civil, conforme descrito a seguir:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados provenientes de construções, demolições, reformas e reparos de pavimentação, edificações e peças pré-moldadas em concreto.
- Classe B: São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros e outros.
- Classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação.
- Classe D: são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tinta, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolição, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Os materiais enquadrados na classe A são os que, depois de reciclados, vão dar origem aos agregados passíveis de serem empregados como material para o uso em camadas de pavimentos e para concretos.

Como os resíduos de construção e demolição são também constituídos por materiais enquadrados nas outras classes da Resolução (por exemplo: madeiras,

gesso, metais, vidros, etc.) é importante a prática de um gerenciamento efetivo nas fontes geradoras, com uma triagem eficiente dos materiais, pois isto além de otimizar o trabalho nas recicladoras facilitará a destinação e reciclagem dos outros materiais.

Outra consideração importante é que a separação dos materiais pertencentes à classe A possibilita selecionar as melhores aplicações para cada tipo de resíduo, pois o agregado reciclado de um resíduo constituído apenas por concretos e argamassas certamente apresentará comportamento mecânico diferente de outro constituído pela mistura dos materiais (resíduo misto).

Pesquisadores de vários países, inclusive do Brasil, têm desenvolvido estudos para avaliar o comportamento destes materiais individualmente e os resultados destas pesquisas indicam que a reciclagem dos materiais separadamente (concreto, cerâmica, etc.) é uma alternativa viável quando são necessárias características específicas como, por exemplo, maiores resistências e rigidez, quando comparadas ao agregado reciclado do resíduo misto.

Uma das possibilidades para obtenção de maiores resistência é a estabilização química do agregado reciclado que pode ser feita por adição de aglomerantes hidráulicos ou pelo aproveitamento do potencial de reatividade química existente na fração fina, que podem produzir cimentação residual ou reação pozolânica.

Isso ocorre porque a fração fina dos agregados reciclados possui partículas de cimento anidro que, durante a britagem do resíduo, têm sua superfície novamente exposta, possibilitando a ocorrência de sua hidratação. Além disso, a cerâmica vermelha, que também pode estar presente nesta fração, é um material que possui características de pozolanas, ou seja, material silicoso ou silicoaluminoso, capaz de produzir compostos cimentantes quando combinado com hidróxido de cálcio e água.

Baronio e Binda (1996) atestaram a ocorrência de reatividade pozolânica em resíduos de tijolos cerâmicos quando moídos, o que demonstra a possibilidade do uso desse tipo de material em substituições parciais dos teores de cimento e cal em argamassas e concretos.

Em outro estudo, conduzido em argamassas com substituição parcial do cimento por tijolo cerâmico moído, Lin *et al.* (2010) verificaram a ocorrência de atividade pozolânica com índices de 107% aos 28 dias (ASTM C 311) e aumento da resistência à compressão quando comparadas à argamassa sem substituição.

De acordo com Levy (2001) as argilas calcinadas em temperaturas não muito elevadas como, por exemplo, os tijolos e blocos cerâmicos de segunda linha, representam os resíduos de materiais cerâmicos com maior grau de pozolanicidade.

Nataatmadja e Tan (2001), em investigação sobre o comportamento resiliente de agregados reciclados de concreto, obtiveram resultados que indicaram comportamento semelhante aos agregados naturais, indicando o potencial de utilização deste agregado reciclado para o uso em camadas de pavimentos em substituição aos agregados naturais.

Em pesquisa realizada em camadas de base e sub-base de pavimentos, em campo e em laboratório, verificou-se que, com o passar do tempo, o módulo de resiliência das camadas que empregaram agregado reciclado de concreto aumentou, o que não ocorreu em camadas que empregaram agregados naturais (Arm, 2001).

2.1.1 Uso em pavimentação: Normas e experiências

No Brasil existem poucas normas que especifiquem agregados reciclados para o uso em pavimentação. As que têm alcance nacional são as duas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), citadas a seguir:

- NBR 15115 (ABNT, 2004a) – Agregados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos; e
- NBR 15116 (ABNT, 2004b) - Agregados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos.

Anteriormente à publicação das normas da ABNT, a Prefeitura Municipal de São Paulo publicou uma especificação técnica de serviço relacionada ao assunto,

denominada PMSP/SP ETS 001/2003 – Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. Esta especificação estabelece requisitos semelhantes aos estabelecidos pela NBR 15115 (ABNT, 2004a), relativos às características e propriedades do agregado reciclado para o uso em pavimentos, porém é um pouco mais rígida, como pode ser observado no comparativo apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do agregado reciclado para aplicação em camadas de pavimentos conforme as normas ABNT NBR 15115:2004 e PMSP/SP ETS 001/2003

Requisitos	Especificação	
	ABNT	PMSP
Coeficiente de curvatura (Cc)	Não há	1 a 3
Coeficiente de uniformidade (Cu)	≥ 10	≥ 10
% passada na peneira de abertura 0,42mm (n°40)	10% a 40%	10% a 30%
Reforço do subleito: ISC (energia normal) ^(a) expansão	12% 1%	12% 1%
Sub-base: ISC (energia intermediária) expansão	20% 1%	20% 1%
Base: ^(b) ISC (energia modificada) expansão	60% 0,5%	60% 0,5%
% de grãos lamelares	≤ 30%	≤ 30%
diâmetro máximo nominal	63,5 mm	50 mm

^(a) ISC – Índice de Suporte Califórnia

^(b) Ambas as especificações mencionam que só é permitido o uso como material de base em vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 80kN no período de projeto.

Com base nas experiências com o uso de agregado reciclado de resíduos sólidos de construção e demolição para camadas de pavimentos, principalmente dos últimos dez anos, cabem algumas críticas a respeito das indicações da NBR 15115 (ABNT, 2004a).

A primeira delas é quanto à energia de compactação recomendada, as experiências mostram que este tipo de material sofre com a quebra durante o processo de compactação e que quanto maior a energia empregada mais significativa é esta quebra (LEITE, 2007; MOTTA, 2005).

Por esse motivo, considera-se mais apropriada a utilização de energia modificada que possibilita a efetivação da quebra dos grãos na execução, minimizando o risco de que isto ocorra durante a vida de serviço do pavimento o que pode gerar deformações da camada. Além disso, a maior energia de compactação possibilita o aumento de rigidez da mesma (FERNANDES, 2004; LEITE, 2007),

As experiências também mostraram que grãos de maiores diâmetros são mais suscetíveis à quebra pela compactação, com isso a adoção de diâmetros máximos nominais abaixo do indicado pela NBR 15115 (ABNT, 2004a), por exemplo, de 50 mm como indicado pela especificação da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP, 2003) ou de 25 mm como empregado neste trabalho, parece mais apropriada, pois desta forma a ocorrência de quebra será menor e a granulometria prevista inicialmente sofrerá alterações menos significativas durante a aplicação da camada.

Na revisão da literatura, foram encontradas poucas normas e especificações internacionais que estabelecem as características necessárias para agregados reciclados de resíduos sólidos de construção e demolição para camadas de pavimentação, as quais são listadas a seguir:

- Especificação Técnica do Estado de Victória – Austrália (*Road Authority of Victoria*) – Seção 820 (2011) - *Crushed concrete for pavement subbase and light duty base.*
- Especificação Técnica do Estado de Victória – Austrália (*Road Authority of Victoria*) – Seção 821 (2011) - *Cementitious treated crushed concrete for pavement subbase.*
- U.S. Department of Transportation - *Federal Highway Administration (FHWA) Technical Advisory T5047.37 (2007) - Use of recycled concrete pavement as aggregate in hydraulic-cement concrete pavement.*
- Especificação Técnica do Departamento de Transportes de Minnesota (2005) – 3138: *Aggregate for surface and base course.*
- Norma Britânica – BS 6543 (1985) – *Guide to use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering.*

Motta (2005) e Leite (2007) citam ainda as seguintes especificações:

- Especificação Técnica Holandesa – *Standaard RAW bepalingen (1995): stichting centrum voor regelgeving en onderzoek in de Grond-, Water- en Wegbouw en de Verkeerstechniek.*
- Especificação Técnica Alemã – TL RC-TOB (1995): *Tecnischen Lieferbedingungen für Recyclingbaustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel.*

O principal uso para os agregados reciclados é em camadas de sub-bases e bases de pavimentos dado o elevado volume de material que estas obras consomem.

No Brasil a primeira experiência que se tem notícia com a utilização de resíduo de construção civil como material para camada de pavimento, foi no ano de 1984, em uma via urbana na zona oeste do município de São Paulo (SP), cuja aplicação foi realizada em uma parceria entre o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e a Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP). À época o desempenho foi considerado satisfatório (BODI *et al.*, 1995).

Durante a década de 90 e início dos anos 2000 muitos estudos foram realizados no Brasil com vistas ao uso de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para pavimentação (por exemplo: KRYCKYJ e TRICHÊS, 1999; CARNEIRO *et al.*, 2001; RIBEIRO *et al.*, 2002), porém nesta revisão bibliográfica serão citadas algumas pesquisas desenvolvidas nos últimos dez anos.

Fernandes (2004) estudou o comportamento mecânico de agregados reciclados provenientes dos municípios de Belo Horizonte (MG) e Rio de Janeiro (RJ) para camadas de base e sub-base de pavimentos e verificou a viabilidade do emprego desse material para esta finalidade. Uma das constatações da pesquisa foi que, nos materiais estudados, a energia de compactação e a composição granulométrica tiveram pouca influência no resultado do módulo de resiliência, mas o tipo de resíduo que deu origem ao agregado reciclado, misto ou de concreto, influenciou de maneira mais significativa a variação destes resultados. Os agregados reciclados de resíduo de concreto apresentaram módulos de resiliência mais elevados que os reciclados de resíduo misto.

No ano de 2004 foi construído um trecho experimental no município de Goiânia (GO) empregando mistura de solo e agregado reciclado nas camadas de base e sub-base, numa via com tráfego considerável de caminhões, por se tratar de um acesso à central de abastecimento do município. A construção deste trecho contribuiu para a constatação da viabilidade de se aplicar agregados reciclados em camadas de pavimentos flexíveis (MENDES et al., 2004).

Motta (2005) estudou em laboratório o comportamento de agregados reciclados mistos *in natura* e com adição de aglomerantes para avaliação de comportamento mecânico. Nesta pesquisa foram avaliados agregados reciclados mistos *in natura* às idades de 0 (zero) dias (ensaio após 4 dias de imersão, conforme recomendado pela norma, sem ser submetido a cura), 28, 90 e 180 dias, e verificou que os valores do índice de suporte Califórnia (ISC) aumentaram com o tempo de cura, sendo este aumento mais significativo aos 90 dias com valores de ISC médio passando de 75% sem cura, para 120% após 90 dias de cura.

Também para o módulo de resiliência, Motta (2005) constatou um aumento dos resultados em ensaios sobre corpos de prova submetidos à cura de 0, 28, 90 e 180 dias, sendo esse aumento mais significativo no intervalo de 28 a 90 dias. Empregando, por exemplo, uma tensão confinante (σ_3) de 0,227 MPa e uma tensão desvio (σ_d) de 0,200 MPa, obteve-se um aumento do módulo de resiliência de 8% aos 28 dias e de mais 39% de 28 a 90 dias de cura, com um aumento acumulado de 51% no período de 0 a 180 dias. O aumento na capacidade de suporte e a diminuição na deformabilidade foram atribuídos a uma indicação da ocorrência de atividade pozolânica no material, mesmo sendo na condição *in natura*, demonstrando que o agregado reciclado pesquisado ainda possuía partículas com potencial reativo.

Leite (2007) estudou o comportamento mecânico destes agregados em camadas de base e sub-base de pavimentos, tendo como estudo de caso um trecho de aproximadamente 1000 m no sistema viário do campus da USP na zona leste do município de São Paulo (USP-leste). A partir de ensaios de laboratório e campo e análises mecanicistas de diferentes seções de pavimentos empregando o agregado reciclado, uma das constatações da pesquisa foi que a energia de compactação tem influência considerável no comportamento mecânico do material, pois esse sofre

com a quebra durante a compactação e tende a estabilizar-se com o emprego de energias de compactação mais elevadas.

Outra conclusão importante da pesquisa de Leite (2007) foi que os métodos convencionais de controle de execução de camadas granulares de pavimentos (massa específica aparente seca - ρ_d ; umidade ótima - $w_{ótima}$) não são suficientes para o controle tecnológico do agregado reciclado, pois esse tipo de material, além de apresentar grande variabilidade de natureza, ainda sofre alteração na graduação pela quebra durante a compactação. Por esse motivo, além do controle pelos parâmetros convencionais recomendados por norma, é importante que seja realizado um controle por métodos deflectométricos (por exemplo: LWD - *Light Weight Deflectometer*, FWD - *Falling Weight Deflectometer*) para análise da estrutura como um todo.

Ricci (2007) pesquisou o uso de agregados reciclados mistos na produção de misturas do tipo concreto compactado com rolo (CCR) para uso em camadas de pavimentos rígidos e flexíveis e observou que essa mistura, quando comparada ao CCR produzido com agregados naturais, não apresentou variação importante com relação às resistências obtidas, porém o módulo de elasticidade diminuiu significativamente com o uso dos agregados reciclados empregados na pesquisa.

No âmbito internacional, em pesquisa conduzida por Poon et al. (2006), na qual foram realizados ensaios físicos e químicos em frações finas de um agregado reciclado proveniente de uma planta comercial de resíduos de construção e demolição localizada em Hong Kong, foi verificado que as frações menores que 0,15mm e entre 0,3 e 0,6mm, são as principais responsáveis pelo desenvolvimento de cimentação residual nos finos do agregado reciclado, ou seja, essas frações produzem auto-cimentação com o passar do tempo. Os autores ressaltam ainda que, no caso do estudo, esse efeito no agregado reciclado como um todo é mínimo, ficando limitado a quantidade empregada destas frações.

Wu et al. (2009) estudaram o uso de agregados reciclados de tijolos e concreto estabilizados com cimento, cal e cinza volante, para camadas de pavimentos e os resultados de desempenho mecânico obtidos mostraram que estes materiais apresentam comportamento adequado para esta finalidade. Neste mesmo estudo foram executados três trechos experimentais usando o agregado reciclado

de tijolo e concreto estabilizado com diferentes teores de cimento, cal e cinza volante, como camada de base do pavimento de uma via na cidade de Cangzhou (China) e, após dois anos de uso, o pavimento ainda permanecia em boas condições.

Vegas et al. (2011) obtiveram resultados indicativos de que a presença combinada de concreto e materiais cerâmicos no agregado reciclado induz a ocorrência de reação pozolânica, contribuindo para o aumento da capacidade de suporte da camada de pavimento executada com agregados reciclados. Outra verificação deste estudo foi a existência de propriedade hidráulica remanescente do cimento existente no concreto do agregado reciclado, o que também pode contribuir para o aumento da capacidade de suporte.

Cerni et al. (2012) estudaram uma mistura de agregado reciclado proveniente de uma planta localizada na região da Umbria (Itália) para avaliação do comportamento à deformação permanente por ensaios triaxiais de carregamentos cíclicos. Os resultados mostraram que a mistura de agregados reciclados apresentou menor acúmulo de deformação permanente quando comparada a dois outros materiais granulares naturais.

Em pesquisa realizada por Xuan (2012) foram estudadas misturas de agregados reciclados de concreto e alvenaria tratados com cimento, com o objetivo de desenvolver e propor modelos de previsão das propriedades mecânicas destas misturas. Ao final da pesquisa o autor propôs modelos que podem auxiliar na dosagem deste tipo de material, bem como no dimensionamento de pavimentos que o empreguem como camada.

2.2 Estabilização de misturas de agregado reciclado cimentício e de cerâmica vermelha por ativação de finos

O agregado reciclado cimentício (Cim) possui dois materiais residuais que apresentam potencial para o desenvolvimento de maiores resistências. O primeiro deles é o cimento anidro existente no concreto que originou este resíduo, cuja britagem possibilitou a formação de material fino gerando maior quantidade de

superfície específica e, conseqüentemente, aumentando o potencial hidráulico deste material.

O segundo é a portlandita (Ca(OH)_2) resultante da reação de hidratação do cimento empregado na produção do concreto que gerou o agregado reciclado. Esta portlandita, quando combinada com um material pozolânico e na presença de água, irá promover a ocorrência de reação pozolânica formando maior quantidade de produtos hidratados.

Já o agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv), quando britado, tem em sua fração fina ($< 0,15$ mm) desempenho de material pozolânico, uma vez que é produzido de maneira semelhante às pozolanas artificiais (BARONIO e BINDA, 1996).

Dessa forma, a mistura entre Cim e Cv possibilita a ocorrência de reação pozolânica. Além disso, pode-se fazer uma combinação com uma cal hidratada comercial, por exemplo, para maior eficiência desta reação.

Assim pode-se dizer que a ativação dos finos do agregado reciclado cimentício (Cim), se dá pela cominuição e britagem utilizada para produzi-lo que aumenta a sua área específica possibilitando a ocorrência da hidratação do cimento anidro residual. No caso do agregado reciclado de cerâmica vermelha esta ativação se dá pela mistura com hidróxido de cálcio e água para que ocorra a produção de compostos cimentantes pela reação pozolânica. Os itens 2.2.1 e 2.2.2 apresentam uma revisão dos conceitos ligados às duas reações citadas.

2.2.1 Reação de hidratação do cimento

O cimento Portland é composto, basicamente, de clínqueres, sulfatos de cálcio e adições minerais. Sua fabricação consiste, em linhas gerais, na moagem do clínquer Portland, com adição, durante a moagem, de sulfato de cálcio (gipsita) e de outros materiais admitidos pelas especificações (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Taylor (1990), o cimento Portland é constituído por quatro fases distintas conhecidas como alita, belita, fase aluminato e fase ferrita. A alita, que constitui cerca de 50 a 70% do clínquer, é formada por silicato tricálcico

(Ca_3SiO_5), também chamado de C_3S . A belita, que constitui de 15 a 30% do clínquer, é formada por silicato dicálcico (Ca_2SiO_4), também chamado de C_2S , que se apresenta de maneira predominante pelo polimorfo β , sendo denominado então como $\beta\text{C}_2\text{S}$. A fase aluminato constitui de 5 a 10% do clínquer é formada por aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), também conhecido como C_3A , e a fase ferrita que constitui de 5 a 15% do clínquer, é formada por ferro-aluminato tetracálcico ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$), também conhecido como C_4AF .

Como citado em Mehta e Monteiro (2008), o cimento Portland anidro não possui propriedades adesivas, só as adquirindo quando misturado à água. Isso só ocorre porque a reação química do cimento com a água, denominada hidratação do cimento, resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento.

Para a química do cimento, o termo hidratação representa a totalidade das mudanças que ocorrem quando um cimento anidro ou uma de suas fases constituintes se misturam com a água (TAYLOR, 1990).

Embora o cimento Portland seja uma mistura heterogênea de vários compostos, nem todos se hidratam à mesma velocidade. Os aluminatos apresentam velocidades de hidratação muito maiores do que os silicatos, sendo as características de pega de uma pasta amplamente determinadas por reações de hidratação envolvendo os aluminatos. Já os silicatos, que compõem cerca de 75% do cimento Portland comum, têm papel dominante na determinação das características de endurecimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Neville (1997), os produtos de hidratação do cimento são os mesmos da hidratação de seus componentes individuais, em condições similares, com a ressalva de que os produtos de reação podem interagir entre si ou com outros componentes do sistema.

Os dois silicatos de cálcio (C_3S e $\beta\text{C}_2\text{S}$) são os componentes mais importantes, e o comportamento físico do cimento durante a hidratação é semelhante ao desses dois compostos isolados. Assim, pode-se dizer que o principal composto do cimento hidratado é o silicato de cálcio hidratado (NEVILLE, 1997).

A fase silicato de cálcio hidratado, abreviada para C-S-H, constitui cerca de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, sendo responsável pela alta resistência mecânica à compressão da mesma (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Outra característica importante do processo de hidratação do cimento refere-se ao fato das partículas de cimento hidratado aderirem firmemente às partículas ainda não hidratadas e, embora não se saiba exatamente como isso acontece, a diminuição da velocidade de hidratação durante o passar do tempo possibilita que, mesmo após longos períodos, ainda se possa encontrar na pasta uma quantidade significativa de cimento anidro (NEVILLE, 1997).

Embora a maior parte do cimento hidratado seja os silicatos hidratados (C-S-H), para o melhor entendimento das alterações ocorridas durante o processo de hidratação, é interessante discutir as reações de hidratação dos aluminatos e silicatos individualmente.

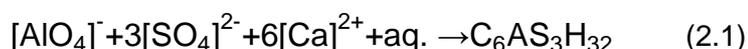
Hidratação dos aluminatos

Segundo Mehta e Monteiro (2008), é conveniente discutir a hidratação dos aluminatos juntamente com os ferroaluminatos, pois quando esse último reage com água na presença do sulfato, os produtos formados vão apresentar estrutura semelhante àquelas formadas na hidratação do C_3A . A reatividade da fase ferrita é geralmente mais lenta que a da fase aluminato, porém cresce com a diminuição da temperatura de formação durante a clinquerização. Apesar disto, a reação de hidratação descrita para os aluminatos se aplica também para os ferroaluminatos (fase ferrita), embora por simplificação sejam abordados apenas os aluminatos.

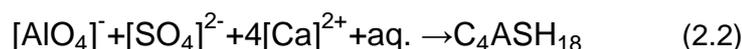
Como a reação do C_3A com a água é imediata, é necessário que seja adicionada gipsita para desacelerar esta reação. Uma das teorias que explica esse papel de retardo desempenhado pela gipsita define que isto ocorre porque a gipsita e os álcalis entram em solução rapidamente e a solubilidade do C_3A é diminuída pela presença de íons hidroxila, sulfato e álcalis. Dependendo da concentração de aluminato e íons sulfato na solução, o produto cristalino da precipitação pode ser trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou monossulfoaluminato de cálcio hidratado.

Nas soluções saturadas com íons cálcio e hidroxila será formado o trissulfoaluminato de cálcio hidratado que se cristaliza como pequenas agulhas prismáticas e também pode ser chamado de alto-sulfato ou, por definição mineralógica, etringita. O monossulfato também é chamado de baixo sulfato e se cristaliza como finas placas hexagonais. As reações químicas destes produtos podem ser expressas como apresentado nas equações químicas 2.1 e 2.2 (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

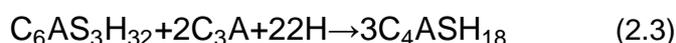
Etringita:



Monossulfato:



De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a etringita, geralmente, é o primeiro hidrato a se cristalizar, devido à elevada relação sulfato/aluminato na fase aquosa no início da hidratação. Após o sulfato ter sido consumido, quando a concentração de íons alumínio volta a se elevar como consequência da nova hidratação de C₃A e C₄AF, a etringita se torna instável e é gradualmente convertida em monossulfato (equação química 2.3).



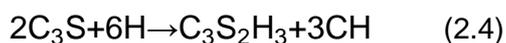
Hidratação dos silicatos

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a hidratação do C₃S e βC₂S produz uma família de silicatos de cálcio hidratados que são estruturalmente semelhantes, mas que variam na relação cálcio/silica e no teor de água combinada. Como o que

interfere nas propriedades são as estruturas, as diferenças entre a família de silicatos de cálcio hidratados têm pouco efeito em suas características físicas.

Considerando, ainda, que a composição química dos silicatos de cálcio hidratados nas pastas de cimento varia com as relações água/cimento, com a temperatura e com a idade de hidratação, refere-se comumente a estes hidratos como C-S-H, notação que não implica em uma composição química fixa.

Após a hidratação completa, a composição aproximada do material é $C_3S_2H_3$; essa composição é a utilizada para cálculos estequiométricos. As reações estequiométricas para as pastas de C_3S e βC_2S são expressas conforme as equações químicas 2.4 e 2.5, respectivamente (MEHTA E MONTEIRO, 2008).



2.2.2 Reação pozolânica

Segundo a norma NBR 12653 (ABNT, 1992), as pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que sozinhos possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, porém quando finamente moídos e na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentantes.

Os materiais pozolânicos podem ser divididos em naturais e artificiais. As pozolanas naturais são aquelas de origem vulcânica ou sedimentar; e as artificiais são as resultantes de processos industriais e/ou tratamentos térmicos, como, por exemplo, as cinzas volantes (*fly ash*) e as argilas calcinadas. Ao considerar o uso de pozolanas, deve-se notar que a sílica deve ser amorfa, pois a forma cristalina apresenta baixa reatividade (NEVILLE, 1997).

De acordo com Massaza (1993), as pozolanas são formadas por fases “ativas”, capazes de reagir com a cal, e por fases “inertes” que são pouco ou nada sensíveis a esta ação.

Durante a hidratação do cimento seus constituintes reagem com a água formando as fases presentes na pasta endurecida. A parte que não hidrata do cimento forma os cristais de hidróxido de cálcio (portlandita) que são frágeis e constituem cerca de 20 a 25% do volume de produtos hidratados que, ao contrário do C-S-H, não contribuem potencialmente para a resistência mecânica da pasta endurecida. Além disso, a presença destes cristais no cimento Portland tem um efeito desfavorável sobre a resistência química às soluções ácidas, em função de sua alta solubilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Com a introdução da pozolana, essa vai reagir com o hidróxido de cálcio formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A esta reação dá-se o nome de reação pozolânica que, segundo Rao (2003), pode ser expressa de forma simplificada pela equação química 2.6.



Esta reação não altera a hidratação do cimento, mas ocorre de forma a complementar esse processo, resultando em menor quantidade de portlandita e maior quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Com a adição da pozolana, outros fatores importantes vão ocorrer, tais como a diminuição do calor de hidratação, aumento da taxa de hidratação e diminuição da permeabilidade da pasta (MASSAZA, 1993).

Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que um dos fatores positivos da reação pozolânica é a ocorrência de consumo do hidróxido de cálcio, ao invés de sua produção, o que representa uma contribuição para resistência da pasta endurecida quando em contato com meios ácidos.

Com respeito às interações físicas, a reação pozolânica caracteriza-se, principalmente, pela alteração da microestrutura da pasta ao longo do tempo, primordialmente pelo refinamento do tamanho dos poros, o que repercute sobre várias propriedades da pasta no estado endurecido como, por exemplo, a melhora da impermeabilidade do sistema (HOPPE FILHO, 2008; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Com relação aos produtos gerados pela reação pozolânica, pode-se dizer que são semelhantes aos da hidratação do cimento Portland, as diferenças existentes são mínimas e, em geral, mais afetadas pela quantidade do que pela natureza das fases envolvidas (MASSAZA, 1993).

Segundo Massaza (1993), na reação das pozolanas naturais com a cal são formados silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), podendo também ocorrer, em menor quantidade, a formação de aluminatos de cálcio hidratados. A variação da relação cálcio/sílica encontrada no C-S-H dependerá do tipo de pozolana e da temperatura de cura.

No caso de pozolanas do tipo cinza volante, os produtos formados são o C-S-H, C_4AH_{13} e C_2SAH_8 , e se os silicoaluminatos da cinza volante contiverem sulfatos, também ocorrerá a formação da etringita.

Quando se utilizam argilas calcinadas, os produtos da reação pozolânica são, geralmente, a gellenita hidratada (C_4AH_8), o C-S-H e pequenas quantidades de aluminato de cálcio hidratado (MASSAZA, 1993).

2.3 Materiais estabilizados com aglomerantes hidráulicos para uso em camadas de pavimentos

Neste trabalho, com a dosagem das misturas de agregados reciclados de concreto e de cerâmica vermelha, em função da reatividade química de seus finos, espera-se que essas apresentem um comportamento mecânico semelhante ao dos materiais estabilizados por aglomerantes hidráulicos (cal e cimento Portland) empregados, tradicionalmente, em camadas de bases e sub-bases de pavimentos.

Os materiais estabilizados com aglomerantes hidráulicos são aqueles que recebem adição de cimento, cal ou outro tipo de aglomerante, com a finalidade de proporcionar um acréscimo significativo na rigidez do material natural e das resistências à compressão e à tração. Os mais comumente empregados são a brita graduada tratada com cimento (BGTC), o solo-cimento, o solo melhorado com cimento e o solo-cal (BERNUCCI et al., 2006). Nos itens 2.3.1 a 2.3.3 serão descritos, de forma sucinta, os princípios básicos de dosagem e o comportamento mecânico esperado destes materiais.

2.3.1 Brita graduada tratada com cimento (BGTC)

De acordo com Balbo (1993), entende-se por brita graduada tratada com cimento (BGTC) a mistura de agregados britados, que apresentem distribuição granulométrica descontínua e bem graduada, com cimento que tem a finalidade de modificar a forma de resposta destas britas compactadas, frente às ações externas, resposta esta que passa a ser resultante não apenas da forma de contato entre seus grãos, mas também das ligações existentes entre os mesmos e a pasta de cimento endurecida.

Este tipo de material teve seu uso introduzido no Brasil no final da década de 1970 e, atualmente, tem sido bastante utilizado para vias de alto volume de tráfego. Geralmente, é empregada como material de base em pavimentos com revestimentos betuminosos, mas também pode ser utilizada como base de pavimentos intertravados ou sub-base de pavimentos de concreto (BERNUCCI et al., 2006), ou ainda como sub-base de pavimentos invertidos (SUZUKI, 1992).

As normas correntes (ABNT NBR 12261:1991; ABNT NBR 12262:1991; DER-SP, 2005b) indicam faixas granulométricas semelhantes às indicadas para a brita graduada simples (BGS), porém, no caso da BGTC, emprega-se adição de cimento na ordem de 4% em massa e tem-se como exigência o valor médio de resistência à compressão aos 7 dias dentro do intervalo de 3,5 a 8,0 MPa.

Em termos de comportamento mecânico frente às solicitações cíclicas, geralmente o módulo de resiliência destes materiais apresenta valores da ordem de 7000 MPa, aos 28 dias (BERNUCCI et al., 2006).

2.3.2 Solo-cimento

A norma DNIT 143/2010-ES (DNIT, 2010), define solo-cimento como material proveniente da mistura de solo, cimento e água, em proporções previamente determinadas por processo próprio de dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência e durabilidade.

De acordo com Bernucci et al. (2006), o solo-cimento foi largamente empregado no Brasil na década de 1960, quando as obras de pavimentação chegaram às regiões onde havia escassez de pedreiras para a produção de agregados.

A norma ABNT NBR 11798 (ABNT, 2012a) e a especificação do DER-SP (2006a) estabelecem a graduação para solos com granulometria de 100% passante na peneira de abertura de 3" (76mm), enquanto que o DNIT (2010) estabelece esse limite na peneira de abertura 2,5" (63,5mm). As especificações DER-SP (2006a) e DNIT (2010) estabelecem, ainda, valores máximos de limite de liquidez e índice de plasticidade de 40% e 18%, respectivamente. Em geral são indicadas porcentagens, em massa, para adição de cimento variando de 5 a 7% (BERNUCCI et al., 2006).

Cabe ressaltar que o solo deve apresentar certa proporção de areia, pois caso tenha elevada quantidade de argila em sua composição, vai demandar o uso de alto teor de cimento o que, além de onerar a mistura, pode gerar a ocorrência de elevado trincamento por retração (BERNUCCI et al., 2006).

De acordo com as normas e especificações correntes (ABNT NBR 12253:2012; DNIT 143/2010-ES; DER-SP, 2006a; DER-PR, 2005) a resistência à compressão do solo-cimento, deve ser de 2,1 MPa aos 7 dias, podendo chegar até 8,0 MPa, dependendo do teor de cimento e da natureza do solo empregados.

Com vistas a rigidez deste tipo de material, espera-se obter um módulo de resiliência com valores que variam desde 3000 MPa, aos 7 dias, até maiores que 10000 MPa, aos 91 dias. Aqui também dependentes do teor de cimento e do tipo de solo empregados (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.3.3 Solo melhorado com cimento

O solo melhorado com cimento, assim como o solo-cimento, é o material resultante da mistura do solo natural com o cimento, porém, segundo Balbo (2007), a distinção mais clara entre os dois materiais pode ser feita pela quantidade de cimento empregada nas misturas.

Enquanto o solo-cimento emprega teores de cimento da ordem de 7%, o solo melhorado com cimento utiliza, de acordo com recomendação da norma DNIT 142/2010-ES (DNIT, 2010), teores de cimento que variam entre 2% a 4%.

O principal objetivo do solo melhorado com cimento é conferir ao solo uma estabilização de modo a torná-lo menos expansível e menos suscetível à ação da água (BALBO, 2007).

2.3.4 Solo-cal

Solo-cal é a mistura artificial de solo com cal em proporções estabelecidas por dosagem experimental que, quando adequadamente compactada, deve apresentar estabilidade e durabilidade elevadas (DER-SP, 2006b).

Trata-se, então, de uma estabilização química que tem como objetivo melhorar as características do solo, seja pelo enrijecimento, pela melhora na trabalhabilidade ou pela redução da expansão (BERNUCCI et al., 2006).

Os efeitos da adição de cal nas propriedades do solo ocorrem por reações que podem ser divididas em duas categorias: imediatas, ou “antes da cura”, e de longo prazo, ou “após a cura” (LITTLE, 1995).

Segundo Boscov (1990), as reações imediatas ocorrem na superfície das partículas (reações iônicas), modificando as forças e arranjo entre elas. Esta modificação vai formar uma estrutura floculada na qual os microagregados se comportam como grãos, tornado o solo mais friável e trabalhável, e menos plástico, o que vai gerar um aumento no teor de umidade ótimo e uma diminuição da massa específica aparente seca máxima. As reações de longo prazo compreendem a reação pozolânica e a carbonatação, sendo esta última considerada indesejável, pois os carbonatos de cálcio e magnésio são cimentos fracos e que retardam a ocorrência da reação pozolânica, por esse motivo certos cuidados devem ser tomados para evitá-la.

De acordo com Little (1995), as reações de longo prazo são muito mais complexas e altamente influenciadas pelas condições do solo e por suas propriedades mineralógicas. Entretanto, a maioria dos solos argilosos apresenta

reatividade pozolânica e quando misturados com a cal geram um ganho significativo de resistência, devido ao desenvolvimento de uma matriz cimentada entre suas partículas.

A sílica e a alumina presentes na argila tornam-se solúveis em um meio com pH elevado: como o pH da água saturada com a cal é de 12,5 a 25°C, o sistema solo-água-cal apresenta pH alcalino suficiente para solubilizar a sílica e a alumina e possibilitar a ocorrência da reação pozolânica (LITTLE, 1995). Estes elementos solubilizados irão reagir com o cálcio presente na cal formando os silicatos, aluminatos e alumino-silicatos de cálcio hidratados que são produtos com propriedades cimentantes (BOSCOV, 1990).

A especificação do DER-SP (2006b) estabelece que o teor mínimo de cal a ser adicionado é de 3%, mas em geral são utilizados teores que variam de 4 a 10% em massa. A especificação estabelece, ainda, que a mistura deve apresentar ISC mínimo de 60% e expansão máxima de 0,5% para o uso em camadas de base, e ISC mínimo de 30% e expansão máxima de 1,0% para o uso em camadas de sub-base, sendo que em ambos os casos a energia de compactação referida é a intermediária.

Com relação à rigidez, o módulo de resiliência dependerá da natureza do solo e do teor de cal empregado, porém espera-se que este tipo de mistura apresente valores da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos para o solo-cimento.

2.4 Empacotamento das partículas

O conhecimento a respeito do empacotamento de partículas é de interesse das várias áreas da engenharia, isso porque a maior parte dos materiais, sejam eles naturais ou artificiais, são constituídos por partículas e o seu comportamento diante das solicitações às quais são submetidos dependem tanto das propriedades relativas à sua composição quanto do arranjo estrutural destas partículas.

A maioria das pesquisas a respeito do empacotamento das partículas se dá por parte da engenharia de materiais, principalmente na tecnologia de materiais cerâmicos e, mais recentemente, na engenharia civil, direcionada à tecnologia de concretos de cimento Portland.

Com isso, o maior conhecimento está concentrado aos materiais que possuem características de fluido durante a sua produção e aplicação, ou seja, as partículas sólidas ficam em suspensão durante esses processos e as características reológicas deste fluido irão influenciar na condição de arranjo final destas partículas, além das outras características, como distribuição granulométrica, forma de aplicação/compactação e morfologia dos grãos.

No caso dos materiais para pavimentação, considerando-se aqui os granulares e solos, a produção, no caso de misturas, e a aplicação são realizadas com os materiais sólidos, pois a água adicionada tem um efeito de lubrificação entre as partículas, fazendo com que estas deslizem entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto. Então, neste caso, tem-se que o arranjo final das partículas é dependente, principalmente, da distribuição granulométrica, da energia de compactação e da morfologia dos grãos.

Embora os parâmetros que caracterizam o empacotamento das partículas não sejam padronizados, a seguir são apresentados aqueles comumente utilizados para os materiais cerâmicos, descritos em Pandolfelli et al. (2000) baseado em estudo de Funk e Dinger.

Densidade relativa de empacotamento (ρ_{emp}): é o quociente entre a densidade volumétrica do sistema e a densidade da partícula sólida (equação 2.1).

$$\rho_{emp} = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_s} \quad (2.1)$$

Onde:

ρ_{emp} – densidade relativa de empacotamento

ρ_{bulk} – massa específica da mistura (massa de sólidos/volume total), kg/m³

ρ_s – massa específica dos grãos, kg/m³

Fator de empacotamento (P_f): volume ocupado pelas partículas em relação ao volume total do sistema (partículas + vazios) (equação 2.2). Quando expresso em porcentagem é denominado eficiência de empacotamento (P_e) (equação 2.3).

$$P_f = \frac{V_s}{V_t} \quad (2.2)$$

$$P_e = \frac{V_s}{V_t} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde:

P_f - fator de empacotamento

V_s – volume de sólidos, m^3

V_t – volume total, m^3

P_e – eficiência de empacotamento, %

Porosidade (P_0): é o volume de vazios entre as partículas, obtido pela equação 2.4, expresso em fração de volume.

$$P_0 = (1 - P_f) \quad (2.4)$$

Cabe observar que os parâmetros apresentados para caracterização de empacotamentos são relações volumétricas obtidas entre as fases que constituem o sistema do material em estudo, que pode ser: um concreto de cimento Portland, um material cerâmico, um concreto asfáltico, materiais granulares, solos, entre outros.

A teoria da mecânica dos solos clássica há muito utiliza relações volumétricas para caracterizar e avaliar o comportamento dos solos; os parâmetros utilizados para a caracterização do empacotamento são, basicamente, as relações dos índices físicos da mecânica dos solos adaptadas para a realidade do material em estudo.

Um dos detalhes que cabe ser mencionado é o uso do termo “densidade” nas relações de caracterização de empacotamento apresentadas anteriormente, referindo-se à relação entre massa e volume. Em se tratando de solos e materiais de

pavimentação, a denominação comumente utilizada para esta relação é a “massa específica” (PINTO, 2006), termo que será utilizado nesta tese.

No caso dos materiais para pavimentação, é totalmente factível a utilização das relações volumétricas empregadas pela mecânica dos solos para caracterizar os sistemas formados e as suas características de empacotamento, ou seja, de arranjo dos grãos.

Na Figura 1 estão apresentadas as três fases que geralmente ocorrem nos solos e materiais para pavimentação, a representação dos volumes de cada uma das fases e as relações entre estes últimos.

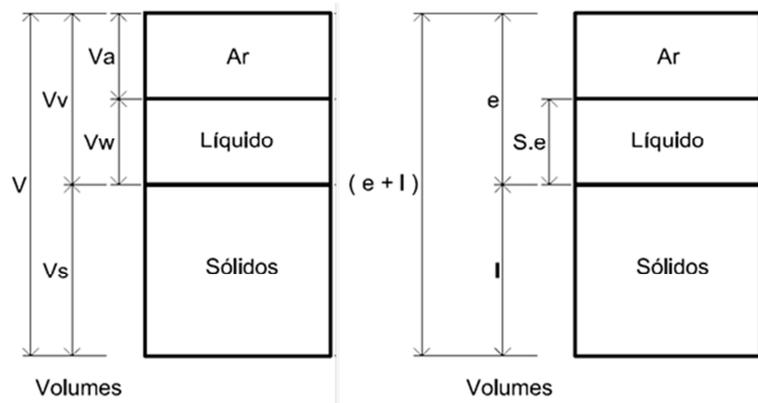


Figura 1 – Fases constituintes dos solos e materiais para pavimentação, respectivos volumes e relações volumétricas (adaptado de PINTO, 2006)

Com base nos parâmetros apresentados anteriormente é possível calcular a porosidade, representada na teoria da mecânica dos solos pelo símbolo “ η ”, denominação a ser adotada nesta tese que, por definição, é a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V) (LAMBE, 1979; TERZAGHI; PECK e MESRI, 1996).

Como para os materiais de pavimentação os ensaios de caracterização e de compactação fornecem, respectivamente, a massa específica dos grãos (ρ_s) e a massa específica aparente seca (ρ_d), podemos calcular a porosidade (η) do sistema pelas relações descritas nas equações 2.5 e 2.6 (LAMBE, 1979; PINTO, 2006; TERZAGHI; PECK e MESRI, 1996).

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{e}{1+e} \quad (2.6)$$

Onde:

e – índice de vazios

ρ_s – massa específica dos sólidos, kg/m^3

ρ_d - massa específica aparente seca, kg/m^3

η - porosidade

Ainda adequando os parâmetros de empacotamento para os materiais de pavimentação podemos calcular a densidade relativa de empacotamento, que, por definição, é a relação entre a massa específica aparente seca (ρ_d) e a massa específica dos grãos (ρ_s); e o fator de empacotamento utilizando os parâmetros da mecânica dos solos, segundo as equações 2.7 e 2.8.

$$\rho_{\text{emp}} = \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (2.7)$$

$$P_f = 1 - \eta \quad (2.8)$$

Onde:

ρ_{emp} – densidade relativa de empacotamento

ρ_d - massa específica aparente seca, kg/m^3

ρ_s – massa específica dos sólidos, kg/m^3

P_f – fator de empacotamento

2.4.1 Fatores que afetam o empacotamento

A forma como as partículas constituintes de um material irão se arranjar estruturalmente é dependente de diversos fatores, como a granulometria, forma dos grãos, morfologia, entre outros. Os itens 2.4.1.1 e 2.4.2.1 apresentam a descrição destes fatores e de que forma eles irão interferir nas características do empacotamento.

2.4.1.1 Distribuição granulométrica

O principal fator que afeta o empacotamento dos materiais é a distribuição granulométrica de suas partículas (ou grãos). É razoável que uma distribuição granulométrica contínua e bem graduada apresente maior densidade que as descontínuas ou mal graduadas.

Estudos teóricos e experimentais relacionados ao empacotamento das partículas geraram modelos baseados na distribuição granulométrica que consideram duas abordagens básicas, sendo uma delas discreta e a outra contínua.

De acordo com Pandolfelli et al. (2000), os modelos de Furnas e Andreasen são atualmente considerados os mais consistentes e fundamentais para o estudo do empacotamento, sendo o de Furnas baseado em uma abordagem discreta e o de Andreasen em uma abordagem contínua das partículas. As equações 2.9 e 2.10 apresentam os dois modelos respectivamente.

Modelo de Furnas:

$$CPFT = \left(\frac{D_p^{\log \bar{r}} - D_s^{\log \bar{r}}}{D_L^{\log \bar{r}} - D_s^{\log \bar{r}}} \right) \times 100 \quad (2.9)$$

Onde:

CPFT - % acumulada de partículas menores que D_p

D_p – Diâmetro da partícula, mm

D_s – Diâmetro da menor partícula, mm

D_L – Diâmetro da maior partícula, mm

r – Quociente entre o volume das partículas retidas em uma determinada malha de peneira (D_p) e o volume na malha imediatamente inferior.

Modelo de Andreasen:

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L}\right)^q \quad (2.10)$$

Onde:

CPFT - % acumulada de partículas menores que D_p

D_p – Diâmetro da partícula, mm

D_L – Diâmetro da maior partícula, mm

q – coeficiente de distribuição

Andreasen determinou, experimentalmente, que para o máximo empacotamento o coeficiente “q” deveria estar entre 0,33 (1/3) e 0,50. Estudos posteriores mostraram que o expoente que propicia máxima densidade de empacotamento é 0,37 (PANDOLFELLI et al., 2000).

Na área de pavimentação, o modelo mais conhecido e empregado para proposição de curva granulométrica de máxima densidade é a chamada “curva de Fuller”, proposta por Fuller e Thompson (1907), conforme a equação 2.11.

$$P = 100 \times \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (2.11)$$

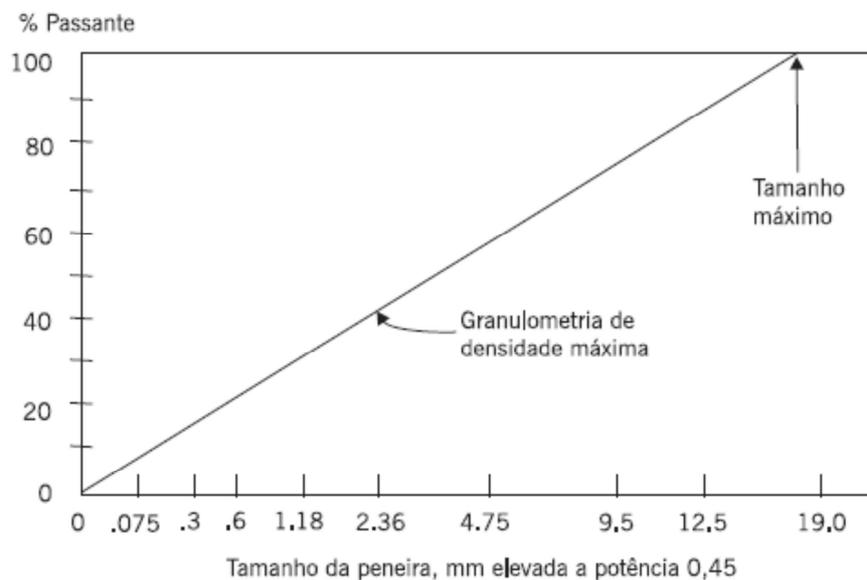
Onde:

P - porcentagem de material que passa na peneira de diâmetro d

d – diâmetro da peneira em estudo, mm

D – Tamanho máximo do agregado definido como sendo uma peneira acima do diâmetro nominal máximo, mm

Os estudos de Fuller e Thompson (1907) conduziram a um expoente $n=0,50$ para obtenção de curva granulométrica de máxima densidade. Mais tarde, na década de 1960, a *Federal Highway Administration dos Estados Unidos* (FHWA) passou a adotar o expoente $n=0,45$. A Figura 2 apresenta o gráfico com a granulometria de densidade máxima empregando o expoente $n=0,45$.



**Figura 2 – Granulometria de densidade máxima
(BERNUCCI et al., 2006)**

Existem, ainda, métodos que consideram a questão do empacotamento granulométrico para misturas asfálticas, como é o caso do método Bailey.

Desenvolvido por Robert Bailey na década de 1980 no Departamento de Transportes de Illinois nos Estados Unidos (IDot), este é um método de seleção granulométrica que, por meio de um ajuste sistemático da granulometria dos agregados, proporciona a formação de uma estrutura de agregados estável e resistente à ocorrência de deformações permanentes.

O método emprega dois princípios básicos de relação entre a granulometria dos agregados e as características volumétricas da mistura: o empacotamento dos grãos e a definição de fração graúda e fração miúda dos agregados. A partir destes

princípios, as etapas do método são, basicamente, combinar os agregados em volume e analisar a combinação gerada com relação à formação da estrutura de agregados e do contato entre os grãos (BAILEY et al., 2002).

Cabe observar que o método Bailey não é uma metodologia para a dosagem de misturas asfálticas, mas sim um método de ajuste granulométrico que possibilita a seleção de uma granulometria adequada.

Existem, ainda, métodos de dosagem de misturas asfálticas que contemplam o estudo da curva granulométrica para máxima densidade, como é o caso da metodologia Superpave, que adota o gráfico de potência 0,45 com o emprego de duas características adicionais: pontos de controle e zonas de restrição (Figura 3).

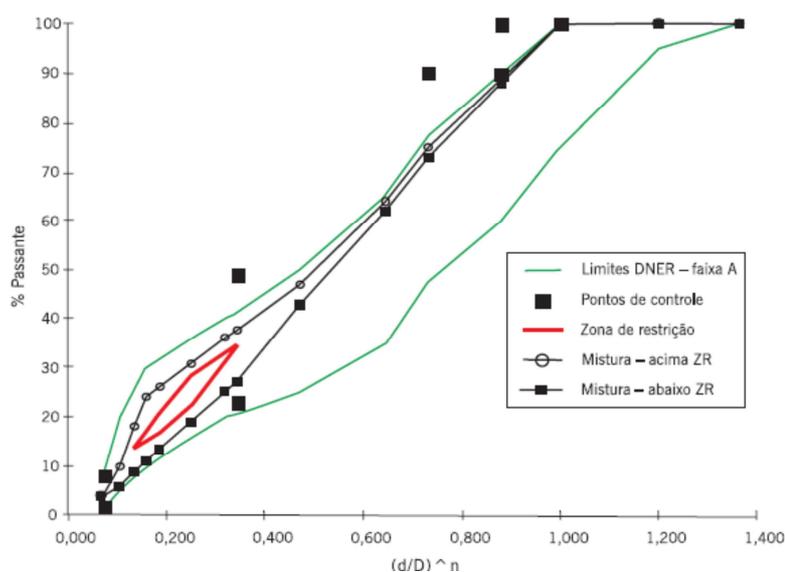


Figura 3 – Exemplo de granulometria com pontos de controle e zonas de restrição adequada à especificação Superpave (BERNUCCI et al., 2006)

Os pontos de controle funcionam como pontos mestres pelos quais a curva tem que passar, são três: um no diâmetro máximo nominal, um no diâmetro intermediário (2,36 mm) e um nos finos (0,075 mm). A zona de restrição, atualmente pouco empregada pelos projetistas, forma uma região por onde a curva não deve passar, está localizada sobre a linha de densidade máxima, na peneira intermediária (4,75mm ou 2,36mm) e no diâmetro de 0,3 mm (BERNUCCI et al., 2006).

A fixação destes pontos tem como objetivo a obtenção de uma granulometria que apresente máxima densidade possível para a formação de uma estrutura de agregados estável, sem prejudicar o volume de vazios necessário para a adição do ligante asfáltico.

Outra método que considera a questão do empacotamento granulométrico na dosagem é a desenvolvida pelo *National Center for Asphalt Technology – NCAT* para a dosagem de misturas asfálticas SMA (*Stone Matrix Asphalt*). Aqui o objetivo não é a obtenção de uma granulometria com densidade máxima, mas sim que seja garantido o contato entre os grãos da fração graúda dos agregados, pois o princípio básico desse tipo de mistura é a maximização do contato entre os grãos desta fração, aumentando sua resistência à ação dos esforços oriundos do tráfego (SILVA, 2005).

Em linhas gerais, de acordo com NAPA (1999), a dosagem das misturas SMA é feita, inicialmente, com a obtenção de uma estrutura de agregados (esqueleto pétreo) que garanta o contato entre os grãos de agregados graúdos, o que ocorre quando os vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada (VCA_{MIX}) é menor ou igual aos vazios da fração graúda do agregado compactado (VCA_{DRC}).

Estes esses parâmetros são obtidos pelas as equações 2.12 e 2.13, respectivamente (NAPA, 1999).

$$VCA_{MIX} = 100 - \left(\frac{\rho_{MB}}{\rho_{CA}} \times P_{CA} \right) \quad (2.12)$$

$$VCA_{DRC} = \left(\frac{\rho_{CA} \rho_w - \rho_u}{\rho_{CA} \rho_w} \right) \times 100 \quad (2.13)$$

Onde:

VCA_{MIX} - vazios da fração graúda do agregado na mistura compactada, %

ρ_{MB} - massa específica aparente da mistura compactada, kg/m^3

ρ_{CA} - massa específica aparente da fração graúda do agregado, kg/m^3

P_{CA} - porcentagem de fração graúda do agregado em relação ao peso total da mistura

VCA_{DRC} - vazios da fração graúda do agregado compactado, %

ρ_u - massa específica da fração graúda do agregado seco compactado (massa unitária), kg/m^3

ρ_w - massa específica da água, kg/m^3

2.4.1.2 Outros fatores que afetam o empacotamento

Além da granulometria dos agregados, outros fatores relativos às características físicas dos grãos e ao método utilizado para a moldagem ou compactação dos materiais também irão interferir em seu arranjo físico final, conforme será apresentado de forma sucinta neste item.

Forma

A forma afeta o empacotamento porque quanto menos esférica for a partícula, menor será a densidade de empacotamento, pois o contato entre as superfícies irregulares dos grãos gera atrito, o que dificulta o arranjo entre estas partículas.

O efeito da forma no empacotamento é avaliado de maneira qualitativa, pois não existem regras na literatura que definam esse efeito quantitativamente (PANDOLFELLI et al., 2000).

Textura superficial das partículas

A textura superficial das partículas interfere no empacotamento, pois quanto mais rugosa for a superfície, maior será o atrito entre as partículas e, conseqüentemente, maior será a dificuldade de efetuar a compactação, o que irá gerar menores densidades de empacotamento (BAILEY ET AL., 2002).

Porosidade das partículas

De acordo com Pandolfelli et al. (2000), as partículas podem apresentar porosidade interna aberta ou fechada, porém para maiores densidades de empacotamento, o ideal é que se tenham baixas porosidades, o que nem sempre é possível.

Partículas com porosidade aberta têm sua forma alterada, aumentando a irregularidade de sua superfície. Além disso, vão apresentar uma absorção elevada, demandando maiores teores de umidade para a compactação, o que pode diminuir a densidade de empacotamento (BAILEY et al., 2002).

Resistência das partículas

A resistência das partículas dos agregados afeta diretamente a quebra durante a ocorrência de compactação por rolagem da camada de um pavimento. Agregados menos resistentes irão sofrer maior degradação, gerando maiores densidades de empacotamento (BAILEY et al., 2002).

Método e energia de compactação

Além dos fatores físicos ligados às características das partículas envolvidas, o empacotamento também depende do método empregado no arranjo destas partículas, ou seja, do tipo e da energia de compactação utilizados.

Segundo Bailey et al. (2002), nos estudos e na execução de camadas de pavimentos, diversos tipos de compactação e energias podem ser empregados, tais como prensagem estática (por ex.: moldagem de corpos de prova), compactação por impacto (por ex.: compactador Marshall), por cisalhamento (compactador giratório) ou por rolagem (por ex.: mesa compactadora francesa LPC e compactação em campo). Densidades de empacotamento elevadas podem ser obtidas com a elevação da energia de compactação empregada, por exemplo, aumentando a pressão de compactação ou o número de passadas do rolo compactador durante a execução das camadas em campo.

2.4.2 Fatores relativos ao empacotamento que interferem no comportamento de camadas de pavimento

Em materiais para pavimentação o estudo do empacotamento das partículas é importante porque a resposta da camada do pavimento é, em grande parte, consequência da interação entre as partículas dos materiais que as compõem.

Embora as teorias de empacotamento mais conhecidas e empregadas entendam que uma área de contato elevada e maior angularidade das partículas sejam características negativas para o empacotamento, pois dificultam o arranjo destas partículas, isso não se aplica aos materiais para pavimentação.

Nos pavimentos é necessário que as partículas dos agregados que constituem os materiais formem uma estrutura, em geral denominada esqueleto pétreo, que maximize o contato entre os grãos, de modo que seja gerado um intertravamento que proporcionará maior resistência às aplicações dos esforços repetitivos, minimizando a ocorrência de deformações plásticas.

Os fatores que interferem diretamente na formação da matriz pétreo e, conseqüentemente, no seu comportamento, são a forma e a granulometria dos grãos, responsáveis pela maximização do contato grão/grão, e a textura dos agregados que responderá pelo intertravamento desta estrutura.

Embora já existam metodologias que contemplem o empacotamento das partículas quando se trata da dosagem de misturas asfálticas como, por exemplo, os métodos Bailey, Superpave e NCAT para o SMA, como mencionado anteriormente, no caso das camadas granulares para base e sub-base de pavimentos dá-se, ainda, pouca importância a esta questão, sendo consideradas somente as faixas granulométricas estabelecidas pelas especificações adotadas no projeto.

Além disso, quando se trata de uma mistura asfáltica, deve-se garantir que existam vazios suficientes para serem preenchidos com o ligante sem que ocorra exsudação. Assim, a máxima densidade de empacotamento não é, necessariamente, a mais indicada para os materiais granulares que compõem estas misturas, é preciso sempre cuidar para que a granulometria proporcione um determinado volume de vazios suficiente para evitar a exsudação do ligante sem prejudicar a sua durabilidade.

De acordo com Shen e Yu (2011), o contato entre os agregados e o intertravamento são características essenciais para a resistência e a estabilidade de uma mistura asfáltica, seja ela densa ou descontínua, pois afetam diretamente a capacidade destas misturas em suportar e transferir as cargas oriundas do tráfego, sendo que o mesmo se aplica aos materiais granulares para bases e sub-bases de pavimentos.

Também no caso dos materiais granulares para camadas de base e sub-base, a máxima densidade de empacotamento pode não ser a mais indicada. Isso porque o incremento de material fino, embora possa adicionar resistência, em elevada quantidade, poderá prejudicar o contato entre os grãos maiores, dificultando a formação do esqueleto pétreo e prejudicando o comportamento desta camada (BILODEAU e DORÉ, 2012), sendo recomendável certa cautela na determinação da quantidade desta fração.

Materiais granulares com partículas mais arredondadas e de superfícies mais lisas têm maior eficiência de empacotamento, porém isso não é suficiente para melhorar o seu comportamento mecânico.

Em estudo sobre a relação do empacotamento granulométrico e o comportamento resiliente de britas graduadas, os autores verificaram que os materiais que possuíam agregados com forma arredondada, superfície lisa e maiores densidade de empacotamento apresentaram módulos de resiliência mais baixos que outros compostos por agregados de forma cúbica, textura superficial mais rugosa e menores densidades de empacotamento (BILODEAU e DORÉ, 2012).

Ainda citando a pesquisa de Bilodeau e Doré (2012), a formação do esqueleto pétreo, as características de empacotamento e o intertravamento dos agregados influenciam diretamente no comportamento resiliente de materiais granulares.

Isto acontece porque os agregados que apresentam superfície mais lisa, embora resultem em maiores densidades de empacotamento, não promovem o intertravamento desta estrutura, potencializado pelo maior atrito entre as partículas, o que vai gerar uma estrutura de agregados menos estável e, conseqüentemente, mais suscetível à ocorrência de deformações plásticas.

Assim, o que fica claro é que para materiais de pavimentação não basta identificar a densidade de empacotamento e os vazios existentes na mistura de

agregados para dizer algo sobre o seu comportamento diante das solicitações que serão impostas pelo tráfego. O ideal é avaliar, além destas características, também a eficiência da formação do esqueleto pétreo, identificando a ocorrência de contato entre os grãos e o intertravamento desta estrutura.

Algumas pesquisas têm buscado realizar esse tipo de avaliação, porém ainda é difícil medir e quantificar o intertravamento dos agregados diretamente. Por isso, a maior parte dos estudos descreve de forma qualitativa a existência de contato entre os agregados usando imagens e técnicas não destrutivas (SHEN e YU, 2010).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS, MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta todas as etapas envolvidas no desenvolvimento da parte experimental desta tese, descrevendo a origem dos materiais, os métodos empregados para o processamento e realização dos ensaios de caracterização, análises químicas e avaliação de comportamento mecânico dos materiais individuais e das misturas estudadas. Apresentam-se, também, a metodologia utilizada para a dosagem das misturas, os resultados obtidos em todos os ensaios realizados e as respectivas análises e discussões.

A Figura 4 apresenta o fluxograma simplificado das etapas seguidas para a realização do programa experimental.

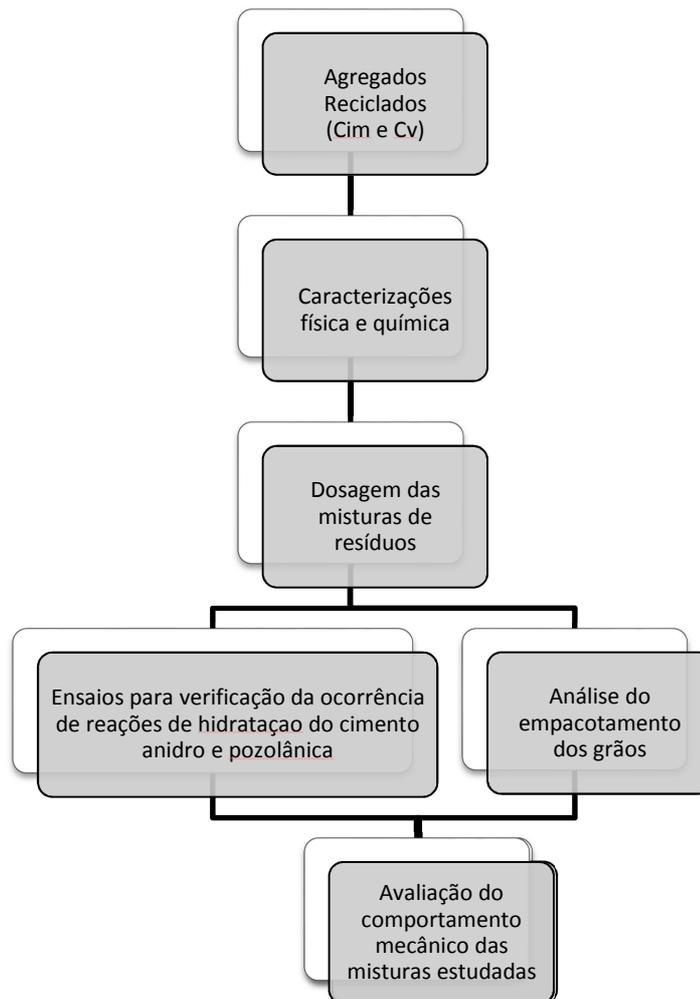


Figura 4 - Fluxograma do experimento

3.1 Materiais: origem e natureza

Para o desenvolvimento desta tese foram utilizados dois tipos de resíduos; um de materiais cimentícios (concreto e argamassa) proveniente de demolição de edificações e outro proveniente de olarias produtoras de tijolos de cerâmica vermelha. Utilizaram-se, ainda, agregados naturais de gnaiss como padrão de comparação, pois, além de ser o tipo de material comumente utilizado em camadas granulares de pavimentos na região do município de São Paulo, não há, neste caso, a possibilidade de ocorrência de reações químicas já que os finos são provenientes da britagem e não têm qualquer elemento reativo.

Neste item apresentam-se a origem dos materiais e os métodos empregados na obtenção dos agregados reciclados de ambos os resíduos.

3.1.1 Agregado reciclado de resíduo cimentício (Cim)

Para a obtenção do agregado reciclado de resíduo cimentício (Cim) foi utilizado o resíduo proveniente da demolição de dois edifícios no município de São Paulo: o Edifício São Vito (Figuras 5a e 5b), que estava localizado na região central, construído na década de 50, e do Edifício do Moinho (Figura 5c e 5d), que estava localizado no bairro de Campos Elíseos.



(a) Demolição do Edifício São Vito na fase inicial
(Fonte: blog.estadao.com.br)



(b) Demolição do Edifício São Vito na fase final
(Fonte: blog.estadao.com.br)



(c) Edifício do Moinho após implosão parcial
(Fonte: fotografia.folha.uol.com.br)



(c) Edifício do Moinho na fase final de demolição
(Fonte: fotografia.folha.uol.com.br)

Figura 5 – Demolição dos Edifícios São Vito e do Moinho

Como foi utilizada somente a parte de natureza cimentícia do resíduo, a seleção foi realizada visualmente na recicladora da Prefeitura Municipal de São Paulo, operada pela empresa Fremix (Figura 6) que, gentilmente, cedeu o material para a pesquisa. Após esta seleção foi efetuada a britagem em um britador de impacto, equipamento móvel da marca Kleeman (empresa do grupo Wirtgen), modelo Mobirex 110z EVO, com um rotor de 1100 mm de diâmetro e capacidade de produção para britagem de resíduo de concreto de 250 t/h, de propriedade da empresa Fremix, instalado na área da recicladora.



Figura 6 – Resíduo cimentício selecionado, antes da britagem

Após a britagem, todo o material, cerca de 4000 kg, foi homogeneizado e levado para o laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentos do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), localizado no município de São Paulo.

Para a pesquisa optou-se por não empregar frações maiores que 25 mm, pois se sabe que frações acima deste limite são muito mais suscetíveis à quebra durante a compactação, dificultando o controle granulométrico da mistura. Sendo assim, antes da definição de qual seria composição granulométrica a ser utilizada, o material foi peneirado na peneira de 25 mm de abertura e a porção retida foi britada novamente em britador mandíbula de bancada, no IPT, até passar integralmente nesta peneira.

3.1.2 Agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv)

Para a obtenção do agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv) foram utilizados resíduos provenientes de olarias, localizadas no município de Cabreúva / São Paulo, produtoras de tijolos cerâmicos maciços. Este resíduo é gerado devido à ocorrência de falhas na produção durante a queima, o que impossibilita o reprocessamento do material, sendo necessário o descarte das peças defeituosas.

A coleta do resíduo para a pesquisa (Figura 7) foi realizada durante duas semanas pela Associação de Olarias de Cabreúva e Região que, gentilmente, cedeu o material.

Para obtenção do agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv) (Figura 8), o resíduo foi britado no mesmo equipamento utilizado para a britagem do resíduo cimentício.



Figura 7 – Aspecto do resíduo de tijolo cerâmico antes da britagem



Figura 8 – Aspecto do agregado reciclado de tijolo cerâmico

3.1.3 BGS (Brita Graduada Simples)

Para a composição da brita graduada simples (BGS), como material de referência, foram utilizados agregados naturais de gnaiss britados, provenientes da Pedreira Serveng-Barueri que, gentilmente, cedeu o material para a pesquisa.

3.1.4 Cimento Portland e cal CH-I

Para realização das dosagens das misturas de Cim e Cv foram empregados cimento Portland e cal, adquiridos no comércio varejista. O cimento utilizado foi do tipo CII-F32 da marca Votoran e a cal do tipo CH-I da marca Qualical.

3.2 Materiais: ensaios de caracterização

3.2.1 Caracterização física

Para a caracterização física foram realizados, em ambos os agregados reciclados, ensaios de granulometria com determinações em massa e volume, análise granulométrica antes e após a compactação do Cim, para avaliação de sua suscetibilidade à quebra, e ensaios para determinação das massas específicas real e aparente de todos os materiais utilizados.

3.2.1.1 Granulometria dos agregados reciclados estudados

Para a pesquisa era necessário, inicialmente, definir uma granulometria padrão para ambos os agregados reciclados (Cim e Cv), de modo que esta fosse representativa dos materiais obtidos após a britagem.

Foram, então, realizados ensaios de granulometria por peneiramento de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1988a), em duplicata, para cada um dos agregados reciclados e a média das curvas obtidas foi adotada como curva padrão, conforme apresentadas na Figura 9.

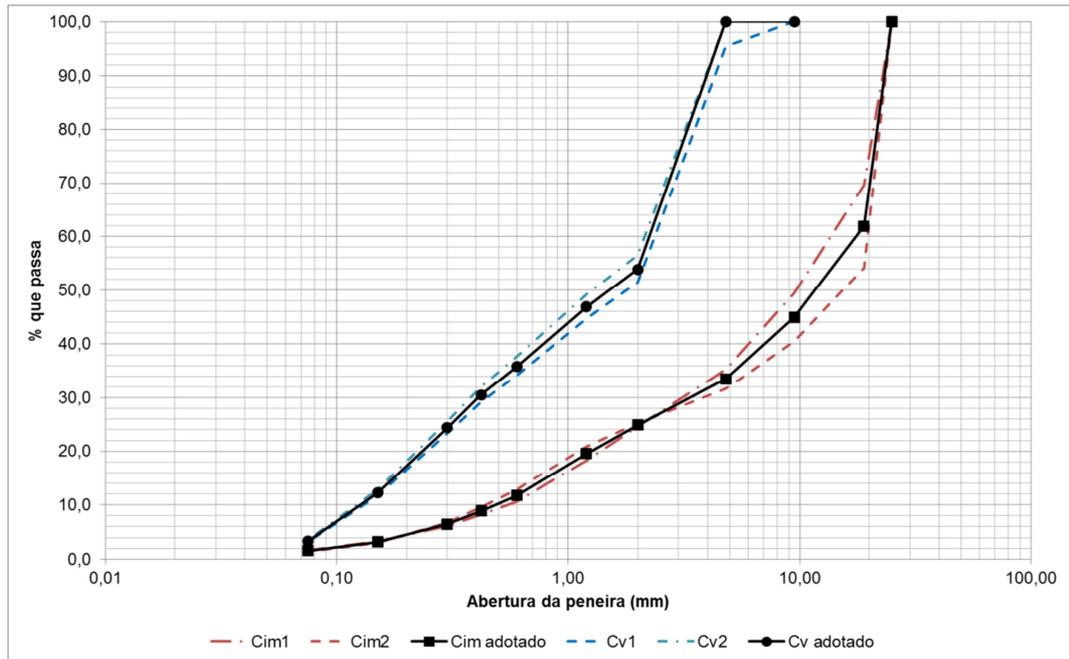


Figura 9 – Curvas granulométricas adotadas para os dos agregados reciclados Cim e Cv

De posse das granulometrias a serem adotadas como padrão, foi feita a separação de todo o material em seis frações de controle para o agregado reciclado cimentício (Cim), e em três frações de controle para o agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv), com o objetivo de compor granulometricamente cada montante de material que fosse necessário à realização dos ensaios mecânicos, o que garantiu que todos os corpos de prova testados apresentassem a mesma granulometria.

As composições em massa das granulometrias adotadas para os agregados reciclados Cim e Cv são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos agregados reciclados Cim e Cv

Fração	% em massa de material	
	Cim	Cv
19,0 mm	38,1	-
4,8 mm	28,4	-
2,0 mm	-	46,2
1,2 mm	13,9	-
0,42 mm	10,7	-
0,15 mm	5,7	41,6
<0,15 mm	3,2	12,2

Para a BGS, foi efetuada uma composição semelhante à apresentada pelo Cim, cuja curva granulométrica está apresentada na Figura 9. Cabe observar que ambas as curvas (Cim e BGS) se enquadram quase que totalmente na Faixa A indicada pela especificação NBR 11806 (ABNT, 1991), exceto pelo diâmetro máximo e pela porcentagem de material menor que 0,15 mm (#100), pouco abaixo do limite mínimo especificado na norma, como mostra a Figura 10.

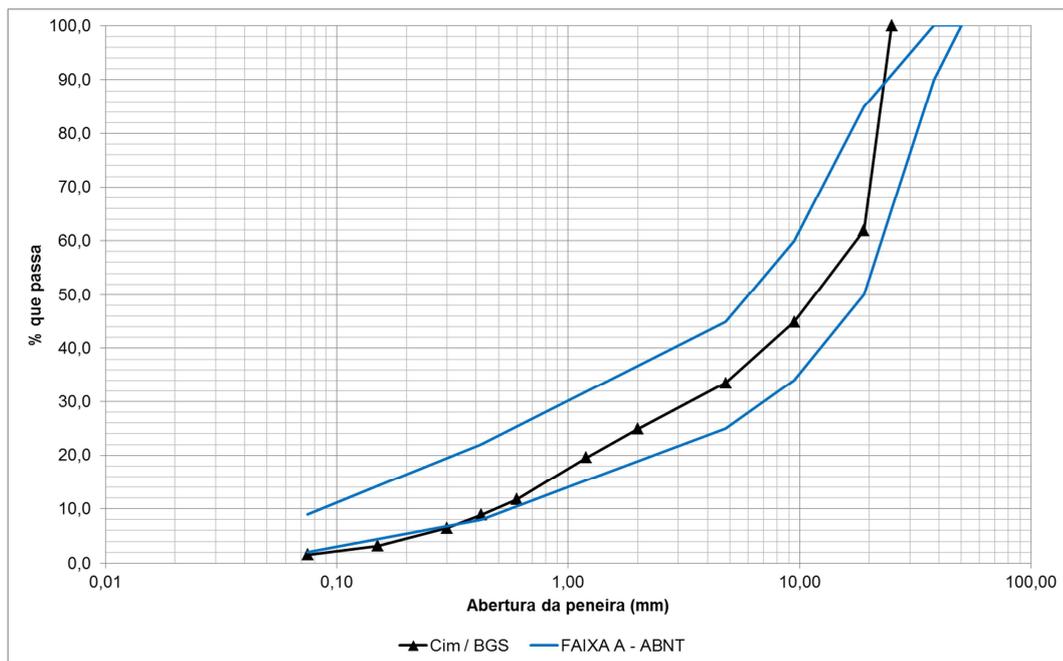


Figura 10 – Faixa granulométrica A para Brita Graduada Simples (ABNT, 1991) e curva utilizada para BGS e Cim

A partir das curvas granulométricas adotadas como padrão para o Cim, o C_v e para a BGS, foram obtidos os parâmetros preconizados pela NBR 15115 (2004a), que compreendem, além de valores tomados diretamente da curva granulométrica, o coeficiente de uniformidade (C_u), determinado pela equação 3.1.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

Onde:

C_u : coeficiente de uniformidade

d_{60} : diâmetro correspondente a 60% da porcentagem que passa, mm

d_{10} : diâmetro correspondente a 10% da porcentagem que passa, mm

Este coeficiente representa a falta de uniformidade granulométrica, sendo assim, quanto menor for seu valor mais uniforme será a curva. Os resultados obtidos para estes parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Foi realizada, ainda, a determinação da granulometria do agregado reciclado cimentício (Cim) após compactação na energia modificada, empregando cilindro grande (ensaio de Índice de Suporte Califórnia) com o objetivo de verificar a suscetibilidade à quebra deste material.

Para isso foi efetuada a compactação de dois corpos de prova, cujas composições granulométricas antes da compactação eram conhecidas. Após a compactação, os corpos de prova foram destorroados, submetidos à secagem e, em seguida, à realização do ensaio de granulometria por peneiramento. O resultado obtido, pela média dos dois corpos de prova, é apresentado na Figura 11 em porcentagem passante acumulada por peneira, e na Figura 12 em porcentagem retida não acumulada, que permite a melhor visualização de qual das frações sofreu mais com a quebra.

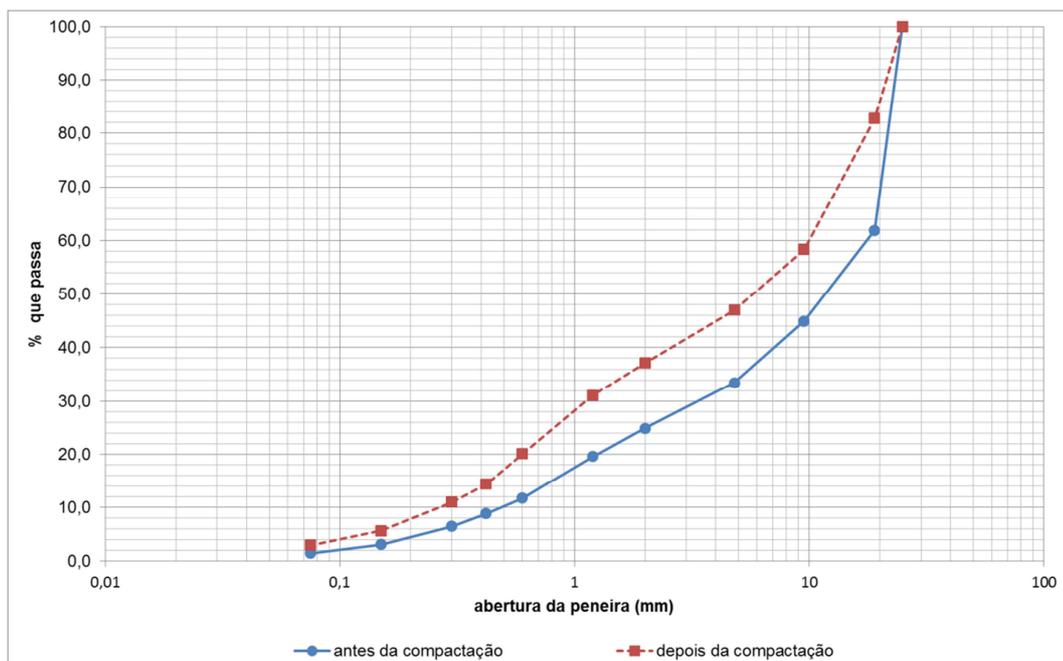


Figura 11 – Curvas granulométricas do Cim antes e após a compactação na energia modificada, em percentual passado em massa

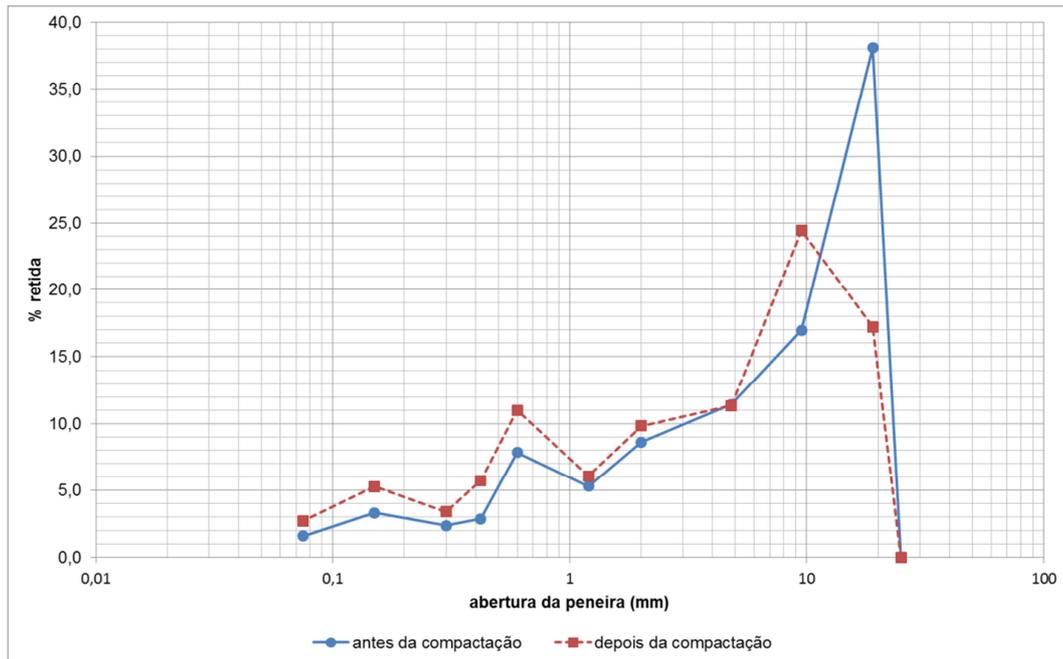


Figura 12 – Curvas granulométricas do Cim antes e após a compactação na energia modificada, em percentual retido em massa

Foram determinados os parâmetros granulométricos preconizados pela NBR 15115 (ABNT, 2004a) para a curva após a compactação e esses também são apresentados na Tabela 3.

A verificação da quebra não foi efetuada para o Cv pela dificuldade que se teve em destorroar o corpo de prova após compactação, indicando a ocorrência de alteração granulométrica gerada por esta operação.

Tabela 3 – Parâmetros granulométricos para os agregados reciclados cimentício (Cim) e de cerâmica vermelha (Cv) e para a BGS

Parâmetros	Cim e BGS	Cim após compactação	Cv	NBR 15115 (ABNT, 2004a)
Dimensão característica máxima dos grãos (mm)	25	25	4,8	63,5
Porcentagem que passa na peneira 0,42mm	8,9%	14,4%	30,5%	10%-40%
Coefficiente de uniformidade (Cu)	37	35	19	≥ 10

Além da granulometria por peneiramento também foi realizada, em ambos os agregados reciclados (Cim e Cv), granulometria por imagem utilizando o

equipamento Camsizer, no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP (LCT-PMI/EPUSP). Este equipamento é fabricado pela Retsch Technology e, de acordo com Ulsen (2011), possibilita a análise de cerca de 1.000.000.000 de partículas em poucos minutos.

A finalidade deste ensaio foi obter a distribuição granulométrica dos materiais com maior detalhamento de suas frações, de modo a possibilitar o cálculo das distribuições por volume, cujas curvas para o Cim e para o Cv são apresentadas na Figura 13.

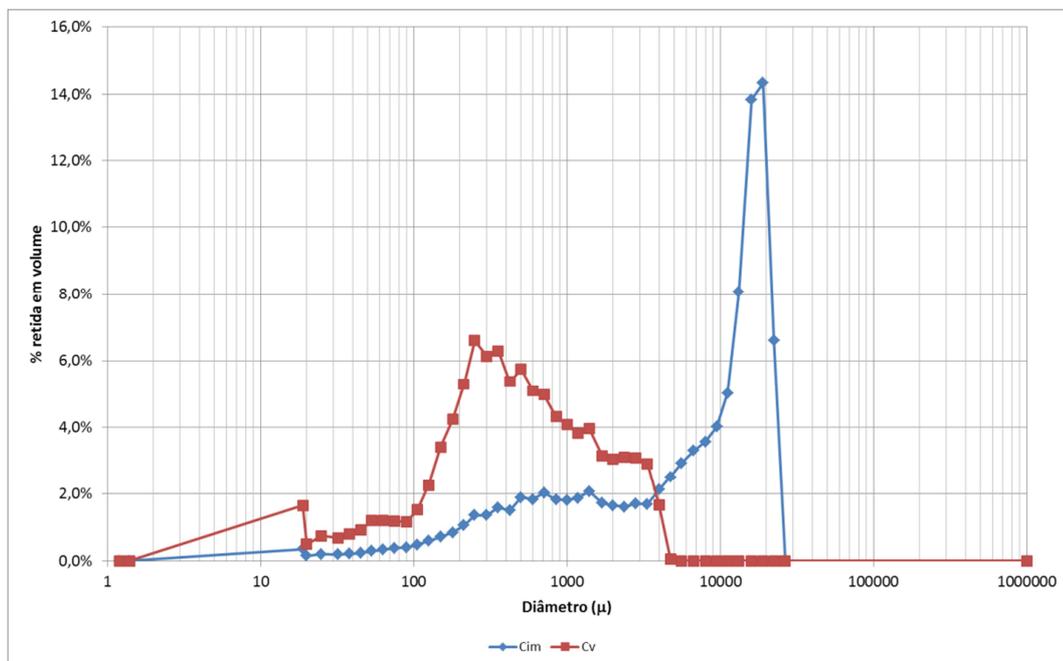


Figura 13 – Curvas granulométricas dos agregados reciclados cimentício (Cim) e de cerâmica vermelha (Cv), em distribuição de volume

Além de caracterizar os agregados reciclados, a distribuição volumétrica também contribuiu para a definição da curva da BGS em termos de volume de modo que fosse obtida uma mistura que tivesse mesmo volume de vazios que o Cim.

3.2.1.2 Massas específicas dos materiais

Foram realizados os ensaios de massas específicas aparente e real e de absorção em todos os materiais empregados na pesquisa, exceto no caso da BGS, cujos valores foram fornecidos pela pedreira Serveng-Barueri, que cedeu o material.

Os resultados obtidos, bem como os métodos utilizados, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Massas específicas e absorção dos materiais utilizados

Material	Método de ensaio	Massa específica aparente (kg/m ³)	Massa específica real (kg/m ³)	Absorção (%)
Cim > 4,8 mm	ASTM C 127-12	2370	2562	3,17
Cim < 4,8 mm	ASTM C 128-07	2206	2640	7,43
Cv	ASTM C 128-07	1962	2657	13,30
Cal	Picnômetro de Hélio	-	2450	-
Cimento	Picnômetro de Hélio	-	3160	-

3.2.1.3 Forma dos grãos

Foram realizados ensaios de índice de forma no Cim e na BGS sobre as frações maiores que 4,75 mm, de acordo com a norma D 4791 (ASTM, 2010), pelos métodos A e B, utilizando a relação de 1:3. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de índice de forma dos grãos

Forma	Material	
	Cim	BGS
Porcentagem lamelar e alongada	22%	38%
Porcentagem não lamelar e não alongada	78%	62%

3.2.1.4 Discussões dos ensaios de caracterização física

Observando os parâmetros granulométricos obtidos para ambos os agregados reciclados, apresentados na Tabela 3, verifica-se que todos os requisitos estabelecidos pela NBR 15115 (ABNT, 2004) são atendidos. No caso do Cim, a porcentagem menor que 0,42 mm apresenta valor abaixo do limite antes da compactação, porém após esse processo o valor chega a 14,4%, atendendo ao limite mínimo especificado que é de 10%.

Também para o coeficiente de uniformidade os valores obtidos para os três materiais empregados indicam que estes apresentam distribuições granulométricas não uniformes (bem distribuídas).

Não é desejável que a granulometria dos materiais seja uniforme, pois isto representa uma concentração de partículas de tamanhos iguais, resultando numa curva granulométrica mal graduada, o que diminui a eficiência da compactação, fazendo com que o material apresente maior volume de vazios quando aplicado e, conseqüentemente, maior suscetibilidade à quebra devido à elevada concentração de tensões entre os grãos.

Analisando as curvas granulométricas do agregado reciclado cimentício (Cim) antes e após a compactação, verifica-se que a quebra mais significativa ocorreu nas partículas de maior diâmetro, ou seja, as retidas na peneira de abertura 19 mm que antes da compactação apresentava cerca de 38% de partículas retidas e após a compactação passou para 17%.

Além disso, a quebra gerou aumento significativo na fração menor que 0,15 mm, que passou de 4,7% para 8,7%. Com isso, a quebra ocorrida demonstrou ser positiva para a estabilização do agregado reciclado Cim, pois com a geração de maior quantidade de grãos menores que 0,15 mm, ter-se-á maior quantidade de fração reativa no material.

Quanto à forma dos grãos, a NBR 15115 (ABNT, 2004a) estabelece que agregados reciclados para uso em pavimentação devem apresentar no máximo 30% de grãos lamelares quando esta determinação é feita pelo método NBR 7809.

Para esta tese os ensaios foram realizados pelo método ASTM D 4791 (ASTM, 2010), que apresenta menor rigor na qualificação dos grãos, isso porque no

método NBR a relação empregada é de 1:2, ou seja, quando a relação entre as dimensões for menor ou igual a 0,5 o grão é considerado lamelar, já no método ASTM esta relação é de 1:3 (0,33).

Nos ensaios realizados no Cim, a porcentagem de grãos lamelares e alongados foi de 22%, valor abaixo do limite máximo recomendado, porém devem-se considerar as diferenças entre o método utilizado e o indicado pela NBR 15115 (ABNT, 2004a).

Quanto à forma apresentada pelos agregados que compõem a BGS, a norma NBR 11806 (ABNT, 1991) não estabelece valores para esta característica, porém a especificação DER-SP (2005a), indica que a porcentagem de grãos lamelares seja menor que 10%, assim, o material não atende a esta especificação.

Cabe ressaltar que embora a BGS tenha apresentado maior porcentagem de lamelares que o Cim, seus agregados são provenientes da britagem de um material natural sendo, com isso, menos suscetível à quebra durante a compactação.

3.2.2 Caracterização química

De acordo com Neville (1998), uma vez que as reações de hidratação começam na superfície das partículas do cimento, é a área total dessa superfície que representa o material disponível para a hidratação, sendo assim, a sua velocidade e eficiência vão depender da finura destas partículas. O mesmo ocorre com a pozolana, ou seja, para reagir com o hidróxido de cálcio é necessário que se tenha superfície específica disponível suficiente para ocorrência e eficiência desta reação.

Como o objetivo dos ensaios de caracterização química foi avaliar o potencial para o desenvolvimento de reações de hidratação do cimento anidro presente no Cim, e pozolânica pela pozolana presente no Cv, era necessário que fossem realizados na fração que tivesse condições físicas para isso, até porque a dimensão das partículas para realização dos ensaios é limitada pelos próprios procedimentos.

Sendo assim, todos os ensaios de caracterização química foram realizados nas frações menores que 0,15 mm, sendo esta a máxima fração considerada com potencial reativo.

Os ensaios de caracterização química compreendem a fluorescência de raios X (FRX), para determinação dos componentes químicos dos materiais em termos de óxidos elementares; difração de raios X (DRX), para identificação das fases mineralógicas existentes nos materiais ensaiados; análise termogravimétrica (TG), para quantificação das fases existentes no material, por meio da perda de água combinada; ensaio Chappelle modificado, realizado no agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv), para verificação da ocorrência de atividade pozolânica do material e ensaio de resíduo insolúvel (RI), realizado no agregado reciclado cimentício (Cim) para auxiliar na estimativa da quantidade de pasta de cimento e de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) existentes no material.

3.2.2.1 Fluorescência de raios X (FRX)

Os ensaios de fluorescência de raios X (FRX) foram realizados em amostras das frações finas (< 0,15 mm) de ambos os agregados reciclados (Cim e Cv) para identificar a composição química destes materiais, em termos de óxidos elementares, seguindo diretrizes gerais da norma ISO/FDIS 29581-2 (ISO, 2009).

Utilizou-se espectrômetro de fluorescência de raios-X do Laboratório de Materiais de Construção (LMCC) do IPT, marca Panalytical, modelo Minipal Cement (Figura 14). Foram utilizadas pastilhas fundidas em máquina de fusão marca Claisse modelo M4, utilizando-se fundentes à base de mistura de tetraborato de lítio / metaborato de lítio marca MAXXIFLUX (66,67% de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 32,83% de LiBO_2 e 0,50% de LiBr), com proporção de 0,6g de amostra calcinada da perda ao fogo para 6,75g de fundente. A perda ao fogo foi determinada com massa inicial de 2,5g a aproximadamente 1000°C em forno mufla marca: Fornit ec.

O espectrômetro foi calibrado utilizando-se padrões internos do fabricante e a curva denominada "OMNIAN" e verificado com padrão IPT 28. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.



Figura 14 – Equipamento utilizado nos ensaios de FRX

Tabela 6 – Resultado obtidos nos ensaios de FRX realizados nos agregados reciclados Cim e Cv

Determinação	Resultado (%)	
	Cim	Cv
PF (perda ao fogo)	11,83	2,72
MgO (óxido de magnésio)	1,56	-
Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)	9,46	24,23
SiO ₂ (anidrido silícico)	54,52	64,58
SO ₃ (anidrido sulfúrico)	1,31	-
K ₂ O (óxido de potássio)	1,29	1,43
CaO (óxido de cálcio)	16,97	0,50
TiO ₂ (óxido de titânio)	0,43	0,95
Fe ₂ O ₃ (óxido férrico)	2,42	5,33
Outros óxidos	0,16	0,24
TOTAL	100	100

3.2.2.2 Difração de raios X

Foram realizados ensaios de difração de raios X em ambos os agregados reciclados estudados, com o objetivo de caracterizar as fases mineralógicas que compõem estes materiais.

O princípio da técnica da difração de raios X é a representação do fenômeno de interação entre o feixe de raios X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material, relacionados ao espalhamento coerente. Assim, a

técnica consiste, basicamente, na incidência de radiação em uma amostra e na captação do feixe difratado por esta amostra (fótons difratados) (GOBBO, 2009).

Normalmente, utiliza-se para as medidas o difratômetro com análise pelo método do pó, como o equipamento empregado nos ensaios desta pesquisa.

Segundo Gobbo (2009), neste tipo de equipamento a captação do eixo difratado é feita por meio de um detector que possui determinado arranjo geométrico entre a fonte de raios X e a amostra. Têm-se, então, como resultado do ensaio as intensidades obtidas em um ângulo 2θ , representadas através dos picos em difratogramas, que correspondem à difração do feixe incidente por um determinado conjunto de cristais. Como cada composto cristalino possui um padrão difratométrico característico, é possível efetuar sua identificação pela comparação do difratograma obtido no ensaio com padrões difratométricos de fases individuais, disponibilizados pelo ICDD (*International Center for Diffraction Data*).

Os ensaios para esta tese foram realizados em difratômetro do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT, marca Rigaku modelo Windmax 1000, operando na radiação K_{α} do cobre (40kV – 30mA e 2°/min) (Figura 15). As condições empregadas no ensaio são apresentadas na Tabela 7.

As fases mineralógicas identificadas nos materiais ensaiados são apresentadas na Tabela 8 e os difratogramas obtidos são apresentados no Apêndice A.



Figura 15 – Difratômetro-utilizado nos ensaios de difração de raios X

Tabela 7 – Condições utilizadas nos ensaios de difração de raios X

Parâmetro	Condição
Radiação	Cu K α
Voltagem do tubo	40kV
Corrente do tubo	30mA
Spinner	10rpm
Fenda Soller	1°
Fenda Divergência	1°
Ângulo inicial (2θ)	3°
Ângulo final (2θ)	65°
Tempo/passo angular (s)	0.020
Passo angular (2θ)	2°/min
Tempo de coleta (minutos)	30

Tabela 8 – Fases mineralógicas identificadas nos ensaios de difração de raios X realizados nos agregados reciclados Cim e Cv

Fases mineralógicas identificadas	Materiais	
	Cim	Cv
Clinker anidro (C ₂ S)	x	-
C-S-H (silicato de cálcio hidratado)	x	-
Portlandita	x	-
Quartzo	x	x
Calcita	x	-
Mica	x	x
Feldspato	x	x
Etringita	x	-
Brucita	x	-
Heulandita	x	-
Hematita	-	x

3.2.2.3 Termogravimetria (TG)

De acordo com Ramachandran et al. (2002), a termogravimetria (TG) mede a mudança em massa de um material em função do tempo em uma determinada temperatura ou em diversas temperaturas sob uma taxa de aquecimento pré-determinada. Basicamente, o equipamento consiste em uma termobalança, com um computador capaz de registrar qualquer ganho ou perda de massa. Para experimentos com taxa de aquecimento constante, a massa é determinada em função da temperatura.

Em ensaios com a finalidade de seguir os compostos químicos gerados em determinadas reações, a TG (curva de perda em massa) é comumente usada juntamente com a DTG (primeira derivada da TG), que possibilita a identificação

mais nítida das temperaturas de pico (RAMACHANDRAN et al., 2002). Como cada composto químico possui temperaturas características para o pico de perda de água combinada, é possível identificar e quantificar os compostos presentes na amostra ensaiada.

Para caracterização dos agregados reciclados Cim e Cv foram realizadas análises termogravimétricas em termo-balança da marca Netzsch, modelo STA409 do Laboratório de Microestrutura (PCC/EPUSP) (Figura 16). As determinações foram realizadas e alíquotas de aproximadamente 1,0 g, sem repetições, com taxa de aquecimento de 10°C/min, até a temperatura de 1000° C. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 9 e 10, respectivamente para o agregado reciclado cimentício (Cim) e para o agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv). Os termogramas obtidos são apresentados no Apêndice A.

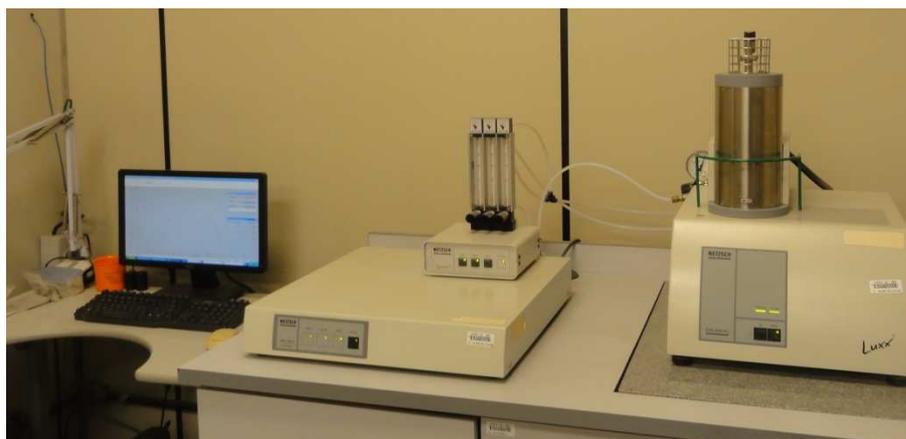


Figura 16 – Conjunto da termobalança utilizada nos ensaio de termogravimetria

Tabela 9 – Análise termogravimétrica do Cim

Evento	Intervalo de temperatura do pico de perda	% de perda
Água de C-S-H e fases sulfoalumináticas	100°C-200°C	4,39
Água de C-A-H	220°C-290°C	1,90
Água de Mg (OH) ₂	350°C-400°C	1,22
Água de Ca(OH) ₂ (portlandita)	480°C-650°C	0,64
CO ₂ dos carboaluminatos e dos carbonatos mal cristalizados	670°C-720°C	3,71
Total		11,86

Tabela 10 – Análise termogravimétrica do Cv

Evento	Intervalo de temperatura do pico de perda	% de perda
Água adsorvida de argilominerais	100°C-200°C	1,51
Água de argilominerais sem definição de pico característico de temperatura	220°C-290°C	0,13
Água de argilominerais que tem Mg na sua composição	350°C-400°C	0,21
Hidroxilas das espécies químicas Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃ de argilominerais sem definição de pico característico	480°C-650°C	0,65
Hidroxilas da flogopita	670°C-720°C	0,22
Total		2,72

3.2.2.4 Ensaio Chapelle modificado

Para a determinação da atividade pozolânica do agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv) foi realizado, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT, o ensaio Chapelle modificado, segundo a norma NBR 15895 (ABNT, 2010).

Sabe-se que pozolanicidade é a capacidade que o material pozolânico tem de reagir com o hidróxido de cálcio formando produto cimentante, geralmente o C-S-H.

No ensaio Chapelle modificado a pozolanicidade do material é medida pelo consumo de hidróxido de cálcio ocorrido durante o ensaio, por grama de material ensaiado, e é expresso em mg Ca(OH)₂/g de amostra. Para o agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv) o resultado obtido foi de **488 mg Ca(OH)₂/g de amostra.**

3.2.2.5 Determinação do resíduo insolúvel (RI)

Foi realizado no agregado reciclado cimentício (Cim) o ensaio de determinação gravimétrica do resíduo insolúvel, método empregado para cimento Portland, de acordo com a norma NBR NM 22 (ABNT, 2012). Além da caracterização do agregado reciclado cimentício (Cim), outro objetivo da realização deste ensaio foi estimar a quantidade de pasta de cimento existente no material.

Isto porque o cimento é quase totalmente solúvel em HCl (ácido clorídrico) (NEVILLE, 1998). Como o agregado reciclado cimentício (Cim) é composto,

basicamente, de resíduo cimentício, ou seja, argamassas e concretos, é possível admitir que de sua fração menor que 0,15 mm toda a parte solúvel em ácido clorídrico é pasta de cimento. Dessa forma, a partir do resultado do ensaio de resíduo insolúvel, é possível estimar o teor deste material pela equação 3.2.

$$\% \text{ de pasta de cimento} = 100 - \text{RI} \quad (3.2)$$

Onde:

RI - resultado do ensaio de determinação gravimétrica do resíduo insolúvel, %

A Tabela 11 apresenta o resultado obtido no ensaio de resíduo insolúvel e o resultado do teor de pasta de cimento estimado pela equação 3.2.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de resíduo insolúvel e da estimativa do teor de cimento no Cim

Parâmetro	Resultados (%)
Resíduo insolúvel em solução de 33% de HCl	49,8
Teor estimado de pasta de cimento	50,2

3.2.2.6 Discussões dos ensaios de caracterização química

Observando os resultados obtidos no ensaio de fluorescência de raios X (FRX), realizado no agregado reciclado cimentício (Cim), verifica-se a presença de óxidos CaO e SiO₂ em maiores porcentagens, indicando a existência de silicato de cálcio hidratado nos finos do Cim.

Os resultados obtidos no ensaio de FRX realizado no Cv indicam quantidade elevada de anidrido silícico e óxido de alumínio, pela presença de sílica e alumínio, indicativos da natureza cerâmica do material.

Nos ensaios de difração de raios X (DRX), realizados no agregado reciclado cimentício (Cim), foi identificada a presença de C₂S, comprovando a existência de partículas de cimento não hidratado. Como esperado, este ensaio indicou, ainda, a

presença de C-S-H, portlandita e etringita, certamente devidas à elevada quantidade de pasta de cimento hidratada, já que o resíduo que deu origem ao agregado reciclado em questão é predominantemente cimentício.

Os resultados do ensaio DRX realizado no agregado reciclado de cerâmica vermelha indicaram presença de fases mineralógicas comuns nas cerâmicas, sem relação com a ocorrência de reações pozolânicas, como o quartzo, feldspato e a mica, que apresentam sílica e alumínio em sua composição.

Assim como na difração de raios X, os ensaios de termogravimetria (TG) indicaram a presença de elevada quantidade de pasta de cimento hidratada no agregado reciclado cimentício, com a maior parte da perda de água combinada sendo relativa aos produtos de hidratação do cimento, como C-S-H, C-A-H e portlandita.

Da mesma forma, os ensaios de TG no agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv), indicaram a presença argilominerais, fases que não foram totalmente desidratadas durante o processo de calcinação.

Quanto ao ensaio Chapelle modificado pode-se considerar que o Cv é um material que apresenta potencial pozolânico, com resultado de 488 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de amostra no ensaio, pois para que um material seja considerado uma pozolana, segundo Raverdy et al. (1980), deve apresentar consumo mínimo de 330 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de amostra.

3.3 Dosagem das misturas

Para avaliar adequadamente o potencial reativo dos agregados reciclados em estudo, era necessária a proposição de misturas que combinassem esses materiais de uma forma que possibilitasse esta avaliação.

A primeira avaliação a ser feita era se, de fato, ocorreriam reações de hidratação do cimento anidro existente no agregado reciclado cimentício (Cim), sendo que, para isso, era necessário seguir suas reações de hidratação.

Outra necessidade foi avaliar o potencial que o hidróxido de cálcio (portlandita), remanescente da hidratação do cimento existente no concreto que

gerou o resíduo, teria para desenvolver a reação pozolânica, quando combinado com o agregado reciclado de cerâmica vermelha (pozolana). Para esta avaliação definiu-se que a mistura a ser estudada seria o Cim + Cv < 0,15 mm (pozolana) em quantidade suficiente para ativar o hidróxido de cálcio residual do Cim e desenvolver reação pozolânica.

Para verificar como o agregado reciclado cimentício se comportaria quando em uma dosagem com cimento, optou-se por utilizá-lo com adição de 4% de cimento Portland comum, porcentagem normalmente empregada em misturas do tipo brita graduada tratada com cimento (BGTC), comumente empregadas em pavimentação.

Para avaliar de que forma os dois agregados reciclados estudados se comportariam quando combinados de maneira integral, foi feita uma dosagem com 70% de Cim e 30% de Cv, com adição de cal CH-I em quantidade suficiente para ativar toda a pozolana disponível nesta mistura. Além disso, com o objetivo de avaliar todo o potencial de reatividade pozolânica do agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv), foi feita uma dosagem de Cv + cal CH-I, em quantidade suficiente para ativar toda a pozolana disponível no Cv.

Definidas as combinações das misturas a serem estudadas, foi necessário determinar os teores de cal e pozolana (Cv < 0,15 mm) a serem acrescentados, nas misturas que os empregaram, de modo a promover a ocorrência das reações pozolânicas, aproveitando o máximo potencial reativo dos agregados reciclados.

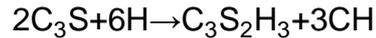
3.3.1 Metodologia utilizada

Para a determinação dos teores de hidróxido de cálcio e de pozolana nas misturas, foram efetuados cálculos estequiométricos utilizando as formulações teóricas da reação de hidratação do cimento e da reação pozolânica.

Basicamente, foi preciso determinar os teores relativos, em massa, do hidróxido de cálcio e da pozolana necessários ao desenvolvimento da reação pozolânica. Além disso, também foi estimada a quantidade de hidróxido de cálcio disponível no agregado reciclado cimentício (Cim). Para isso foram seguidas as etapas descritas nos itens 3.3.1.1 a 3.3.1.5.

3.3.1.1 Cálculo da massa atômica do hidróxido de cálcio na reação de hidratação do cimento

Admitindo-se que a hidratação do cimento se dá pela equação química 2.4, apresentada no Capítulo 2 desta tese, temos:



Sendo 3CH o hidróxido de cálcio gerado e, sabendo-se que C = CaO e H = H₂O, atribuindo-se as massas atômicas de cada um dos elementos (Tabela 11), tem-se:

$$3CH=3\times(40+16)+3\times[(2\times1)+16]=222 \text{ u}$$

Assim, a massa atômica de hidróxido de cálcio gerado na reação de hidratação do cimento é de **222 u**.

Tabela 12 – Massas atômicas dos elementos envolvidos na reação de hidratação do cimento e na reação pozolânica

Elemento químico	Massa atômica (u)
Ca	40
O	16
H	1
Si	28
Al	27
Mg	24

3.3.1.2 Cálculo da massa atômica da pozolana na reação pozolânica

Admitindo-se que a reação pozolânica ocorre segundo a equação química 2.6 apresentada no Capítulo 2, desta tese, tem-se:



Pela equação, sabe-se que a pozolana envolvida na reação é representada por 2S, sendo S = SiO₂. Assim, atribuindo-se as massas atômicas, tem-se:

$$2S=2\times[28+(2\times 16)]=120\text{ u}$$

Assim, a massa atômica de pozolana envolvida na reação pozolânica é de **120u**.

3.3.1.3 Determinação do teor relativo, em massa, de hidróxido de cálcio e pozolana na reação pozolânica

Após o cálculo das massas atômicas do hidróxido de cálcio e da pozolana, foi possível determinar o teor de cada um deles no desenvolvimento da reação pozolânica. Para isso, suas massas atômicas foram divididas pela massa atômica total do produto gerado na reação. Assim, da reação pozolânica apresentada no item 3.3.1.2 (equação química 2.6, do Capítulo 2) tem-se que o produto gerado é C₃S₂H₃, sendo C = CaO, S = SiO₂ e H = H₂O, atribuindo-se as massas atômicas, tem-se:

$$C_3S_2H_3=3\times(40+16)+2\times[28+(2\times 16)]+3\times(2+16)=342\text{u}$$

Então, para o hidróxido de cálcio a relação será:

$$\frac{3CH}{C_3S_2H_3}=\frac{222}{342}=0,65$$

E para a pozolana:

$$\frac{2S}{C_3S_2H_3} = \frac{120}{342} = 0,35$$

Dessa forma, é possível dizer que para o desenvolvimento da reação pozolânica a combinação entre hidróxido de cálcio e pozolana deve ser, em massa, de 65% de hidróxido de cálcio para 35% de pozolana.

3.3.1.4 Estimativa da quantidade de CH disponível no agregado reciclado cimentício (Cim)

Para estimar a quantidade de hidróxido de cálcio disponível no Cim, tomou-se como base a pesquisa realizada por Angulo et al. (2009), na qual os autores propõem uma metodologia de caracterização química e mineralógica para agregados reciclados de construção e demolição oriundos dos municípios de São Paulo e Vinhedo, ambos no Estado de São Paulo.

Nesta pesquisa, um dos agregados estudados é semelhante ao Cim empregado nesta tese, pois também foi produzido a partir do resíduo de concretos. Na pesquisa, os autores obtiveram, para este material, um teor de pasta de cimento de 37% e, por análise termogravimétrica realizada somente no resíduo insolúvel em solução de 33% de HCl, o hidróxido de cálcio (portlandita) determinado foi de 6,6%.

Como para o agregado reciclado cimentício (Cim) desta tese o teor de pasta de cimento estimado foi de **50,2%**, por relação, pode-se admitir que a fração menor que 0,15 mm possui **8,9% de hidróxido de cálcio**.

Assim, tendo o Cim 3,2% de fração menor que 0,15mm, o teor de **hidróxido de cálcio em relação à mistura total é de 0,28%** e, por relação, para reagir com a quantidade total de hidróxido de cálcio, a **pozolana necessária é de 0,15%, em relação à mistura total**.

3.3.1.5 Determinação dos teores de cal e pozolana nas misturas estudadas

Após a estimativa da quantidade de hidróxido de cálcio disponível no Cim e da relação de hidróxido de cálcio e pozolana necessários para o desenvolvimento da reação pozolânica, foi possível calcular os teores de cal e pozolana para as misturas nas quais estes materiais foram utilizados: Cim+Cv<0,15mm; 70% Cim+30%Cv+Cal e Cv+Cal. As quantidades de cal (CH-I) e pozolana (Cv < 0,15mm) a serem acrescentadas nestas misturas são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Quantidade de cal e pozolana a ser acrescentada nas misturas Cim+Cv<0,15mm, 70% Cim+30%Cv+Cal e Cv+Cal

Denominação da Mistura	% de material à acrescentar em relação à mistura total	
	Cal CH-I	Pozolana (fração de Cv < 0,15 mm)
Cim+Cv<0,15mm	-	0,15
70%Cim+30%Cv+cal	6,3	-
Cv+cal	18,6	-

3.3.1.6 Misturas estudadas

Após o cálculo dos teores de cal e pozolana para as misturas nas quais estes materiais foram utilizados, têm-se, então, cinco misturas a serem estudadas, enumeradas a seguir:

- ✓ Cim: agregado reciclado cimentício (Cim) puro para a verificação da ocorrência de hidratação do cimento anidro residual. A partir deste item, esta mistura receberá a denominação de **Cim**.
- ✓ Cim+0,15%Cv<0,15mm: agregado reciclado cimentício (Cim) com adição de 0,15% de agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv) na fração menor que 0,15 mm, considerada como pozolana. A partir deste item, esta mistura receberá a denominação de **Cim+Cv<0,15mm**.
- ✓ Cim + 4% cimento Portland: agregado reciclado cimentício (Cim) com adição de 4% de cimento Portland, para avaliação do comportamento do Cim com este tipo de adição. A partir deste item, esta mistura receberá a denominação de **Cim+cP**.

- ✓ 70%Cim+30%Cv+6,3% cal CH-I: Combinação em massa de 70% de agregado reciclado cimentício (Cim) com 30% de agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv) e 6,3% de cal CH-I, para avaliar o comportamento da combinação dos dois resíduos de maneira integral, com a adição de cal para o aproveitamento total do potencial pozolânico oferecido pela combinação. A partir deste item, esta mistura receberá a denominação de **70%Cim+30%Cv+cal**.
- ✓ Cv+18,6% cal CH-I: combinação do agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv) com cal CH-I para explorar todo o potencial de desenvolvimento de reação pozolânica que o material apresenta e possibilitar a avaliação do comportamento desta mistura. A partir deste item esta mistura receberá a denominação de **Cv+cal**.

3.3.2 Compactação

Para determinação da umidade ótima ($w_{ótima}$) e da massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d \text{ máx}}$), das misturas estudadas, foram realizados ensaios de compactação, sem reuso de material, na energia modificada, de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 1988b). Os resultados obtidos para as respectivas misturas, inclusive para a BGS estudada, estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de compactação na energia modificada

Misturas	$w_{ótima}$ (%)	$\rho_{d \text{ máx}}$ (kg/m ³)
Cim	9,4	1988
Cim+Cv<0,15mm		
Cim+cP		
70%Cim+30%Cv+cal	11,4	1874
Cv+cal	20,1	1570
BGS	3,0	2250

Legenda: $w_{ótima}$ – umidade ótima; $\rho_{d \text{ máx}}$ - massa específica aparente seca máxima.

Para realização dos ensaios mecânicos, os corpos de prova de cada uma das misturas foram moldados utilizando a umidade ótima ($w_{ótima}$) e a massa específica seca máxima ($\rho_{d\ máx}$), determinadas nos ensaios de compactação.

3.3.3 Composição granulométrica das misturas

Para cada mistura estudada foi feita composição de acordo com a dosagem realizada e, em seguida, foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento e também utilizando o equipamento camsizer. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 17 a 19.

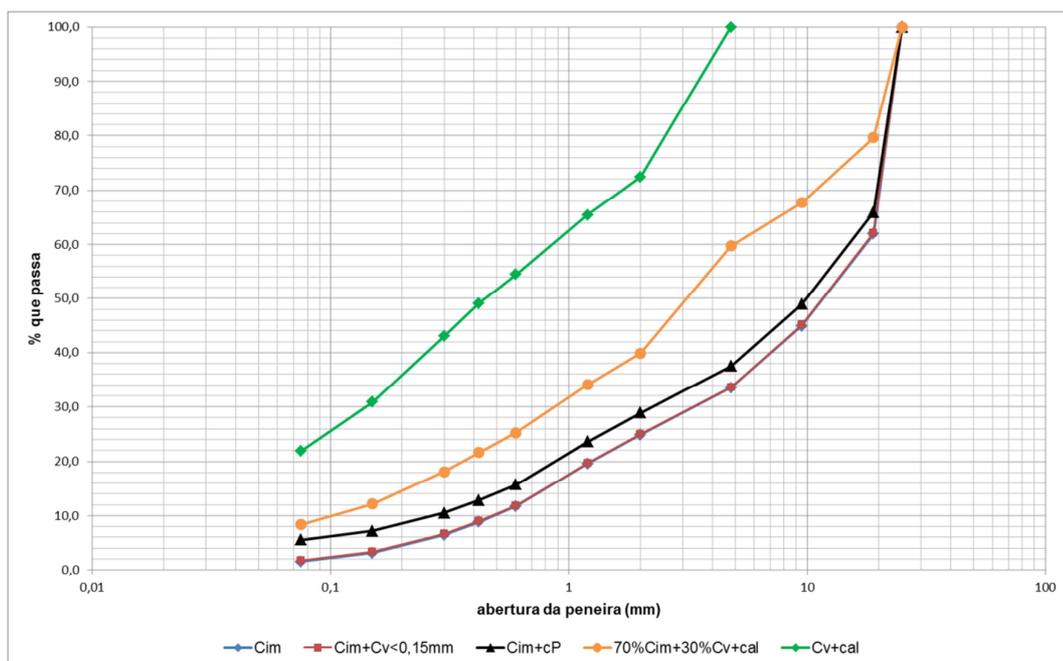


Figura 17– Curvas granulométricas por peneiramento das misturas estudadas, obtidas pelo método NBR 7181 (ABNT, 1988a), em porcentagem de massa

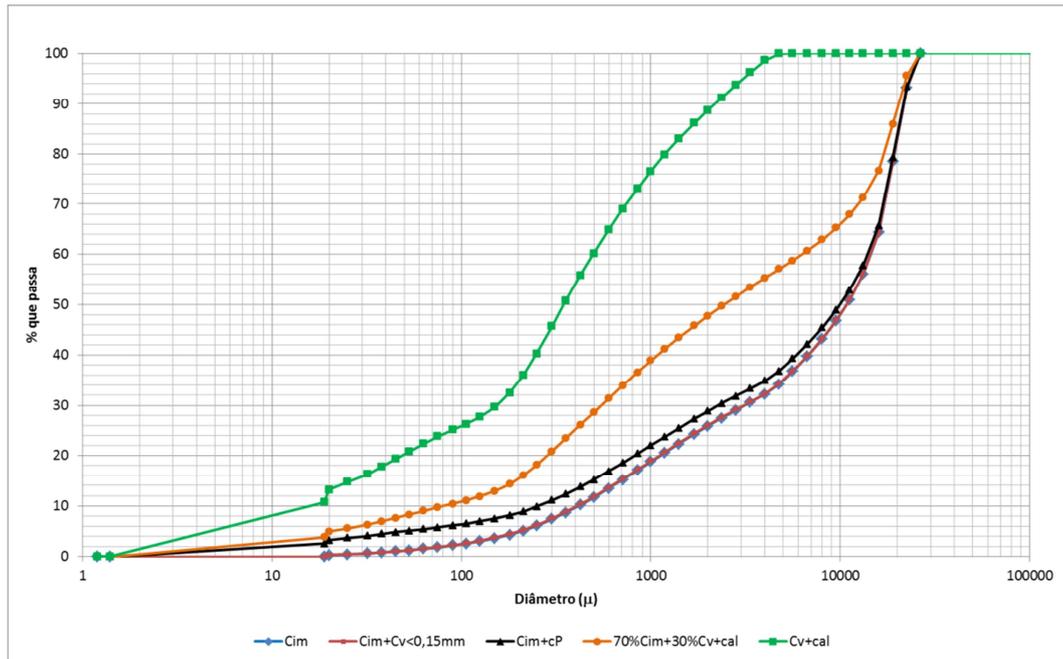


Figura 18– Curvas granulométricas das misturas estudadas, obtidas pelo equipamento Camsizer, em porcentagem de massa

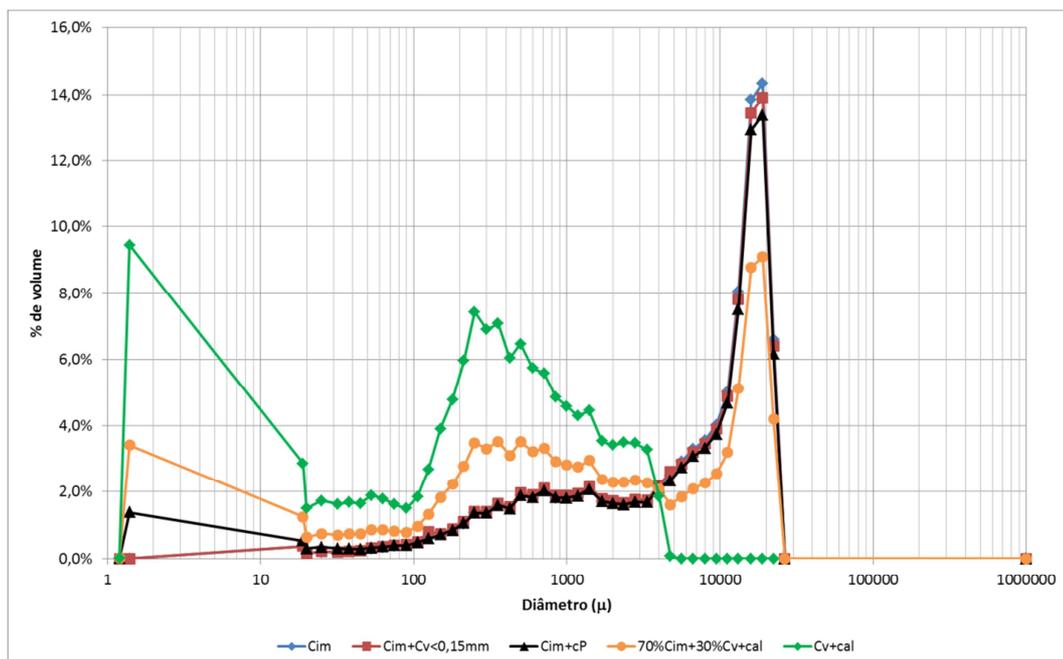


Figura 19 – Curvas granulométricas das misturas estudadas, obtidas pelo equipamento Camsizer, em porcentagem de volume retido

A partir das curvas de granulometria obtidas em porcentagem de massa foram calculados os parâmetros granulométricos preconizados pela NBR 15115 (ABNT, 2004a), cujos resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros granulométricos para as misturas estudadas

Parâmetros	Misturas				
	Cim	Cim+Cv<0,15mm	Cim+cP	70%Cim+30%Cv+cal	Cv+cal
Dimensão característica máxima dos grãos (mm)	25	25	25	25	4,8
Porcentagem que passa na peneira 0,42mm	8,9	9,0	12,9	21,7	49,1
Coeficiente de não uniformidade (Cu)	41	41	35	50	60

3.3.4 Considerações acerca da metodologia e dos ensaios relativos à dosagem das misturas

A dosagem realizada para potencializar a reatividade pozolânica e hidratação do cimento residual anidro presentes nos agregados reciclados, gerou misturas com granulometrias que apresentam elevada quantidade de finos, principalmente nos casos em que se utiliza o agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv), por esse motivo a determinação da granulometria em porcentagem de massa também foi determinada utilizando os resultados obtidos no ensaio com equipamento Camsizer, pois assim foi possível determinar com maior detalhe a quantidade de frações finas, principalmente com diâmetros menores que 0,15 mm por ser esta a porção considerada de maior potencial reativo.

Dos resultados obtidos para os parâmetros granulométricos, cabe observar que os coeficientes de uniformidade (Cu) apresentaram valores elevados (maiores que 35) indicando a não uniformidade das granulometrias, característica desejável por indicar a presença de grãos de diversos tamanhos, o que irá conferir as misturas em estudo um maior entrosamento entre seus agregados gerando uma tendência de maior estabilidade após compactação.

3.4 Ensaios para avaliação das reações químicas

Para possibilitar a análise das reações químicas ocorridas, foram realizados ensaios em pastas das misturas, ou seja, somente na combinação das frações finas com adição de água. Como só seriam empregados os materiais em frações menores

que 0,15 mm, foram efetuados os cálculos para cada uma das cinco misturas, de modo que as proporções entre as frações finas dos diferentes materiais fossem mantidas.

Assim, fixou-se a relação água / material seco em 0,48, valor geralmente utilizado para pastas de cimento, para todas as misturas e, em seguida, foram calculadas as quantidades de cada um dos materiais a serem empregados. As composições utilizadas são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Porcentagens e quantidades de material empregados para moldagem das pastas

Misturas	% de material fino (< 0,15 mm) em relação à mistura				% de material em relação aos finos (< 0,15mm)				Quantidade de material empregado na moldagem das pastas (g)				
	Cim	Cv	Cimento	Cal CH-I	Cim	Cv	Cimento	Cal CH-I	Cim	Cv	Cimento	Cal CH-I	Água
Cim	3,20	-	-	-	100	-	-	-	400,0	-	-	-	192,0
Cim+Cv<0,15mm	3,20	0,15	-	-	95,52	4,48	-	-	382,1	17,9	-	-	192,0
Cim+cP	3,20	-	4,00	-	44,44	-	55,56	-	177,8	-	222,2	-	192,0
70%Cim+30%Cv+cal	2,25	3,7	-	6,3	17,79	29,25	-	52,96	71,2	117,0	-	211,9	192,0
Cv+cal	-	12,2	-	18,60	-	39,61	-	60,39	-	158,4	-	241,6	192,0

Definidas as quantidades dos materiais, as pastas foram preparadas em misturador utilizado para esta finalidade, no Laboratório de Microestrutura do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP (PCC/EPUSP).

Após a mistura, as pastas obtidas foram divididas em três porções iguais, uma para cada idade de ensaio, sendo acondicionadas em potes plásticos fechados, e armazenadas em câmara seca até que atingissem a idade de cura para a realização dos ensaios. Os ensaios para avaliação das reações químicas ocorridas foram realizados nas idades de 7, 28 e 91 dias, para acompanhar a evolução da cura ao longo do tempo.

3.4.1 Preparação das amostras para o ensaio: Congelamento, liofilização e moagem

Após a cura das pastas moldadas com os finos das misturas estudadas, conforme descrito anteriormente, a hidratação foi interrompida nas idades determinadas para realização dos ensaios, 7, 28 e 91 dias, pelo método de congelamento e liofilização.

O congelamento é feito colocando-se a amostra em freezer na temperatura de aproximadamente -30°C , durante 24 horas.

Em seguida, é realizada a liofilização, que é o processo de retirada da água presente no material e consiste em colocar a amostra congelada no equipamento e aplicar alta pressão de vácuo, o que impede o descongelamento e, automaticamente, transforma a água em vapor, que em seguida é condensada no condensador do equipamento, voltando à fase líquida.

Para esta tese a liofilização das pastas foi realizada no liofilizador do Laboratório de Ensaio Especiais do PCC/EPUSP (Figura 20).



Figura 20 – Liofilizador utilizado para liofilização das pastas estudadas

Após a liofilização, as amostras foram moídas utilizando-se almofariz e mão de gral até serem totalmente passantes na peneira de abertura 0,075 mm (#200) sendo mantidas em dessecador com sílica gel, para aguardarem o momento de realização dos ensaios de difração de raios X e termogravimetria.

3.4.2 Difração de raios X (DRX)

Os ensaios de difração de raios X realizados, segundo o mesmo princípio da técnica descrito no item 3.2.2.2, nas pastas das cinco misturas estudadas tiveram como objetivo a identificação das fases mineralógicas geradas pelas reações químicas ao longo do tempo e, através destas, comprovar a ocorrência das reações pozolânicas e reações de hidratação das partículas de cimento anidro ainda presentes no resíduo.

Os ensaios nas pastas também foram realizados em difratômetro, com análise pelo método do pó, do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT, mesmo equipamento descrito no item 3.2.2.2 nas condições indicadas na Tabela 7. As fases identificadas nas pastas ensaiadas nas idades de cura de 7, 28 e 91 dias são apresentadas na Tabela 17. Os difratogramas obtidos nestes ensaios são apresentados no Apêndice A.

3.4.3 Termogravimetria (TG)

Sobre as pastas foram realizados ensaios de termogravimetria, nas idades de cura de 7, 28 e 91 dias, com a finalidade de seguir as reações de hidratação do cimento anidro e reações pozolânicas. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 18 a 22 e os termogramas de cada um dos ensaios são apresentados no Apêndice A.

Tabela 18 – Análise termogravimétrica da mistura Cim

Evento térmico	Intervalo de temperatura do pico de perda	% de perda			
		Inicial	7 dias	28 dias	91 dias
Água de C-S-H e fases sulfoalumináticas	100°C-200°C	4,39	3,45	2,52	3,30
Água de C-A-H	220°C-290°C	1,90	1,51	1,55	1,68
Água de Mg (OH) ₂	350°C-450°C	1,22	2,27	2,14	2,67
Água de Ca(OH) ₂ (portlandita)	480°C-650°C	0,64	0,96	0,91	0,94
CO ₂ dos carboaluminatos e dos carbonatos mal cristalizados	670°C-720°C	3,71	2,52	2,59	3,15
Total de hidratos		8,15	8,19	7,12	8,59
Total		11,86	10,71	9,71	11,74

Tabela 19 – Análise termogravimétrica da mistura Cim+Cv<0,15mm

Evento térmico	Intervalo de temperatura do pico de perda	% de perda			
		Inicial*	7 dias	28 dias	91 dias
Água de C-S-H e fases sulfoalumináticas	100°C-200°C	4,38	3,20	1,58	3,22
Água de C-A-H	220°C-290°C	1,90	1,49	2,21	1,74
Água de Mg (OH) ₂	350°C-450°C	1,22	0,82	2,16	2,51
Água de Ca(OH) ₂ (portlandita)	480°C-650°C	0,64	2,07	0,92	0,72
CO ₂ dos carboaluminatos e dos carbonatos mal cristalizados	670°C-720°C	3,70	2,57	2,45	3,05
Total de hidratos		8,14	7,58	6,87	8,19
Total		11,84	10,15	9,32	11,24

*Resultado calculado a partir do resultado do ensaio de termogravimetria realizado no Cim (Tabela 9)

Tabela 20 – Análise termogravimétrica da mistura Cim+cP

Evento térmico	Intervalo de temperatura do pico de perda	% de perda			
		Inicial*	7 dias	28 dias	91 dias
Água de C-S-H e fases sulfoalumináticas	100°C-200°C	4,21	6,04	4,74	11,90
Água de C-A-H	220°C-290°C	1,82	0	0	0
Água de Mg (OH) ₂	350°C-450°C	1,17	2,94	3,78	3,16
Água de Ca(OH) ₂ (portlandita)	480°C-650°C	0,61	2,68	6,38	6,67
CO ₂ dos carboaluminatos e dos carbonatos mal cristalizados	670°C-720°C	3,56	0	0	0
Total de hidratos		7,82	11,66	14,90	21,73
Total		11,39	11,66	14,90	21,73

*Resultado calculado a partir do resultado do ensaio de termogravimetria realizado no Cim (Tabela 9)

Tabela 21 – Análise termogravimétrica da mistura 70%Cim+30%Cv+cal

Evento térmico	Intervalo de temperatura do pico de perda	% de perda			
		Inicial**	7 dias	28 dias	91 dias
Água de C-S-H e fases sulfoalumináticas	100°C-200°C	3,07	2,70	3,04	4,22
Água de C-A-H	220°C-290°C	1,33	0,78	2,14	2,34
Água de Mg (OH) ₂	350°C-450°C	0,85	5,33	5,24	5,78
Água de Ca(OH) ₂ (portlandita)	480°C-650°C	13,59	5,29	4,53	3,92
CO ₂ dos carboaluminatos e dos carbonatos mal cristalizados	670°C-720°C	0	0	0	0
Total de hidratos		5,26	14,10	14,95	16,26
Total		18,85	14,10	14,95	16,26

**Resultado calculado a partir dos resultados dos ensaios de termogravimetria realizados no Cim e no Cv (Tabelas 9 e 10)

Tabela 22 – Análise termogravimétrica da Cv+cal

Evento térmico	Intervalo de temperatura do pico de perda	% de perda			
		Inicial***	7 dias	28 dias	91 dias
Água de C-S-H e fases sulfoalumináticas	100°C-200°C	0	2,37	2,87	4,06
Água de C-A-H	220°C-290°C	0	1,27	1,99	2,36
Água de Mg (OH) ₂	350°C-450°C	0	5,31	6,14	6,89
Água de Ca(OH) ₂ (portlandita)	480°C-650°C	14,56	6,39	5,83	5,42
CO ₂ dos carboaluminatos e dos carbonatos mal cristalizados	670°C-720°C	0	0	0	0
Total de hidratos		0	15,34	16,83	18,73
Total		14,56	15,34	16,83	18,73

*** Resultado calculado a partir do resultado do ensaio de termogravimetria realizado no Cv (Tabela 10) e admitindo que a composição da cal CH-I é de 100% Ca(OH)₂ (portlandita).

3.4.3.1 Determinação do volume de hidratos produzidos nas misturas com a evolução da cura

A partir dos resultados das porcentagens de perda de água combinada obtidos nos ensaios de TG, foram efetuadas as estimativas dos volumes de cada um dos produtos de hidratação gerados pelas reações ocorridas, nas misturas em estudo.

Inicialmente, foi necessária a obtenção do valor da relação em massa entre a água combinada e o composto químico (hidrato) propriamente dito. Em seguida, foram determinadas as porcentagens em massa destes hidratos nas misturas e, com estes valores, foi possível estimar suas porcentagens de volumes, nas três idades de cura, para cada uma das misturas estudadas.

As porcentagens estimadas para os volumes de hidratos produzidos em cada uma das idades de cura são apresentadas na Tabela 22.

Os cálculos para a estimativa da porcentagem de volume são apresentados no Apêndice B, para o exemplo do C-S-H, na mistura Cim aos 7 dias de cura.

Tabela 23 – Porcentagens de volumes de hidratos estimados para as misturas estudadas

Hidratos	Relação composto/ água	Massa específica (kg/m ³) (TAYLOR, 1990)	% de volume em relação à mistura														
			Cim			Cim+Cv<0,15mm			Cim+cP			70%Cim+30%Cv+cal			Cv+cal		
			7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias	7 dias	28 dias	91 dias
C-S-H	6,33	2200	0,357	0,261	0,342	0,346	0,171	0,348	1,298	1,019	2,558	0,999	1,125	1,561	2,023	2,449	3,465
C-A-H	3,45	2527	0,074	0,140	0,083	0,076	0,113	0,089	0,000	0,000	0,000	0,137	0,376	0,411	0,514	0,806	0,956
Mg(OH) ₂	3,23	2390	0,110	0,204	0,130	0,042	0,110	0,128	0,297	0,382	0,319	0,926	0,911	1,005	2,128	2,461	2,762
Ca(OH) ₂	4,17	2230	0,065	0,093	0,063	0,146	0,065	0,051	0,374	0,891	0,932	1,272	1,089	0,943	3,544	3,233	3,006
% total de volume estimada			0,607	0,698	0,618	0,610	0,459	0,616	1,969	2,292	3,808	3,334	3,501	3,920	8,209	8,950	10,188

3.4.4 Discussões dos resultados dos ensaios para avaliação das reações ocorridas

Os ensaios de DRX realizados no agregado reciclado Cim apresentaram fases mineralógicas semelhantes nas três idades de cura e, ao contrário do esperado, não verificaram a presença de portlandita (Ca(OH)_2). É provável que a portlandita tenha tido seu pico difratométrico sobreposto por outra fase mineralógica, prejudicando sua identificação. Foram encontrados, ainda, silicatos anidros (C_2S), indicativos da existência de partículas de cimento ainda não hidratadas nas três idades de cura.

A presença de portlandita nesta mistura foi confirmada pelos ensaios de termogravimetria (TG), que resultaram em perda de água combinada com temperatura de pico relativa a esta fase mineralógica nas três idades de cura, com aumento da condição inicial (0 dias) para os 91 dias de cura, indicando a ocorrência de reação de hidratação do cimento anidro.

Dessa forma, os eventos térmicos e o aumento dos produtos de hidratação do cimento observados com a evolução da cura, comprovam a ocorrência de reações de hidratação do cimento anidro existente no agregado reciclado.

Aos ensaios de DRX na mistura Cim+Cv<0,15mm cabem as mesmas observações efetuadas para a mistura Cim. Porém, os ensaios de TG realizados nas três idades de cura apresentaram perda de água combinada com temperaturas de pico características de C-A-H em quantidade crescente no período entre 7 e 91 dias, e de portlandita que apresentou aumento aos 7 dias, e posterior diminuição aos 28 e aos 91 dias, o que indica o seu consumo pela adição de pozolana (Cv < 0,15mm) e desenvolvimento de reação pozolânica.

Na mistura Cim+cP o ensaio de DRX identificou silicatos anidros C_2S e C_3S , em sua maioria provenientes do cimento Portland adicionado à mistura. Observou-se que o C_3S aparece somente aos 7 dias de cura, isso porque este silicato reage mais rapidamente com a água, sendo totalmente consumido logo nas primeiras idades de hidratação, enquanto o C_2S apresenta velocidade de

hidratação mais lenta e, por isso, foi identificado pelo DRX nas outras duas idades de cura (28 e 91 dias).

Os ensaios de termogravimetria (TG) nesta mistura apresentaram, quando comparados com as outras misturas estudadas, elevada porcentagem de perda de água combinada, relativa à presença de C-S-H e portlandita, o que, certamente, se deve à adição dos 4% de cimento Portland.

Na mistura 70%Cim+30%Cv+cal, os ensaios de DRX identificaram a existência de portlandita e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) nas três idades de cura, o que tanto pode indicar a ocorrência de reação pozolânica desde as primeiras idades de cura, como pode ser proveniente dos finos do agregado reciclado cimentício (Cim), embora em menor quantidade, presentes na mistura.

Já os ensaios de TG realizados nesta mistura possibilitaram a constatação da ocorrência da reação pozolânica, com aumento significativo do C-S-H e do C-A-H na evolução da cura (da condição inicial para 91 dias). Fato que pode ser reafirmado pela ocorrência de diminuição da portlandita neste mesmo período.

Cabe ressaltar que o valor inicial para a perda de água combinada referente à portlandita inclui a cal CH-I adicionada, por isso o resultado é elevado.

Aqui os resultados dos ensaios comprovaram que a combinação dos dois resíduos de forma integral com a cal, conforme proposta desta mistura, promoveu a ocorrência de reação pozolânica.

Na mistura Cv+cal os ensaios de TG confirmam a presença de C-S-H e C-A-H já aos 7 dias de cura, com aumento significativo destes produtos durante a evolução da cura, comprovando a ocorrência de reação pozolânica pela combinação proposta. Outra constatação importante deste ensaio foi a presença de portlandita, cuja quantidade é diminuída ao longo das idades avaliadas..

Os ensaios de termogravimetria, realizados nas cinco misturas estudadas, constataram o crescimento da quantidade de produtos hidratados com a evolução da cura, o que comprova a ocorrência das reações pozolânica

e de hidratação de cimento residual nas misturas propostas, como se pretendia.

As estimativas de volume de hidratos produzidos indicaram o aumento destes ao longo das idades de hidratação nas misturas estudadas, corroborando com os resultados dos ensaios de TG.

3.5 Avaliação do empacotamento

Para avaliação das características de empacotamento das misturas estudadas foram efetuados os cálculos de suas porosidades (η) e densidades relativas de empacotamento (ρ_{emp}), utilizando, respectivamente, as equações 2.6 e 2.7 apresentadas no capítulo 2 desta tese.

Para a determinação da porosidade total (η_{total}), utilizou-se a massa específica dos grãos real enquanto que para o cálculo da porosidade da mistura ($\eta_{mistura}$) utilizou-se a massa específica dos grãos aparente, ou seja, a porosidade total contempla também os vazios dos grãos, já a da mistura contempla somente os vazios existentes entre os grãos, sendo representativa do arranjo granulométrico obtido após a compactação da mistura.

Os resultados obtidos para as porosidades estão apresentados na Figura 21 e para as densidades relativas de empacotamento na Figura 22.

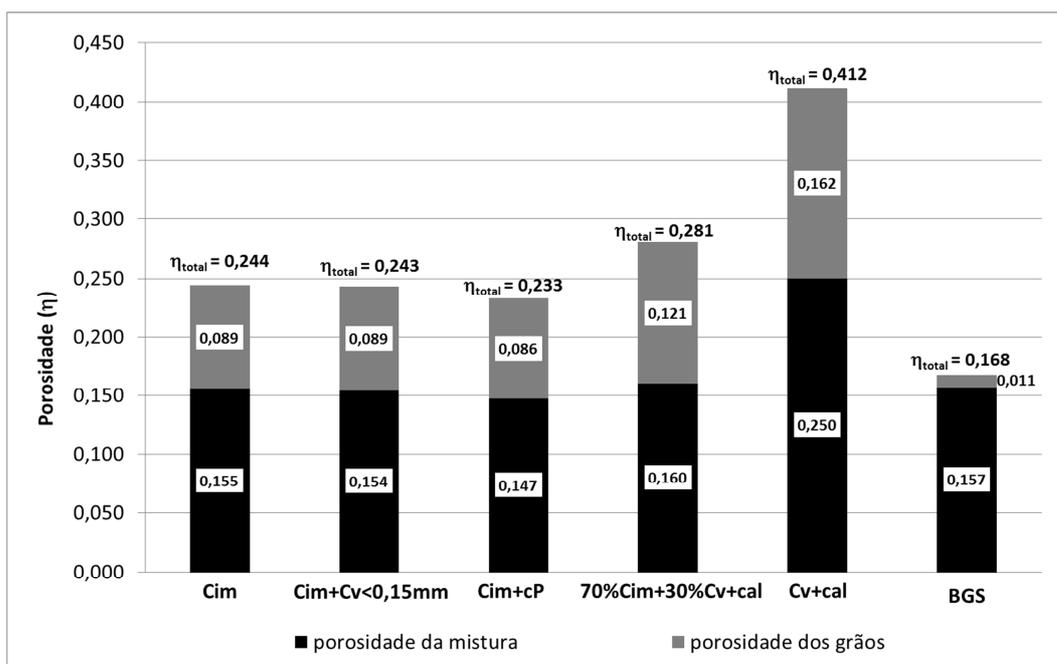


Figura 21 – Porosidade (η) das misturas estudadas

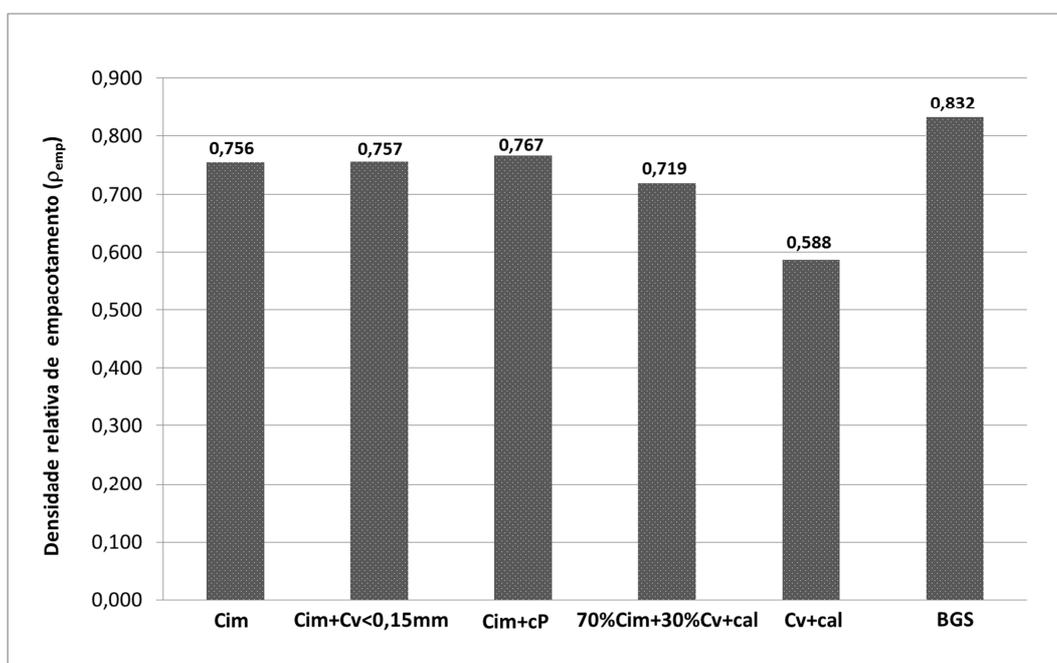


Figura 22– Densidade relativa de empacotamento (ρ_{emp}) para as misturas estudadas

Cabe observar que para efetuar os cálculos dos parâmetros de empacotamento (η e ρ_{emp}), foram consideradas as massas específicas aparentes secas (ρ_d) médias de todos os corpos de prova moldados para cada uma das misturas. Essa prática foi adotada para possibilitar uma melhor

análise entre os parâmetros de empacotamento e os resultados obtidos nos ensaios mecânicos realizados nestes corpos de prova.

3.5.1 Estimativa da diminuição da porosidade com o aumento do volume de hidratos produzidos pelas reações químicas de hidratação e pozolânica

Conforme apresentado no item 3.4.3.1, a partir dos resultados dos ensaios de termogravimetria foi possível estimar a porcentagem de volume de hidratos produzidos nas misturas estudadas. Considerando que estes hidratos preenchem os vazios existentes nas misturas, o volume de vazios inicial (logo após a compactação) será alterado ao longo da cura, contribuindo para diminuir a porosidade das misturas estudadas.

Partindo deste princípio, foram estimadas as porcentagens de volumes de vazios para cada mistura estudada nas três idades de cura e, em seguida, foram estimadas as porosidades. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 24 e na Figura 23.

Tabela 24 – Porosidades estimadas considerando o aumento no volume de hidratos com a evolução da cura

Mistura	Porosidade total (η_{total})			
	Inicial	7 dias	28 dias	91 dias
Cim	0,244	0,235	0,234	0,235
Cim+Cv<0,15mm	0,243	0,234	0,237	0,234
Cim+cP	0,233	0,214	0,209	0,186
70%Cim+30%Cv+cal	0,281	0,205	0,203	0,197
Cv+cal	0,412	0,253	0,245	0,233
BGS	0,168	-	-	-

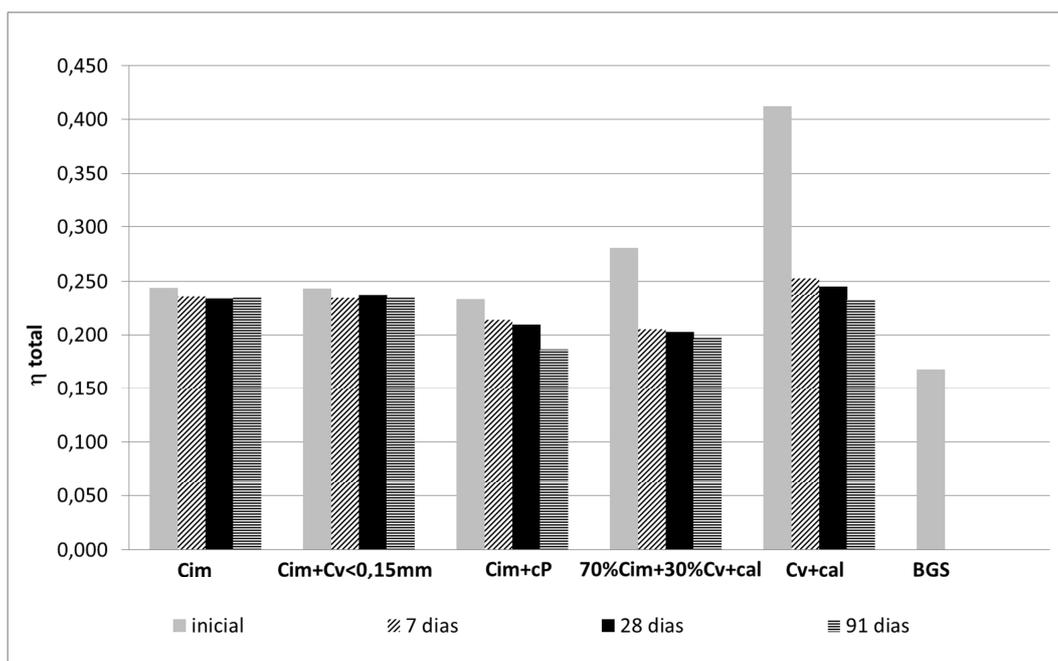


Figura 23 – Comparativo de η_{total} ao longo da cura

3.5.2 Discussões dos resultados relativos ao empacotamento das misturas estudadas

A análise do empacotamento das misturas em estudo permitiu verificar que a BGS é a menos porosa das misturas estudadas, com porosidade total de 0,172. Isso ocorre porque, embora a BGS apresente o mesmo arranjo granulométrico das misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm, seus agregados de origem natural são menos porosos e contribuem pouco na porosidade total. Já as misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm, empregam grãos de agregado reciclado cimentício que são mais porosos e que contribuem de forma mais significativa no valor da porosidade total. Sendo assim, embora as três misturas apresentem arranjo granulométrico semelhante, a BGS é a menos porosa que as outras.

Com maiores porosidades aparecem as misturas 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal, pois possuem maiores porosidades tanto para a mistura ($\eta_{mistura}$) quanto para os grãos ($\eta_{mistura}$), acarretando maiores valores para a porosidade total. Nestas misturas a porosidade dos grãos tem contribuição relevante, chegando a pouco mais de 40% na porosidade total de ambas.

Nestas misturas a porosidade mais elevada também pode ter contribuição da flocculação gerada pela adição de cal ao Cv, isso porque quando se adiciona cal a este tipo de material, que apresenta plasticidade elevada, são geradas as chamadas reações imediatas (ou “antes da cura”) que, conforme descrito no item 2.3.4 quando foram citadas as reações ocorridas no solo-cal, ocorrem na superfície das partículas modificando as forças e arranjo entre elas, formando uma estrutura flocculada na qual os microagregados se comportam com grãos (BOSCOV, 1990).

Para as densidades relativas de empacotamento (ρ_{emp}), nota-se que a diferença entre o valor para as misturas Cim, Cim+Cv<0,15mm, Cim+cP e 70%Cim+30%Cv+cal é pequena, sendo a máxima diferença 0,05, entre as misturas Cim+cP e 70%Cim+30%Cv+cal.

A mistura Cv+cal apresentou densidade relativa de empacotamento abaixo de todas as outras misturas estudadas, com valor de 0,588, o que era esperado, considerando a elevada porosidade que esta apresenta.

A BGS apresenta densidade relativa de empacotamento (ρ_{emp}) mais elevada que as outras cinco misturas, isso devido à baixa porosidade de seus grãos, o que resultou em maior massa específica destes e, conseqüentemente, em maior densidade relativa de empacotamento.

A análise da variação das porosidades totais permitiu verificar que em todas as misturas estudadas ocorreu diminuição deste parâmetro com a evolução da cura, devido ao aumento do volume de hidratos.

A diminuição mais significativa ocorreu nas misturas que empregaram o agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv) integral, pois, considerando o período de 91 dias de cura, a mistura 70%Cim+30%Cv+cal apresentou diminuição na porosidade total de 30% e a mistura CV+cal de 43%, comprovando a eficiência das reações pozolânica ocorridas.

Embora de forma menos significativa, as outras três misturas também apresentaram diminuição da porosidade total, sendo de aproximadamente 4% nas misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm e de 10% na mistura Cim+cP.

3.6 Ensaios para avaliação do comportamento mecânico

Para avaliação do comportamento mecânico das cinco misturas, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e módulo de resiliência nas idades de 7, 28 e 91 dias. Foram também realizados ensaios de deformação permanente sobre as misturas Cim, Cim+cP, 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal, na idade de 91 dias e na BGS.

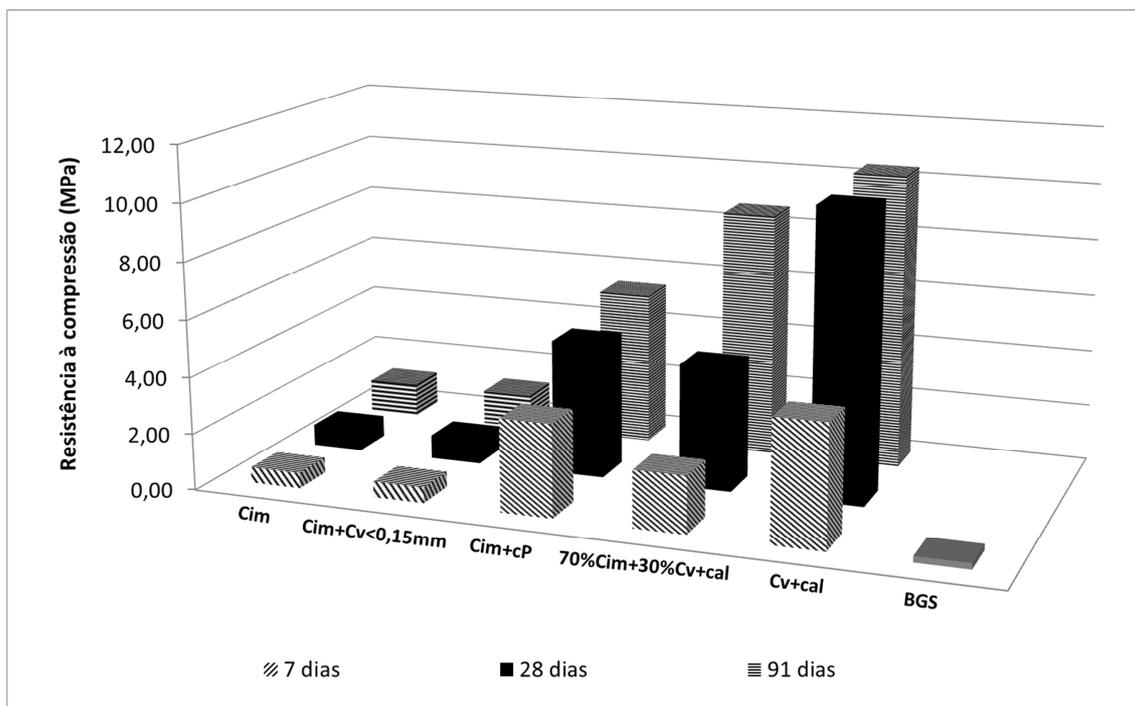
3.6.1 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples tem como objetivo a determinação da máxima tensão axial, que pode ser aplicada a um corpo de prova sem que esse seja levado à ruptura. Em geral, este tipo de ensaio, quando utilizado na avaliação de materiais para camadas de pavimentos, é realizado em materiais cimentados ou melhorados com cimento, devido à elevada rigidez que esses apresentam.

Nesta pesquisa os ensaios foram conduzidos em corpos de prova cilíndricos com dimensões 100 mm x 200 mm, de acordo com procedimento descrito pela norma ASTM D 1633 (ASTM, 2007), nas idades de cura de 7, 28 e 91 dias, em máquina universal de ensaios da Seção de Geotecnia do IPT. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 25 e na Figura 24.

Tabela 25 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples

Mistura	Idade de cura (dias)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão
BGS	-	0,22	0,031
Cim	7	0,55	0,084
	28	0,76	0,092
	91	1,20	0,053
Cim+Cv<0,15mm	7	0,55	0,048
	28	0,85	0,022
	91	1,24	0,010
Cim+cP	7	3,28	0,725
	28	4,76	0,217
	91	5,43	0,219
70%Cim+30%Cv+cal	7	2,01	0,402
	28	4,37	0,887
	91	8,69	0,490
Cv+cal	7	4,30	0,349
	28	10,20	0,093
	91	10,44	0,327

**Figura 24 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples**

As cinco misturas estudadas apresentaram ganho de resistência à compressão simples com a evolução do processo de cura, sendo mais significativo na mistura 70%Cim+30%Cv+cal, que apresentou aumento de

332% no período de 7 para 91 dias passando de 2,01 MPa aos 7 dias para 8,69 MPa aos 91 dias.

Notam-se valores de resistência à compressão simples bastante elevados em todas as misturas, principalmente para a Cv+cal que apresentou, já aos 7 dias, resistência à compressão de 4,3 MPa, chegando a 10,2 MPa aos 28 dias e ficando praticamente estabilizada dos 28 aos 91 dias com resultado, nesta última idade, de 10,4 MPa.

As misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm apresentaram resultados muito semelhantes e com aumento bastante significativo entre as idades de cura consideradas (7, 28 e 91 dias), tendo, em ambos os casos, um ganho de mais de 100% nas resistências a compressão, que passaram de valores da ordem de 0,5 MPa para aproximadamente 1,0 MPa.

3.6.2 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência indica a capacidade que o material tem de se recuperar após ter sido submetido a determinados esforços, ou seja, indica a rigidez que este material apresenta frente às solicitações impostas.

Segundo Medina e Motta (2005), o termo resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações; corresponde a energia potencial de deformação.

O módulo de resiliência é reconhecidamente um parâmetro de grande importância para o dimensionamento das estruturas dos pavimentos, pois, segundo Bernucci et al. (2006), indica uma propriedade básica do material que pode ser utilizada na análise mecanicista de sistemas de múltiplas camadas, além de ser um método aceito internacionalmente para caracterizar materiais tanto para projetos quanto para avaliações de desempenho de pavimentos.

Nesta tese os ensaios foram realizados de acordo com a norma AASHTO T 307 (AASHTO, 1999), em equipamento pneumático triaxial com aplicação de carga cíclica, no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do

Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP (LTP-PTR/EPUSP).

Os ensaios foram conduzidos em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm das cinco misturas estudadas, nas idades de cura: 7, 28 e 91 dias, e da BGS.

Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 25 a 29. O resultado obtido para a BGS é apresentado na Figura 25 juntamente com os resultados da mistura Cim.

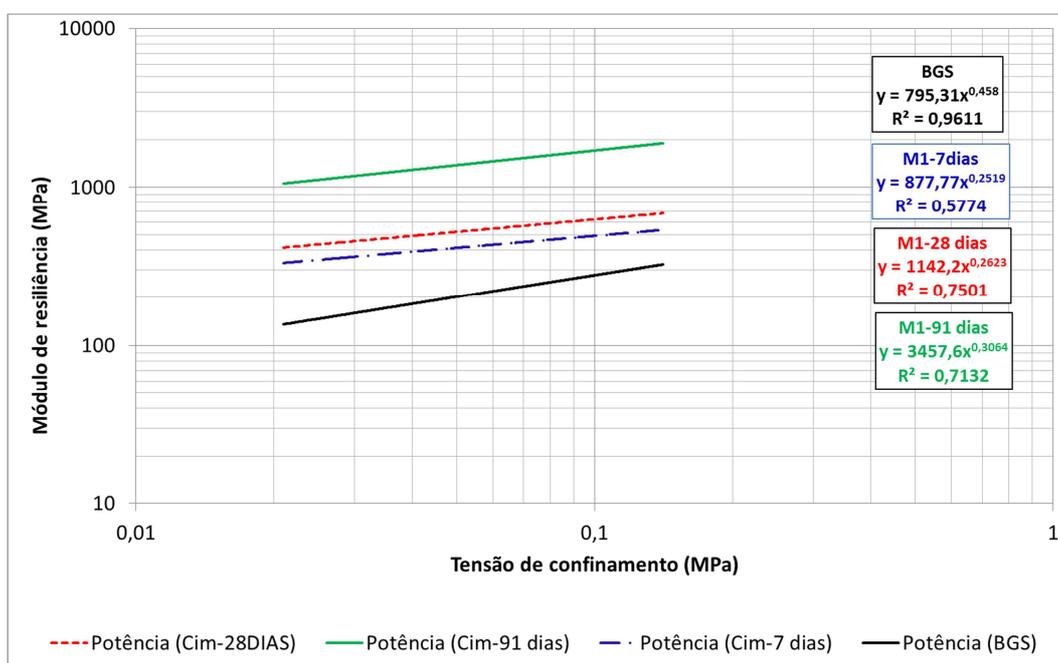


Figura 25 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura Cim aos 7, 28 e 91 dias e para a BGS

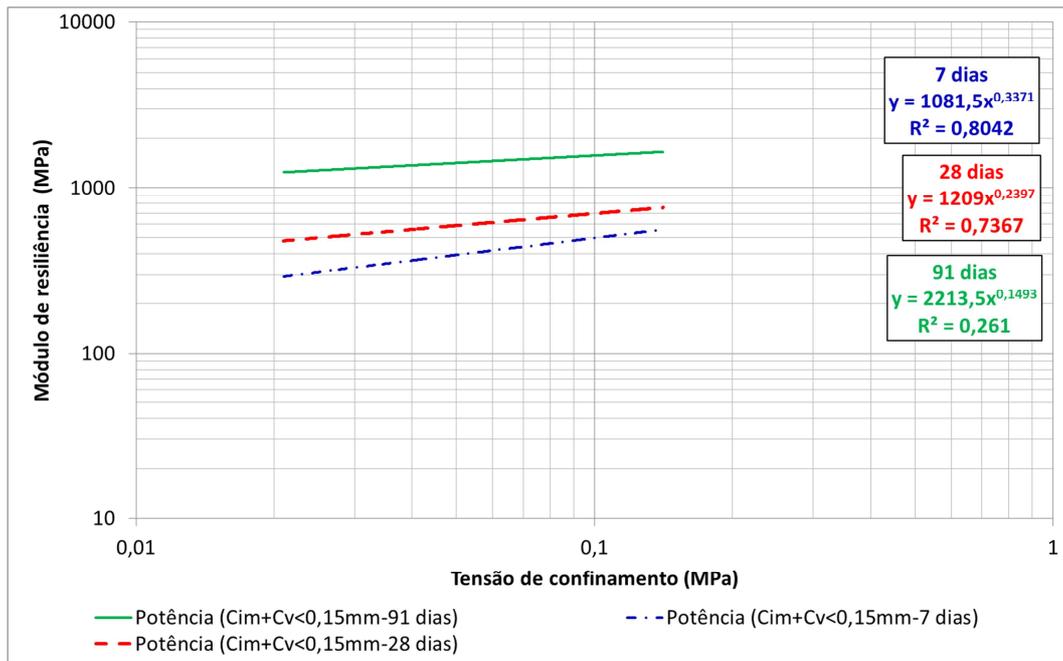


Figura 26 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura Cim+Cv<0,15mm aos 7, 28 e 91 dias

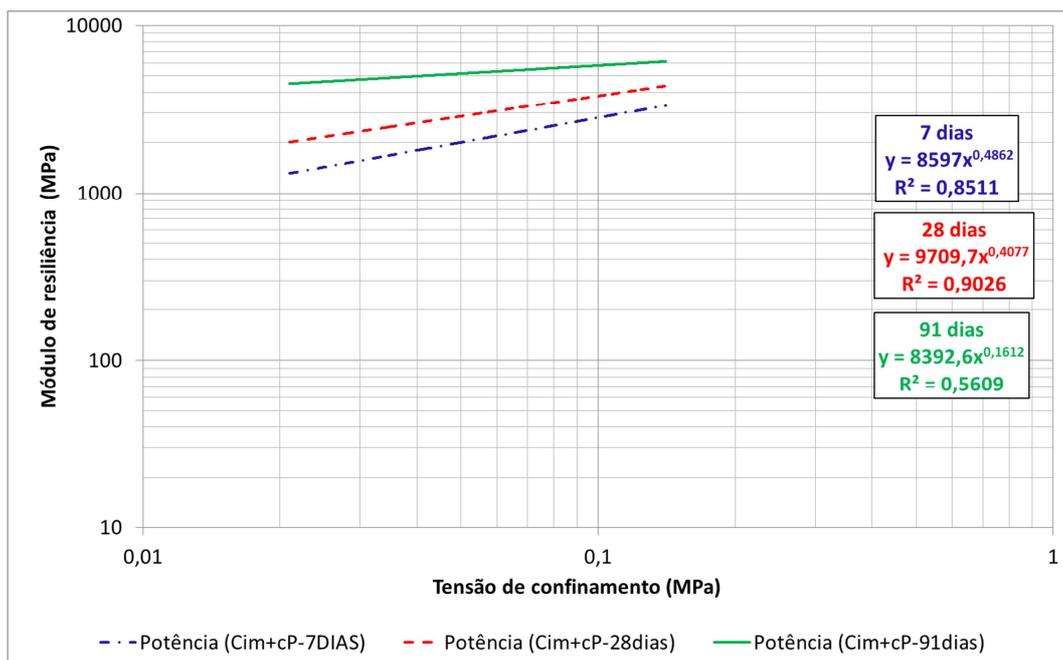


Figura 27 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura Cim+cP aos 7, 28 e 91 dias

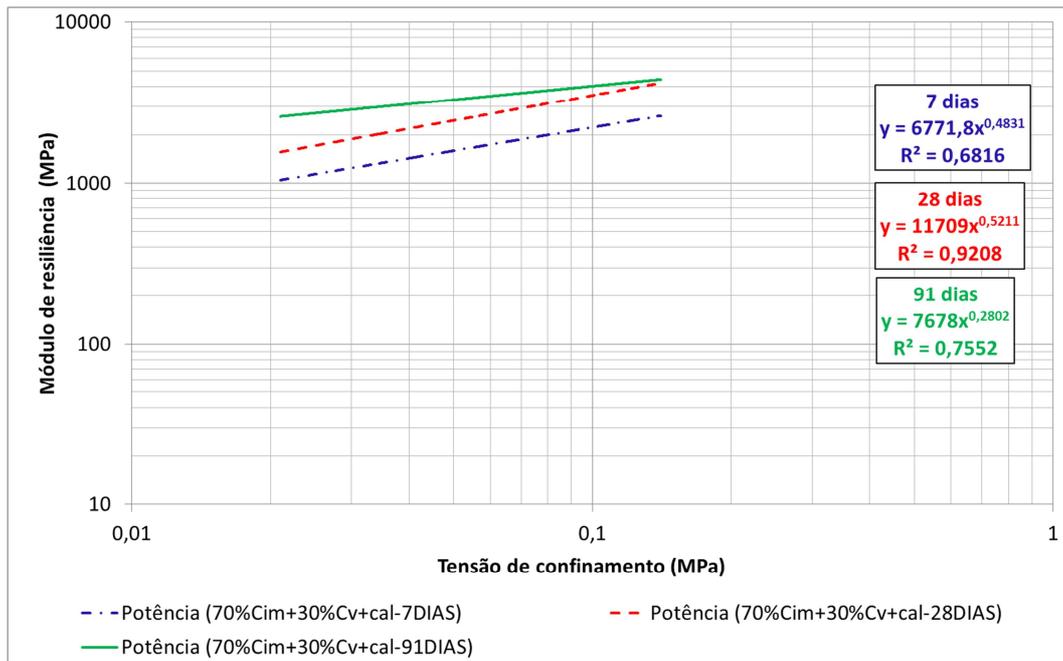


Figura 28 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura 70%Cim+30%Cv+cal aos 7, 28 e 91 dias

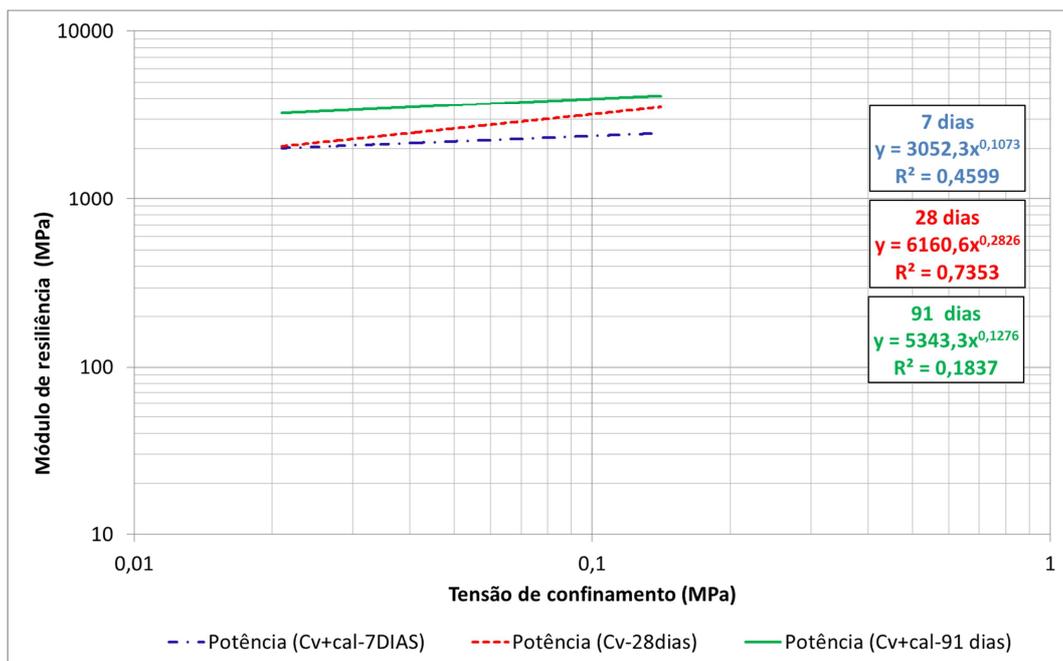


Figura 29 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para a mistura Cv+cal aos 7, 28 e 91 dias.

Para as cinco misturas estudadas o módulo de resiliência apresentou aumento em seus valores com a evolução da idade de cura. Observa-se que os maiores valores de módulo de resiliência, considerando-se as três idades de cura, foram os da mistura cim+cP, seguida das misturas 70%Cim+30%Cv+cal

e Cv+cal. As misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm tiveram módulos de resiliência da mesma ordem de grandeza, e abaixo do valor apresentado pelas outras três misturas.

Verificou-se que as cinco misturas estudadas apresentaram comportamento característico dos materiais granulares, ou seja, o módulo de resiliência é dependente do confinamento aplicado ao corpo de prova. Porém, com o aumento da idade de cura as misturas demonstram uma tendência de comportamento semelhante aos materiais cimentados, ou seja, com redução de variação das deformações resilientes, tendendo a serem independentes da tensão confinante aplicada (σ_3).

Para possibilitar a análise do aumento da rigidez ao longo das idades de cura para as misturas estudadas, admitiu-se uma tensão confinante de 0,1 MPa, considerando-se o uso do material na camada de base, para a qual foram determinados os módulos de resiliência, segundo as equações de regressões obtidas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados dos ensaios de módulo de resiliência para corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm considerando $\sigma_3 = 0,1$ MPa

Misturas	Módulo de resiliência (MPa)			% de aumento do Módulo de resiliência		
	7 dias	28 dias	91 dias	7 para 28 dias	28 para 91 dias	7 para 91 dias
Cim	491	621	1708	26%	175%	248%
Cim+Cv<0,15mm	498	696	1570	40%	126%	215%
Cim+cP	2806	3798	5797	35%	53%	107%
70%Cim+30%Cv+cal	2226	3527	4291	58%	22%	93%
Cv+cal	2384	3214	3983	35%	24%	67%
BGS (não há idades de hidratação)	277			-	-	-

Observando os resultados, verifica-se que as misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm tem módulos de resiliência muito semelhantes e, além disso, foram as que obtiveram variação mais significativa na rigidez com a evolução da cura, com aumento do módulo de resiliência em mais de 200% dos 7 para os 91 dias.

As outras três misturas estudadas tiveram valores próximos para o módulo de resiliência, considerando $\sigma_3 = 0,1$ MPa, sendo que destas a que apresentou incremento mais significativo neste parâmetro foi a mistura Cim+cP com resultado passando de 2806 MPa aos 7 dias para 5797 MPa aos 91 dias, aumento de 107%, o que era esperado devido à adição de cimento Portland na mistura.

A mistura 70%Cim+30%Cv+cal, já aos 7 dias teve um resultado de módulo de resiliência 2226 MPa, chegando a 4291 MPa aos 91 dias, aumento de 93% no período de cura considerado.

Quando comparados os módulo de resiliência obtidos para a BGS e para a mistura Cim verifica-se que nesta última obteve-se valor bastante superior ao da BGS desde a idade de cura de 7 dias. Considerando uma tensão confinante de 0,1 MPa, tem-se que aos 7 dias a mistura Cim apresenta módulo de resiliência cerca de 80% maior que a BGS, diferença que sobe para 120% aos 28 dias e para mais de 500% aos 91 dias.

3.6.2.1 Análise estatística dos resultados de módulo de resiliência

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência permitiram observar que as misturas estudadas se dividem em dois grupos quando se considera a ordem de grandeza dos resultados. Um dos grupos é formado pelas misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm e o outro grupo pelas outras três misturas.

Com o objetivo de avaliar se os resultados obtidos, considerando os dois grupos separadamente, podem ser considerados estatisticamente iguais foram feitas análises de variância para comparar as médias obtidas entre as misturas, para esta análise foram considerados todos os resultados obtidos nos ensaios e que deram origem às regressões apresentadas.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 27 para comparação das misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm e na Tabela 28 para comparação das misturas Cim+cP, 70%Cim+30%Cv+cal.

Tabela 27 – Análise de variâncias entre as misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm

Idade de cura	P_{value} (igualdade de variâncias)	P_{value} (análise de variâncias)	Conclusão
7 dias	0,73	0,46	Cim=Cim+Cv<0,15mm
28 dias	0,65	0,0001	Cim≠Cim+Cv<0,15mm
91 dias	0,29	0,65	Cim=Cim+Cv<0,15mm

As análises de variâncias para comparação entre os resultados de módulo de resiliência obtidos para as misturas Cim e Cim+.Cv<0,15mm indicou que aos 7 e aos 91 dias estes resultados podem ser considerados estatisticamente iguais.

Com isso verifica-se que a adição de Cv<0,15mm (pozolana) no teor adotado (0,15%), não contribuiu para a redução da deformabilidade do Cim.

Tabela 28 – Análise de variâncias entre as misturas Cim+cP, 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal

Idade de cura	P_{value} (igualdade de variâncias)	P_{value} (análise de variâncias)	Teste Tukey
7 dias	0,001	0,002	Cim+cP ≠ 70%Cim+30%Cv+cal ≠ Cv+cal
28 dias	0,05	0,0001	Cim+cP ≠ 70%Cim+30%Cv+cal = Cv+cal
91 dias	0,97	0,0001	Cim+cP ≠ 70%Cim+30%Cv+cal = Cv+cal

Nas análises de variâncias entre os resultados de módulo de resiliência das misturas Cim+cP, 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal a hipótese de igualdade foi rejeitada nas três idades de cura, ou seja, ao menos uma das misturas é considerada estatisticamente diferente.

Para verificar qual, ou quais, é diferente foi utilizado o teste de Tukey, que é um teste de hipótese realizado em todos os pares de média para verificar a igualdade destas (MONTGOMERY, 2005).

Assim verificou-se que a mistura Cim+cP apresenta resultados estatisticamente diferentes que as outras duas amostras consideradas em todas as idade de cura (7, 28 e 91 dias).

As misturas 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal apresentam módulos de resiliência estatisticamente iguais nas idades de cura de 28 e 91 dias, e diferentes aos 7 dias.

3.6.3 Deformação permanente

De acordo com Bernucci et al. (2006), a deformação permanente é um dos principais danos estruturais que ocorre em um pavimento, podendo levá-lo à ruptura e, por esse motivo, a avaliação deste parâmetro nos materiais que serão utilizados é necessária, para que se tenha um dimensionamento adequado do pavimento.

Na prática é importante que o projeto de um pavimento seja concebido para que em sua estrutura não ocorram deformações permanentes ou, se estas ocorrerem, que sejam de pequena magnitude (WERKMEISTER et al., 2001).

Conceitualmente, a deformação permanente é a parcela não recuperável das deformações sofridas pelo material, quando esse é submetido às solicitações cíclicas, ou seja, é a deformação plástica (Figura 30).

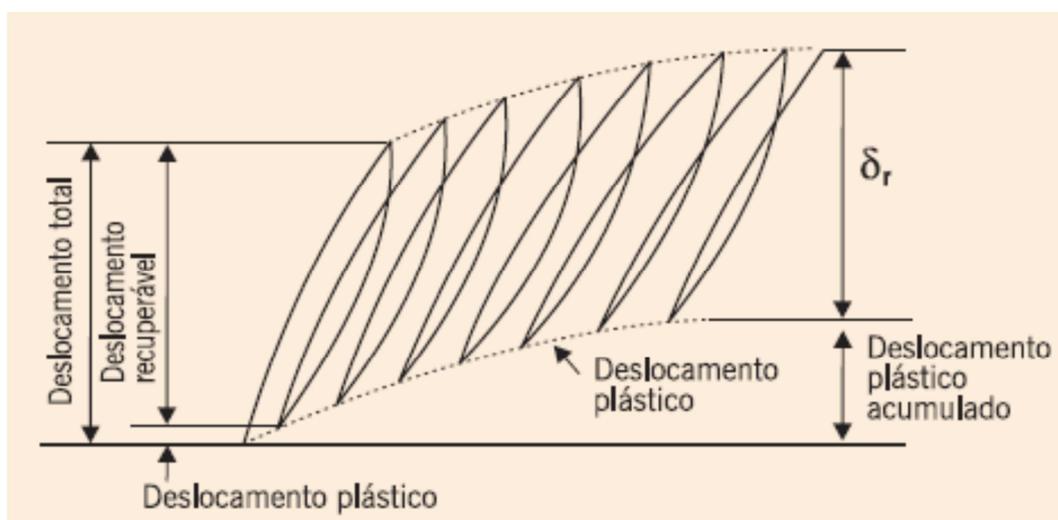


Figura 30 – Representação gráfica dos deslocamentos sofridos pelo corpo de prova durante o ensaio triaxial cíclico (BERNUCCI et al., 2006)

Nesta tese, para a avaliação da deformação permanente das misturas estudadas foram realizados ensaios triaxiais cíclicos, com procedimento baseado na norma EN 13286-7 (AFNOR, 2004), em prensa hidráulica MTS (*Material Test System*), do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação do PTR/EPUSP (Figura 31).



Figura 31 – Ensaio de deformação permanente conduzido na MTS (*Material Test System*)

Os ensaios foram conduzidos em corpos de prova cilíndricos com dimensões 100 mm x 200 mm na BGS e nas seguintes misturas estudadas: Cim, Cim+cP, 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal, todas com idade de cura de 91 dias. Optou-se por não realizar os ensaios na mistura Cim+Cv<0,15mm, pois esta apresentou comportamento muito semelhante à mistura Cim nos ensaios de resistência à compressão simples e módulo de resiliência.

As misturas foram ensaiadas na idade de 91 dias de cura, pois o objetivo da realização deste ensaio foi avaliar o comportamento que estas teriam caso estivessem aplicadas em uma camada de pavimento, sendo assim a idade de 91 dias foi considerada mais adequada a esta situação.

Os ensaios para avaliação da deformação permanente foram conduzidos até 100.000 ciclos, com nível de tensões (σ_d/σ_3) de 6. Empregou-se

este nível de tensões para simular a utilização deste material na camada de base, onde estaria sujeito a uma elevada sollicitação.

Para a determinação de quais deveriam ser os valores das tensões para o ensaio (σ_d e σ_3) foi feita uma simulação no programa de elementos finitos Elsym 5, utilizando uma seção de pavimento asfáltico hipotética, tendo como referência uma das seções empregadas na pesquisa de Leite (2007), porém substituindo o material da camada de base pelas misturas estudadas nesta tese. A simulação, feita matematicamente pelo programa, forneceu a tensão desvio (σ_d) e assim, para a determinação da tensão confinante, dividiu-se σ_d obtida por 6, para que se tivesse a relação de tensões desejada.

As características da seção de pavimento hipotética utilizada são apresentadas na Tabela 29, e as tensões desvio e confinante obtidas para cada uma das misturas ensaiadas na Tabela 30.

Tabela 29 – Características da seção de pavimento hipotética adotada para determinação das tensões pelo Elsym 5

Camada	Material	Espessura (mm)	Módulo de resiliência (MPa)
Revestimento	Concreto asfáltico	100	3000
Base	Misturas estudadas na tese	150	Resultados obtidos aos 91 dias para as misturas estudadas
Sub-base	Agregado reciclado	150	250
Reforço do Subleito	Solo laterítico	200	150
Subleito	Solo	semi-infinito	75

Tabela 30 – Tensões utilizadas nos ensaios de deformação permanente

Misturas	σ_d (KPa)	σ_3 (KPa)	σ_d / σ_3
Cim	308	51,3	6
Cim+cP	390	65,0	6
70%Cim+30%Cv+cal	380	63,3	6
Cv+cal	379	63,2	6
BGS	196	32,7	6

As curvas obtidas nos ensaios de deformação permanente são apresentadas na Figura 32.

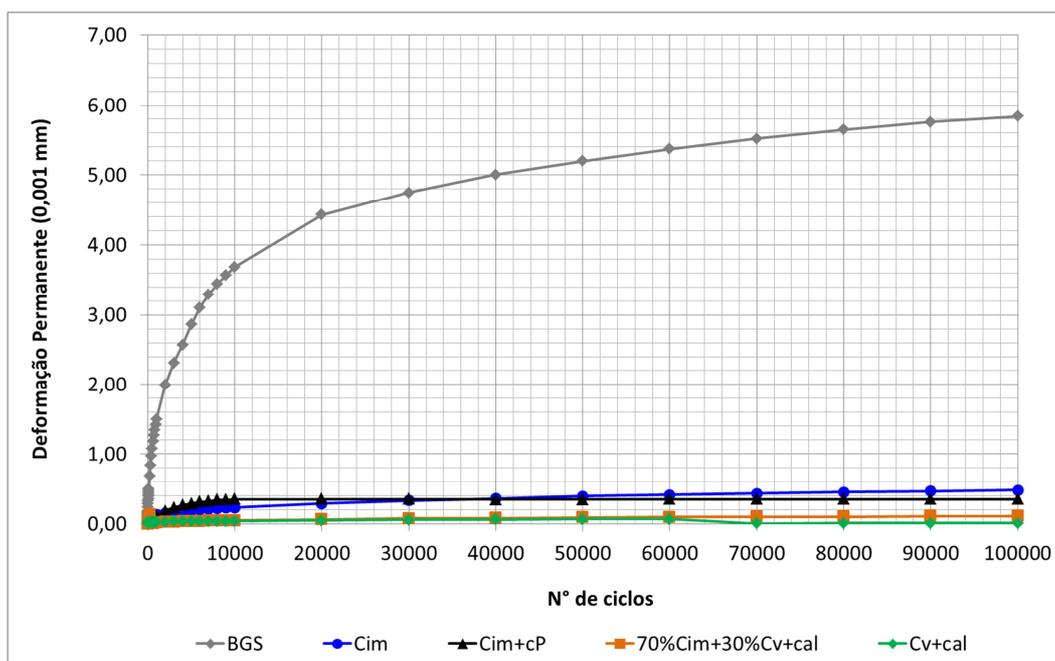


Figura 32 – Resultados dos ensaios de deformação permanente

As quatro misturas estabilizadas ensaiadas, apresentaram comportamento muito semelhante neste ensaio, todas com deformações permanentes muito baixas, da ordem de $0,2 \times 10^{-3}$ mm, que, como pode ser observado na Figura 35, evoluíram de forma mais significativa até os 10.000 ciclos de carregamento e, após isso, permaneceram praticamente constantes até o final do ensaio (100.000 ciclos).

A BGS apresentou deformações permanentes maiores que as misturas estabilizadas sofrendo aumento até o final do ensaio. Porém, a deformação permanente acumulada para a BGS no final do ensaio foi de $5,8 \times 10^{-3}$ mm, valor que, embora seja maior que o obtido para as outras misturas estudadas, ainda pode ser considerado relativamente baixo.

Nos ensaios de deformação permanente também foi possível determinar a evolução do módulo de resiliência do corpo de prova durante o ensaio, pois as deformações resilientes são medidas durante o procedimento. Os resultados obtidos em função dos ciclos de carregamento são apresentados na Figura 33.

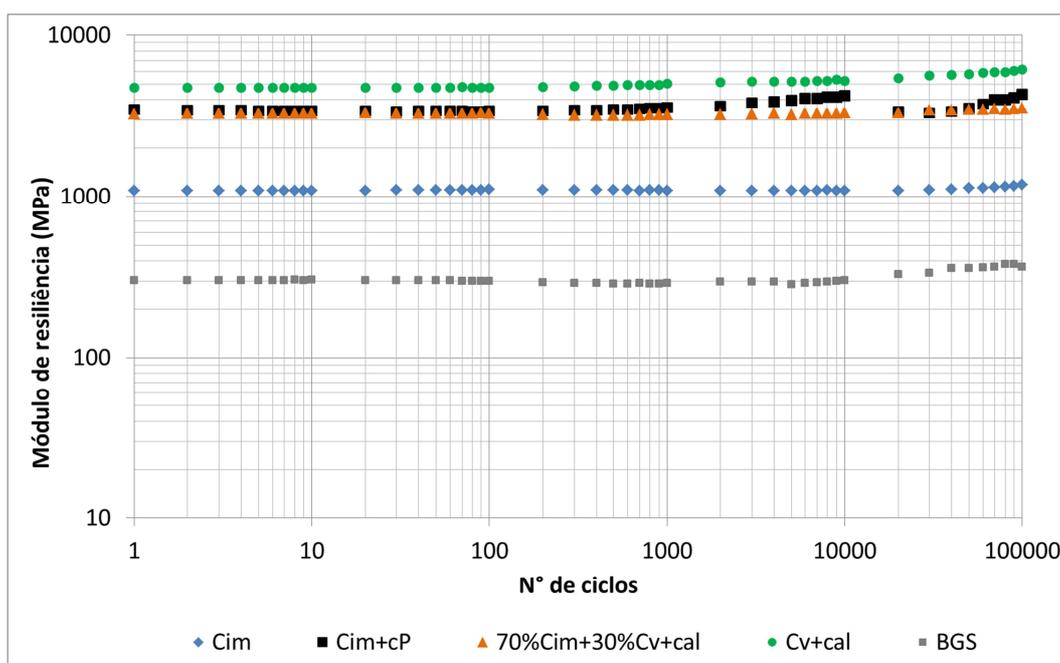


Figura 33 – Variação do módulo de resiliência durante os ensaios de deformação permanente

Os resultados apresentados na Figura 33 permitem observar que o módulo de resiliência permanece constante em praticamente todo o ensaio para todas as misturas estudadas, sofrendo pequeno aumento no final do ensaio. Esse aumento provavelmente ocorreu pela deformação plástica, devida à consolidação da mistura, após um elevado número de ciclos de carregamento, o que aumenta os pontos de contato entre seus agregados, deixando-as mais rígidas.

3.6.4 Discussões dos ensaios mecânicos

Tanto os ensaios de compressão simples quanto os ensaios de módulo de resiliência apresentaram aumento em seus resultados com a evolução da idade de cura, indicando que, provavelmente, as reações químicas de hidratação do cimento anidro e pozolânica contribuíram para a melhora no comportamento mecânico de todas as misturas estabilizadas ensaiadas.

Em ambos os ensaios foi possível observar que as misturas se dividem em dois grupos, sendo o primeiro deles com resistência à compressão simples e módulos de resiliência com valores mais baixos, constituído pelas misturas

Cim e Cim+Cv<0,15mm, misturas que têm em sua composição somente o cimento anidro do resíduo que gerou o agregado reciclado; e o outro grupo com resistências à compressão simples e módulos de resiliência mais elevados, constituído pelas misturas Cim+cP, 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal, as quais apresentam composições que potencializam a ocorrência de reações pozolânicas pela adição de pozolana e cal ou de hidratação do cimento pela adição de cimento Portland.

A variação nas dimensões dos corpos de prova para realização dos ensaios de módulo de resiliência das misturas estudadas, mostrou que os corpos de prova maiores (150 mm x 300 mm) tendem a apresentar módulos de resiliência maiores, porém apresentam comportamento dependente da tensão confinante em todas as idades de cura consideradas, ou seja, sempre têm comportamento característico de material granular.

Os módulos de resiliência medidos em corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm, embora também apresentem dependência da tensão confinante, esta tende a diminuir com o aumento da idade de cura, conforme observado nos expoentes de suas equações de regressões, o que demonstra a tendência de comportamento semelhante ao dos materiais tratados com cimento.

Quanto aos ensaios de deformação permanente verificou-se que todas as misturas estabilizadas estudadas apresentaram comportamento semelhante na idade de cura de 91 dias, com deformações permanentes muito baixas e estabilização destas logo no início do ensaio.

A comparação entre a BGS e a mistura Cim indicou que esta última apresenta comportamento mecânico muito superior.

3.7 Análise conjunta dos resultados dos ensaios químicos, do empacotamento e dos ensaios mecânicos

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e módulo de resiliência demonstraram que ocorreu melhora do comportamento mecânico das misturas ao longo do tempo, indicando a eficiência nas dosagens

para estabilização das misturas propostas, o que também foi comprovado pelos resultados dos ensaios de deformação permanente.

Resta saber de que forma esta estabilização ocorreu, ou seja, se é puramente química, caso a melhora do comportamento mecânico seja exclusivamente pela contribuição das reações químicas consideradas, ou se também há influência do arranjo físico dos grãos (empacotamento) que compõem estas misturas.

Inicialmente, para avaliar a relação entre os resultados dos ensaios mecânicos e as reações químicas ocorridas, apresentam-se nas Figuras 34 e 35, as regressões obtidas pelas correlações entre as porcentagens de água combinada referentes aos hidratos e os resultados obtidos para resistência à compressão simples e módulo de resiliência ($\sigma_3 = 0,1$ MPa) nas três idades de cura consideradas.

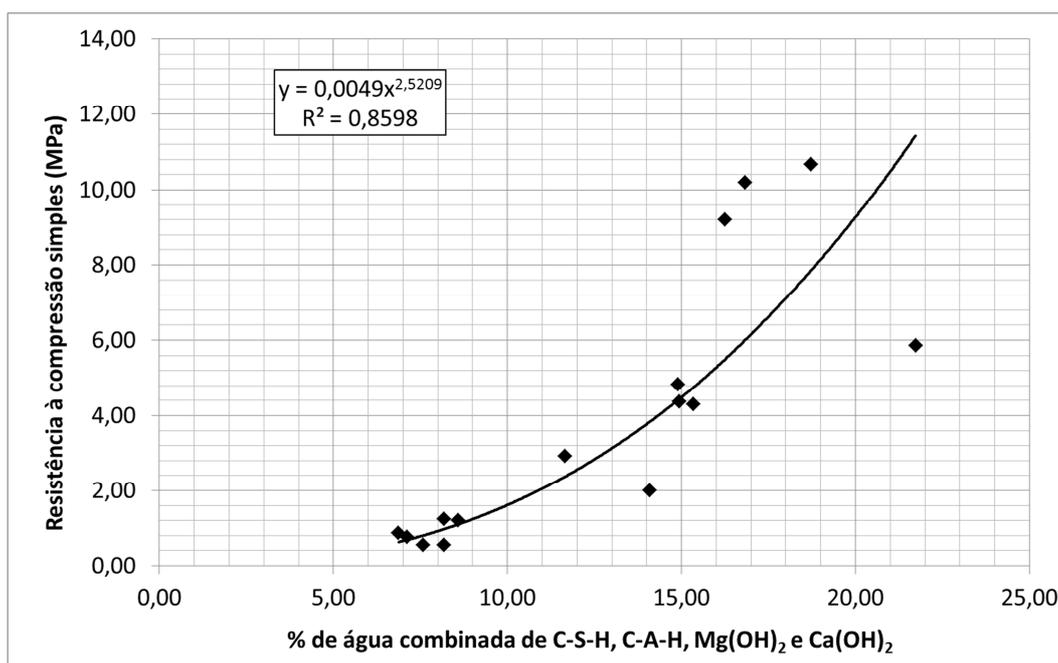


Figura 34 – Relação entre perda de água combinada de hidratos e resistência à compressão simples das misturas estudadas

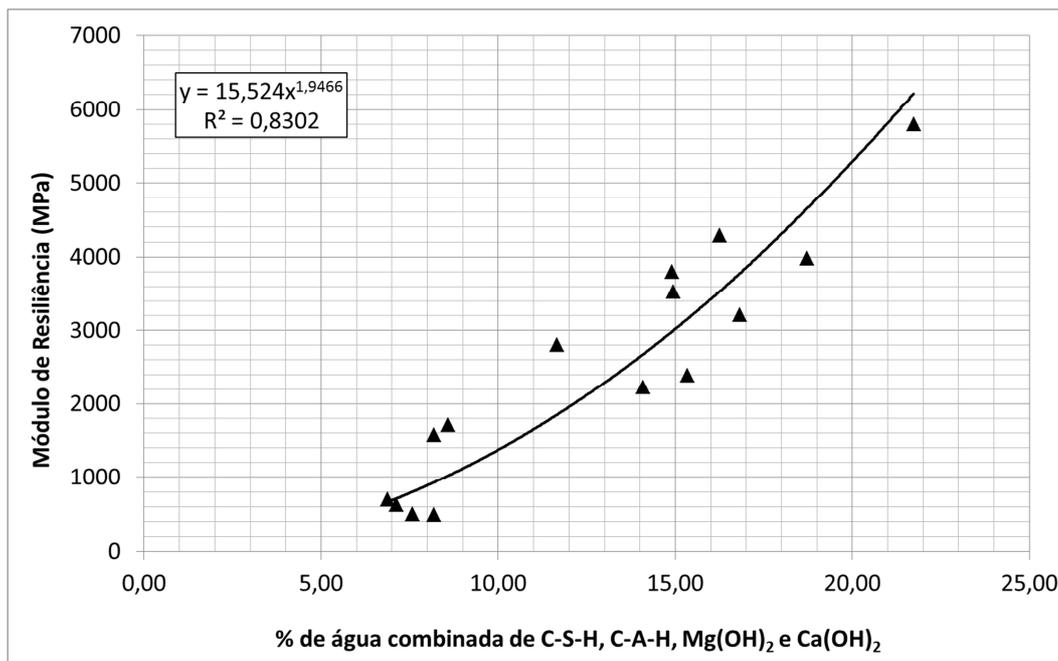


Figura 35 – Relação entre perda de água combinada de hidratos e módulo de resiliência das misturas estudadas

Observando as Figuras 34 e 35 é possível verificar que há correlação elevada entre a evolução do comportamento mecânico com o aumento dos produtos hidratados nas misturas de maneira semelhante para o módulo de resiliência e a resistência à compressão simples, com R^2 acima de 0,8 nos dois casos.

As porcentagens de perda de água combinada foram medidas pelos ensaios de TG em pastas constituídas apenas pela fração de grãos menores que 0,15 mm. Dessa forma, as correlações obtidas indicam que o enrijecimento da pasta (ou *mastic*), pela ocorrência das reações químicas, contribui significativamente para a estabilização das misturas estudadas, com conseqüente melhora em seus comportamentos mecânicos.

Foi feita, ainda, uma estimativa dos volumes de hidratos produzidos pelas reações químicas e como estes volumes contribuíram para a variação na porosidade das misturas estudadas.

Os resultados, apresentados no item 3.5.1, indicaram que com a evolução da cura os volumes de hidratos aumentaram e, com isso, as porosidades das misturas estudadas diminuíram.

Para uma análise de como o endurecimento da pasta influencia no comportamento das misturas como um todo foi realizada, inicialmente, uma tentativa de correlacionar as porosidades estimadas com os resultados dos ensaios mecânicos das cinco misturas nas três idades de cura, porém observou-se a ausência de correlação nesta forma de análise.

Por esse motivo, optou-se por fazer regressões separadas para as misturas que possuem em sua composição o agregado reciclado cimentício, sendo elas: Cim, Cim+Cv<0,15mm, Cim+cP e 70%Cim+30%Cv+cal; e para a mistura Cv+cal que empregou maioria de grãos de agregado reciclado de cerâmica vermelha. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 36 e 37.

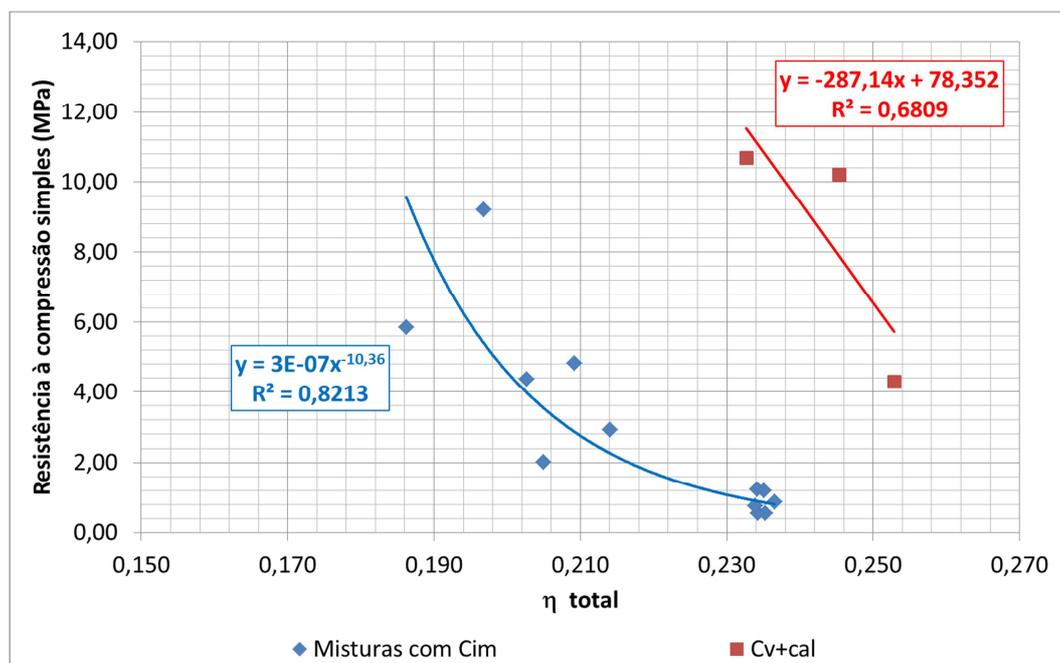


Figura 36 – Relação entre porosidade total (η_{total}) e resistência à compressão simples para as misturas com agregado reciclado cimentício (Cim) e para a mistura com cerâmica vermelha (Cv+cal)

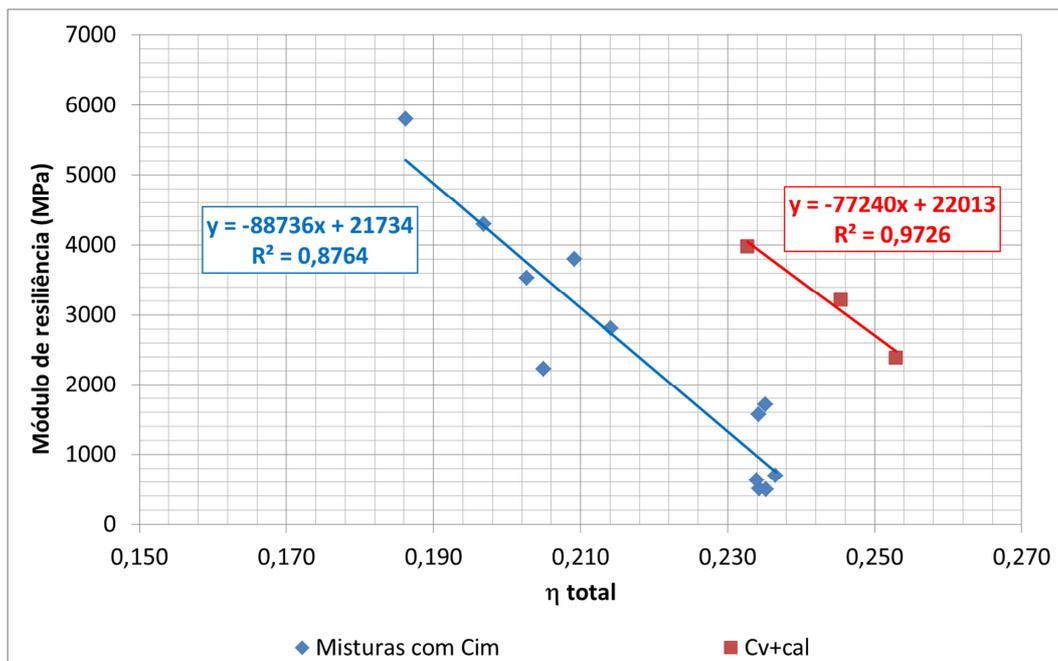


Figura 37 – Relação entre porosidade total (η_{total}) e módulo de resiliência para as misturas com agregado reciclado cimentício (Cim) e para a mistura com cerâmica vermelha (Cv+cal)

As regressões obtidas indicam que a diminuição da porosidade tem elevada correlação com ambos os parâmetros analisados, sendo maior com o módulo de resiliência ($\sigma_3 = 0,1$ MPa) cujo R^2 foi de 0,8764 para as misturas com Cim e de 0,9726 para a Cv+cal, ambas por regressões lineares.

Cabe ressaltar que as regressões aqui apresentadas são válidas somente para estes intervalos de dados, pois caso sejam extrapoladas para dados menores de porosidade, as regressões lineares irão resultar em módulos de resiliência e resistências a compressão simples menores que zero, o que é fisicamente improvável.

Observando as Figuras 36 e 37 é possível verificar que, embora a mistura Cv+cal tenha porosidades maiores, seus resultados de módulo de resiliência e resistência à compressão simples foram elevados e muito semelhantes aos apresentados pelas misturas com porosidades menores, entre as que empregaram o agregado reciclado cimentício. Isto deixa clara a diferença de comportamento entre os dois tipos de mistura.

Então, analisando separadamente as misturas com agregado reciclado cimentício e a mistura Cv+cal, observa-se que existe elevada correlação entre as variações das porosidades e a evolução do comportamento mecânico das

misturas estudadas, pois com o aumento do volume de hidratos produzidos com a evolução da cura, e a conseqüente diminuição da porosidade, maiores são as resistências à compressão simples e os módulos de resiliência.

O empacotamento puramente físico, ou seja, causado somente pelo arranjo dos grãos, apresentou pouca influência neste comportamento, isso porque o comportamento mecânico das misturas melhorou com a evolução da cura, enquanto que o arranjo físico dos grãos não se alterou.

O que ocorreu foi um fechamento de porosidade causado pelo aumento do volume de hidratos gerados nas reações pozolânicas e de hidratação de cimento anidro existente no agregado reciclado cimentício, ou seja, ocorreu uma mudança física nas misturas, causada exclusivamente por reações químicas, o que contribuiu para a elevação de rigidez e resistência destas misturas. Dessa forma, pode-se dizer que as misturas estudadas obtiveram melhora de comportamento mecânico devido à estabilização química.

Uma comparação direta entre a mistura Cv+cal, que emprega grande maioria dos grãos provenientes do agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv), e as outras quatro misturas, que empregam em sua composição maior quantidade de grãos de agregado reciclado cimentício (Cim), é prejudicada pela diferença entre a natureza das partículas (grãos) que as compõem.

Além disso, há a diferença entre granulometrias, pois a mistura Cv+cal tem diâmetro nominal máximo de 4,8 mm, enquanto as outras quatro têm diâmetro nominal máximo de 25 mm.

A explicação para que a mistura Cv+cal tenha apresentado módulos de resiliência e resistências à compressão elevadas, da mesma ordem de grandeza que as misturas que empregam agregado reciclado cimentício e que têm menores porosidades, além da diferença de natureza, pode estar na questão do contato entre os grãos.

A mistura Cv+cal, por ser mais fina, possui superfície específica (e área específica) de grãos maior e, conseqüentemente, maior área de contato entre estes grãos.

Com isso, embora o volume de poros desta mistura seja maior que as outras, o que em parte é devido a ocorrência de floculação do Cv pela adição

de cal CH-I, seus poros são menores (mais finos), o que gerou contatos mais eficientes, e que foram fortalecidos pelos hidratos produzidos nas reações pozolânicas.

Assim, na comparação entre as misturas com agregado reciclado cimentício e a mistura Cv+cal há influência do arranjo físico inicial, ou seja, do empacotamento dos grãos.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

4.1 Conclusões

Os ensaios de caracterização física mostraram que tanto o agregado reciclado cimentício quanto o de cerâmica vermelha apresentaram coeficiente de uniformidade (C_u) que indicou que ambas as granulometrias são não-uniformes (bem-graduadas).

A quebra ocorrida no agregado reciclado cimentício devido à compactação, demonstrou ser uma característica positiva, pois gerou aumento de partículas na fração menor que 0,15 mm, aumentando a quantidade de fração reativa.

Os ensaios de caracterização química no agregado reciclado cimentício (Cim) indicaram a presença de cimento anidro proveniente do resíduo cimentício que gerou este agregado, pois foram identificados, por meio dos silicatos anidros (C_3S e C_2S) nos finos deste material.

No agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv), os ensaios de caracterização química constataram a presença de espécies químicas compostas por ferro, alumínio, magnésio e sílica, que possibilitam a ocorrência de reações pozolânicas. Além disso, o ensaio Chapelle também indicou potencial pozolânico neste material.

Com estes ensaios conclui-se que tanto o agregado reciclado cimentício (Cim) quanto o de cerâmica vermelha (Cv) apresentam características químicas para o desenvolvimento de reações químicas de cimentação, contribuindo para a estabilização dos materiais que os empreguem.

Utilizando os agregados reciclados Cim e Cv, dosados em proporções que possibilitassem a ativação dos finos destes materiais, foram obtidas cinco misturas consideradas de interesse para o estudo, cujas caracterizações físicas indicaram curvas granulométricas bem graduadas com quantidade de finos adequada para as reações químicas desejadas.

Para a mistura Cim, os ensaios de TG (termogravimetria) indicaram aumento do total de hidratos produzidos ao longo das idades de cura. Foi possível concluir, a partir destes resultados, que realmente havia cimento não hidratado no material e que, após o novo processo de britagem realizado para obtenção do agregado reciclado, este cimento teve sua superfície novamente exposta, possibilitando a continuidade de sua hidratação. O processo de compactação também promove este mesmo efeito.

Para a mistura Cim+Cv<0,15mm, os ensaios químicos indicaram o aumento de C-A-H dos 7 para os 91 dias e diminuição da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o que indica a ocorrência de reação pozolânica.

Na mistura Cim+cP, os ensaios de TG indicaram que, com a evolução da cura, ocorreu aumento do C-S-H e da portlandita, de forma mais significativa que nas outras misturas estudadas, o que certamente é devido à hidratação do cimento Portland adicionado, além do cimento anidro residual liberado pelos agregados cimentícios durante a britagem.

Na mistura 70%Cim+30%Cv+cal, os ensaios de TG indicaram aumento nos produtos hidratados e diminuição da portlandita com a evolução da cura. Nesse caso, há combinação dos efeitos de hidratação do cimento anidro residual e da reação pozolânica, sendo esta última comprovada pela diminuição da portlandita com a evolução da cura.

Na mistura Cv+cal as termogravimetrias, indicaram o aumento de C-A-H e C-S-H e diminuição da portlandita com a evolução da cura, comprovando a ocorrência de reação pozolânica pela combinação proposta.

Sendo assim, é possível afirmar que os ensaios de difração de raios X e termogravimetria, realizados nas cinco misturas estudadas, comprovaram a ocorrência das reações pozolânicas e de hidratação de cimento anidro residual nas misturas propostas.

A análise do empacotamento das misturas em estudo permitiu verificar que a BGS é o material menos poroso (que apresenta menor volume de vazios considerando a somatória dos vazios da mistura e dos grãos), seguida pelas misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm.

Com maiores resultados para a porosidade total aparecem as misturas 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal, respectivamente, nas quais a porosidade dos grãos (intragranulares) tem contribuição mais relevante do que nas outras misturas. Nestas misturas a porosidade elevada também pode ter contribuição da floculação gerada pela adição de cal ao Cv, que promove a ocorrência de reações iônicas na superfície das partículas modificando as forças e arranjo entre elas, formando uma estrutura floculada na qual os microagregados se comportam com grãos.

A análise da porosidade total com a evolução da cura permitiu verificar que em todas as misturas de agregados reciclados estudadas ocorreu variação deste parâmetro devido ao aumento do volume de hidratos.

Relativamente à porosidade total inicial, a diminuição mais significativa ocorreu para as misturas que empregaram o agregado reciclado de cerâmica vermelha (70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal), comprovando a ocorrência das reações pozolânicas.

Na avaliação do comportamento mecânico, os ensaios de resistência à compressão simples, indicaram que as misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm apresentaram resultados similares nas três idades de cura, o que indica que a reação pozolânica ocorrida pela combinação de pozolana adicionada (Cv) e portlandita residual existente no Cim, não gerou efeito significativo para esta propriedade.

A mistura Cim+cP apresentou resistência à compressão simples semelhante às obtidas em literatura de misturas do tipo brita graduada tratada com cimento (BGTC), mostrando que a adição de teores da ordem de 4% de cimento ao agregado reciclado cimentício pode ser uma boa alternativa ao uso de agregados naturais também estabilizados com este tipo de aglomerante. Outra observação importante deste ensaio foram os resultados elevados apresentados pela mistura Cv+cal para todos os períodos de cura estudados.

Nos ensaios de módulo de resiliência, as misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm apresentaram resultados muito semelhantes, indicando que a reação pozolânica ocorrida também não gerou efeito significativo para este parâmetro.

A análise estatística comparando as misturas Cim e Cim+Cv<0,15mm indicou que nas três idades de cura estes resultados são considerados estatisticamente

iguais, comprovando que a adição de $C_v < 0,15\text{mm}$ no teor empregado não gerou efeito significativo no comportamento mecânico do Cim.

As misturas Cim+cP, 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal apresentaram módulos de resiliência de mesma ordem de grandeza, quando comparados os resultados destas diferentes misturas em uma mesma idade de cura.

A análise estatística realizada entre estas misturas, considerando os resultados do módulo de resiliência, indicaram que a mistura cim+cP é estatisticamente diferente das misturas 70%Cim+30%Cv+cal e Cv+cal, sendo as duas últimas consideradas estatisticamente iguais quanto aos resultados de módulo de resiliência aos 28 e 91 dias.

Comparando os resultados da BGS com os obtidos para a mistura Cim, tanto no ensaio de resistência à compressão simples como no módulo de resiliência e, ainda, na deformação permanente, verifica-se que a mistura Cim apresentou comportamento muito superior ao apresentado pela BGS, o que se deve, principalmente, à ocorrência da reação de hidratação do cimento anidro existente em sua composição.

Nos ensaios de deformação permanente, realizados aos 91 dias de cura, as quatro misturas estabilizadas ensaiadas, (Cim, Cim+cP, 70%Cim+30%Cv+cal e CV+cal) apresentaram comportamento muito semelhante, todas com deformações permanentes muito baixas, indicando a efetiva estabilização destas misturas.

A análise conjunta dos resultados dos ensaios químicos (TG), da análise de empacotamento e dos ensaios mecânicos realizados nas misturas, permitiu, inicialmente, verificar que quando se consideram as porcentagens de perda de água combinada dos hidratos, obtidas nos ensaios de termogravimetria, tem-se uma tendência de comportamento semelhante para todas as misturas estudadas, sendo que quanto maior a quantidade de hidratos, maiores os módulos de resiliência e as resistências à compressão simples.

Porém, quando se faz a análise desta maneira, considera-se a influência da hidratação apenas na fração fina das misturas, pois os ensaios de TG foram realizados nas pastas que empregaram frações menores que 0,15 mm.

A análise do efeito das reações químicas nas misturas propriamente ditas foi feita pela estimativa da diminuição de porosidade total, com o aumento do volume de hidratos produzidos pela evolução da cura.

Desta forma, foi possível verificar que a mistura Cv+cal, que emprega somente agregado reciclado de cerâmica vermelha, mesmo com porosidades mais elevadas, apresenta comportamento mecânico semelhante ao apresentado pelas misturas com porosidades menores, quando comparada àquelas que empregaram maioria de grãos de agregado reciclado cimentício.

Analisando separadamente as misturas, com agregado reciclado cimentício ou a mistura Cv+cal, observa-se que quanto maior o volume de hidratos produzidos pelas reações químicas, e a conseqüente diminuição da porosidade, maiores são as resistências à compressão simples e os módulos de resiliência.

O empacotamento puramente físico, ou seja, causado somente pelo arranjo dos grãos, apresenta pouca influência no comportamento quando se consideram misturas de mesma natureza, isso porque o comportamento mecânico melhorou com a evolução da cura, enquanto que o arranjo físico dos grãos não se alterou. O que ocorreu foi a diminuição da porosidade causada pelo aumento do volume de hidratos, ou seja, ocorreu uma mudança física causada, essencialmente, por reações químicas, o que contribuiu para a elevação da rigidez e resistência destas misturas.

Dessa forma, conclui-se que as misturas estudadas obtiveram melhora de comportamento mecânico devido à estabilização química.

A explicação para que a mistura Cv+cal tenha apresentado módulos de resiliência e resistências à compressão elevadas, e da mesma ordem de grandeza que os apresentados pelas misturas que empregam agregado reciclado cimentício que tem menores porosidades, além da diferença de natureza dos agregados e finos, pode estar na questão do contato entre os grãos.

A mistura Cv+cal tem granulometria mais fina (diâmetro máximo nominal de 4,8 mm) fazendo com que essa tenha maior superfície específica de grãos e, conseqüentemente, maior área de contato entre estes grãos. Com isso, embora o volume de poros desta mistura seja maior que as outras, seus poros, provavelmente,

são menores, o que gerou contatos mais eficientes e que foram fortalecidos pelos hidratos produzidos nas reações pozolânicas.

Assim, na comparação entre as misturas com agregado reciclado cimentício e a mistura Cv+cal há influência do arranjo físico inicial, ou seja, do empacotamento dos grãos.

Portanto, os resultados obtidos nesta tese comprovam que com uma dosagem adequada empregando os resíduos sólidos de construção e demolição e da indústria cerâmica é possível produzir misturas estabilizadas quimicamente e com comportamento mecânico adequado para o uso em camadas dos diversos tipos de pavimentos viários para as diversas solicitações de tráfego.

4.2 Recomendações para pesquisas futuras

As recomendações para pesquisas futuras são enumeradas, de forma sucinta, a seguir:

- Avaliação de misturas somente com cerâmica vermelha e cal CH-I, com diferentes teores de cal para verificar de que forma esta variação pode interferir na eficiência das reações pozolânicas e na consequente resposta mecânica destas misturas.
- Análise de misturas semelhantes às estudadas nesta tese utilizando equipamentos de imagem como, por exemplo, um tomógrafo, para procurar quantificar os contatos existentes entre os grãos e verificar de forma efetiva como esses contatos interferem no comportamento mecânico destas misturas.
- Avaliação de misturas de materiais granulares que empreguem mesma granulometria e agregados inertes, para verificar a interferência da forma e da rugosidade dos grãos no empacotamento e na consequente resposta mecânica das misturas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **T 307**: Standard Method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. EUA, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1988a.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1988b.

_____. **NBR 11798**: Materiais para base de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012a.

_____. **NBR 11806**: Materiais para sub-base ou base de brita graduada. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12253**: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012b.

_____. **NBR 12261**: Dosagem de brita graduada tratada com cimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 1991a.

_____. **NBR 12262**: Execução de base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 1991b.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15115**: Agregados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 15116**: Agregados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR 15895**: Materiais Pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR NM 22**: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos – análise química – método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2012c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), 2008. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 12 jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), 2012. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 12 jul. 2013.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF EN 13286-7**: Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7 – Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. France, 2004.

AMERICAN ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS. **C 127-12**: Standard test method for density, relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. West Conshohocken, 2012.

_____. **C 128-07a**: Standard test method for density, relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. West Conshohocken, 2007.

_____. **D 1632-07**: Standard test method for making and curing soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory. West Conshohocken, 2007.

_____. **D 4791-10**: Standard test method for flat particles, elongated particles, flat and elongated particles in coarse aggregate. West Conshohocken, 2010.

ANGULO, S. C. et al. Chemical-mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. Waste Management. n. 29. p. 721-730, 2009.

ARM, M. Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. **Waste Management**. 21. p. 235-239, 2001.

Bailey, R. et al. **Bailey method for gradation selection in hot-mix asphalt mixture design**. Transportation Research E-circular. Transportation Research Board, 2002. Disponível em: <<http://www.trb.org/main/blurbs/161442.aspx>> Acesso em: 28.11.2012.

BALBO, J.T. Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação nos pavimentos semi-rígidos. 1993. 181p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

BARONIO, G. ; BINDA, L. Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. **Construction and Building Materials**. v. 11. n. 1. p. 41-46, 1997.

BERNUCCI, L.B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 501p.

BILODEAU, J-P.; DORÉ, J. Relating resilient behavior of compacted unbound base granular materials to matrix and interlock characteristics. **Construction and Building Materials**. 37. p. 220-228, 2012.

BODI, J.; BRITO FILHO, J.A.; ALMEIDA, S. Utilização de entulho da construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., Cuiabá, 1995. **Anais**. Rio de Janeiro: ABPv, 1995. p. 409-436.

BOSCOV, M.E.G. Estudo comparativo do comportamento de um solo saprolítico e de um solo laterítico estabilizados com cal. 1990. 157p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1990.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. **Série Legislação**: nº 81. Brasília. Câmara dos Deputados: Edições Câmara, 2012. 73p.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. Resolução nº 307, 5 de julho de 2002. **Diário Oficial da União**. nº 136, 17 de julho de 2002. p.95-96.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Altera a Resolução CONAMA nº 307 de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Resolução nº 348, 16 de agosto de 2004. **Diário Oficial da União**. nº 158, 17 de agosto de 2004. Seção 1, p.70.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional de Resíduos Sólidos: versão preliminar para consulta pública. Brasília: setembro, 2011. Disponível em:< http://www.mma.gov.br/estruturas/253/publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf> Acesso em: 15 jan. 2013.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E. P. V. Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos. Projeto Entulho Bom. Salvador. EDUFBA / Caixa Economica Federal, 2001. p.190-227

CERNI, G. et al. Permanent deformation behavior of unbound recycled mixtures. **Construction and Building Materials**. 37. p. 573-580, 2012.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/004A**: Sub-base ou base de solo-cimento. São Paulo, 2006a.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/005A**: Sub-base ou base de solo cal. São Paulo, 2006b.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/008A**: Sub-base ou base de brita graduada. São Paulo, 2005a.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/009A**: Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento - BGTC. São Paulo, 2005b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 143/2010**: Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010a.

_____. **DNIT 142/2010:** Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010b.

_____. **IPR-719:** Manual de pavimentação. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTMENT OF TRANSPORTATION MINNESOTA. **3138:** Aggregate for surface and base coarse. Minnesota, 2005.

DIAS, J. F. Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo. 2004. 251p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

EAPA. **Heavy Duty Surfaces:** the arguments for SMA. European Asphalt Pavement Association. Holanda, 1998, 40p.

EUROPEAN UNION. EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL . Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. Directive 2008/98/EC, 19 november 2008. **Official Journal of the European Union.** L312/3, 22 november 2008. 28p.

FERNANDES, C. G. Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte para uso em pavimentação. 2004. 109p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

FULLER, W.B.; THOMPSON, E. (1907) The laws of proportioning concrete. ASCE transactions LIX: 67-118. Disponível em:
<<http://archive.org/details/transactionsofam59amer>> Acesso em 13.05.2013.

GOBBO, L.A. Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo do cimento Portland. 2009. 251p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

HOPPE FILHO, J. Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto. 2008. 247p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/FDIS 19581-2:** Cement – Test methods – Part 2: Chemical analysis by X-ray fluorescence. Geneva, 2009.

KRYCKYJ, P.R.; TRICHÊS, G. Use of civil construction waste in urban pavements: a feasibility study. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 5., Belo Horizonte, 2000. **Anais**. 1 CD-ROM.

LAMBE, T. W. **Soil Mechanics**: SI version. Estados Unidos da America: Jonh Wiley & Sons, 1979. 553p.

LEITE, F. C. Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos. 2007. 185p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

LIN, K. et al. Recycling waste brick from construction and demolition of buildings as pozzolanic materials. **Waste Management & Research**. 28. p. 653-659, 2010.

LITTLE, D.N. **Handbook for estabilization of pavement subgrades and base courses with lime**. Iowa: National Lime Association: Kendall/Hunt Publishing Company, 1995. 219p.

MASSAZA, F. Pozzolanic cements. **Cement and Concrete Composites**. 15. p. 185-214, 1993.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. 2.ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. 574p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. Revisão Nicole Pagan Hasparyk, Paulo Helene, Vladimir Antonio Paulon. São Paulo: IBRACON, 2008. 674p.

MENDES, T. A. et al. Parâmetros de uma pista experimental executada com entulho reciclado. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35., Rio de Janeiro, 2004. **Anais**. Rio de Janeiro: ABPv, 2004. 1 CD-ROM.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 643p.

MOTTA, R. S. Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil em pavimentação de baixo volume de tráfego. 2005. 134p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

NATAATMADJA, A.; TAN, Y. L. Resilient response of recycled concrete road aggregates. **Journal of Transportation Engineering**. September / October. p. 450-453, 2001.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Design and construction SMA mixtures** – state of the practice. USA: NAPA, 1999. 43p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Salvador E. Giamusso. São Paulo: PINI, 1998. 738p.

PANDOLFELLI, V.C. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas**: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 224p.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355p.

POON, C.-S et al. The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. **Waste Management**. 26. p. 1166-1172, 2006.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **ETS001/2003**: Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. São Paulo, 2003.

RAMACHANDRAN, V.S. et al. **Handbook of thermal analysis of construction materials**. United States: Noyes Publications & William Andrew Publishing, 2002. 680p.

RAO, G.A. Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Researches**. 33. p. 1765-1770, 2003.

RAVERDY, M; BRIVOT, F; PAILLIERE, A. M; DRON, R. Appreciation de l'activite pouzzolanique des constituants secondaires - 7e. Congres International de la Chimie des Ciments, Paris, 1980, Vol. III, IV-36/41.

RIBEIRO, F. et al. Utilização de entulho da construção civil em pavimentos flexíveis. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 11., Porto Alegre, 2002. **Anais**. Rio de Janeiro: ABPv, 2002. 1 CD-ROM.

RICCI, G. Estudo características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e demolição para pavimentação. 2007. 196p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

ROAD AUTHORITY OF VICTORIA. **SECTION 820**: Crushed concrete for pavement subbase and light duty base. Victoria, 2011.

ROAD AUTHORITY OF VICTORIA. **SECTION 821**: Cementitious treated crushed concrete for pavement subbase. Victoria, 2011.

SHEN, S. ; YU, H. Characterize of packing of aggregate particles for paving materials: particle size impact. **Construction and Building Materials**. 25. p. 1362-1368, 2011.

SILVA, P.B. Estudo em laboratório e em campo de misturas SMA 0/8S. 2005. 132p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

TAYLOR, H.F.W. **Cemente chemistry**. London: Academic Press, 1990. 475p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in engineering practice**. Estados Unidos da America: Jonh Wiley & Sons, 1996. 549p.

ULSEN, C. Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição. 2011. 222p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

VEGAS, I. et al. Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. **Construction and Building Materials**. n. 25. p. 2674-2682, 2011.

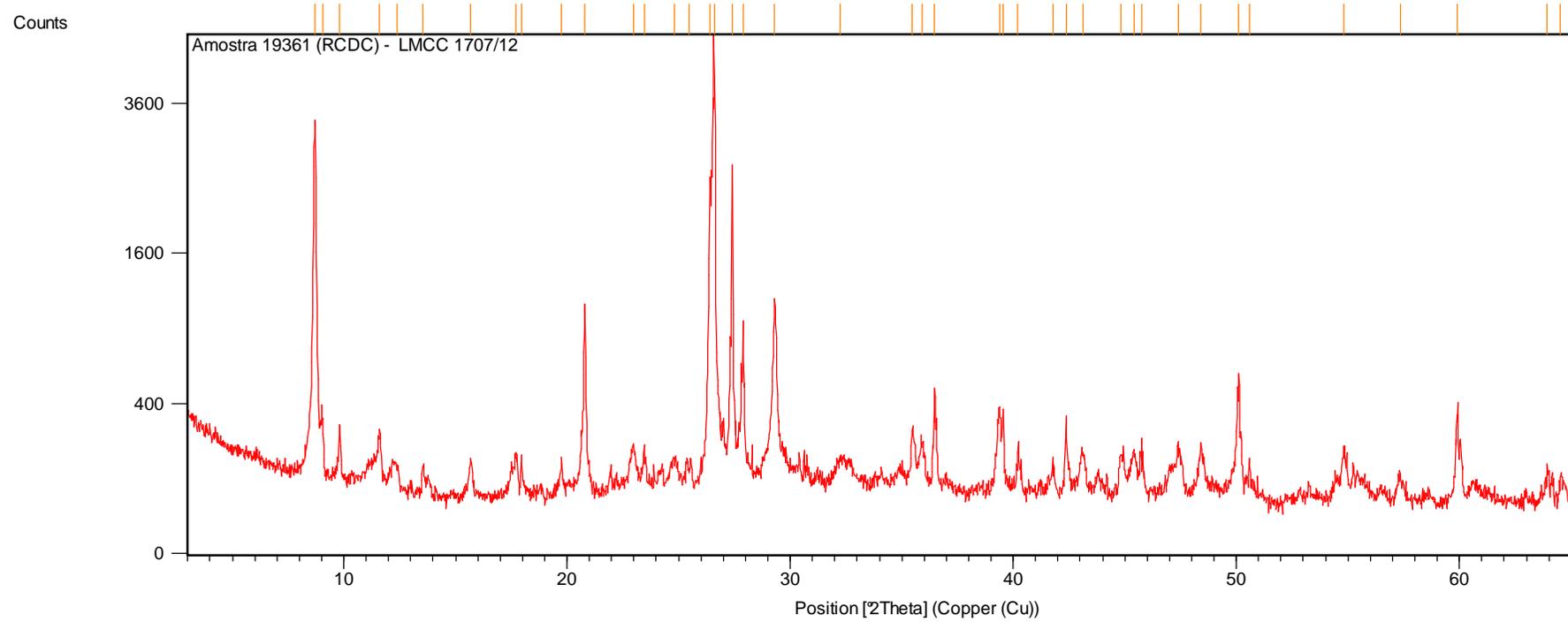
WERKMEISTER, S. et al. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. **Transportation Research Record**. n. 1757. p. 75-81, 2001.

WERKMEISTER, S. Permanent deformation behavior of granular materials in pavement constructions. 2003. 188p. Tese (Doutorado). Dresden University of Technology. Alemanha, 2003.

WU, Y. et al. Application of recycled brick-stone aggregate in road base. In: GeoHuna. Changsha, Hunan, China, 2009. **Proceedings**. American Society of Civil Engineers, 2009. p. 43-48.

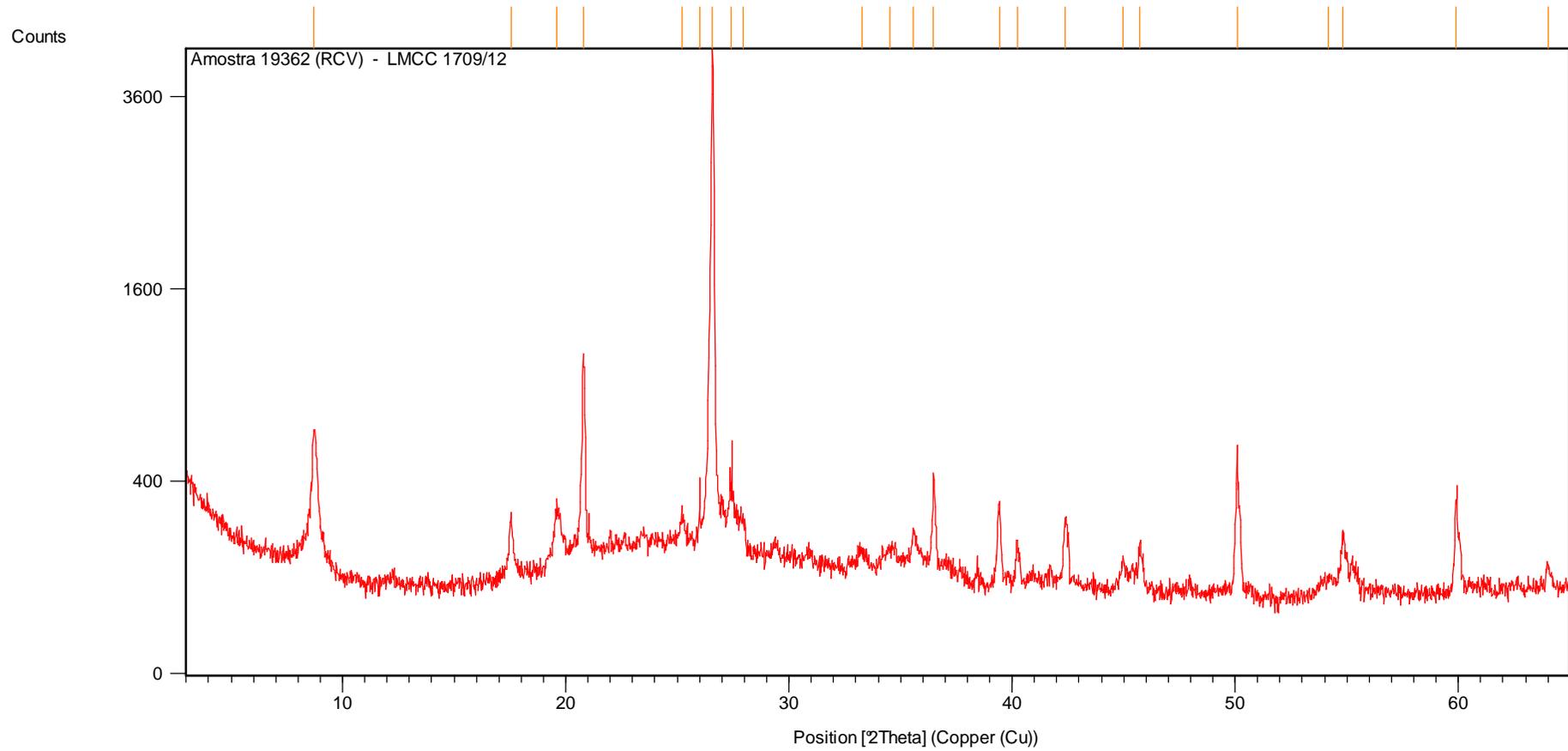
XUAN, D. Cement treated recycled crushed concrete and masonry aggregates for pavements. 2012. 250p. Tese (Doutorado). Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University Technology. Holanda, 2012.

APÊNDICE A - DIFRATOGRAMAS E TERMOGRAMAS



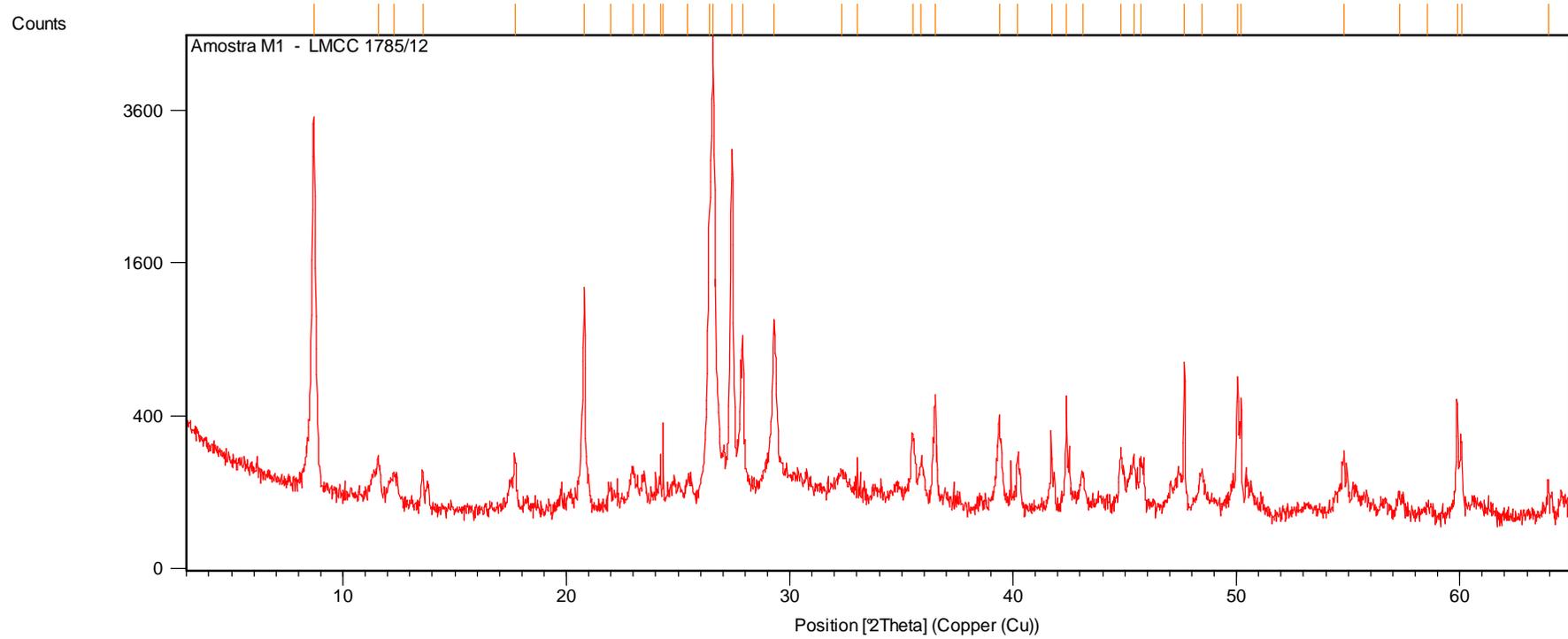
Peak List
Quartz; Si O ₂
Calcite, syn; Ca C O ₃
Muscovite-2WTMARG#1, ammonian; (K , NH ₄ , Na) Al ₂ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Microcline maximum; K Al Si ₃ O ₈
Brushite; Ca P O ₃ (OH) · 2 H ₂ O
Calcium Silicate Hydrate; Ca _{1.5} Si O _{3.5} !x H ₂ O
Calcium Silicate; Ca ₂ Si O ₄
Etringite, syn; Ca ₆ Al ₂ (S O ₄) ₃ (OH) ₁₂ · 26 H ₂ O
Heulandite-Ca; Ca (Si ₇ Al ₂) O ₁₈ · 16 H ₂ O
Portlandite, syn; Ca (OH) ₂

Difratograma 1 - Agregado reciclado cimentício (Cim)



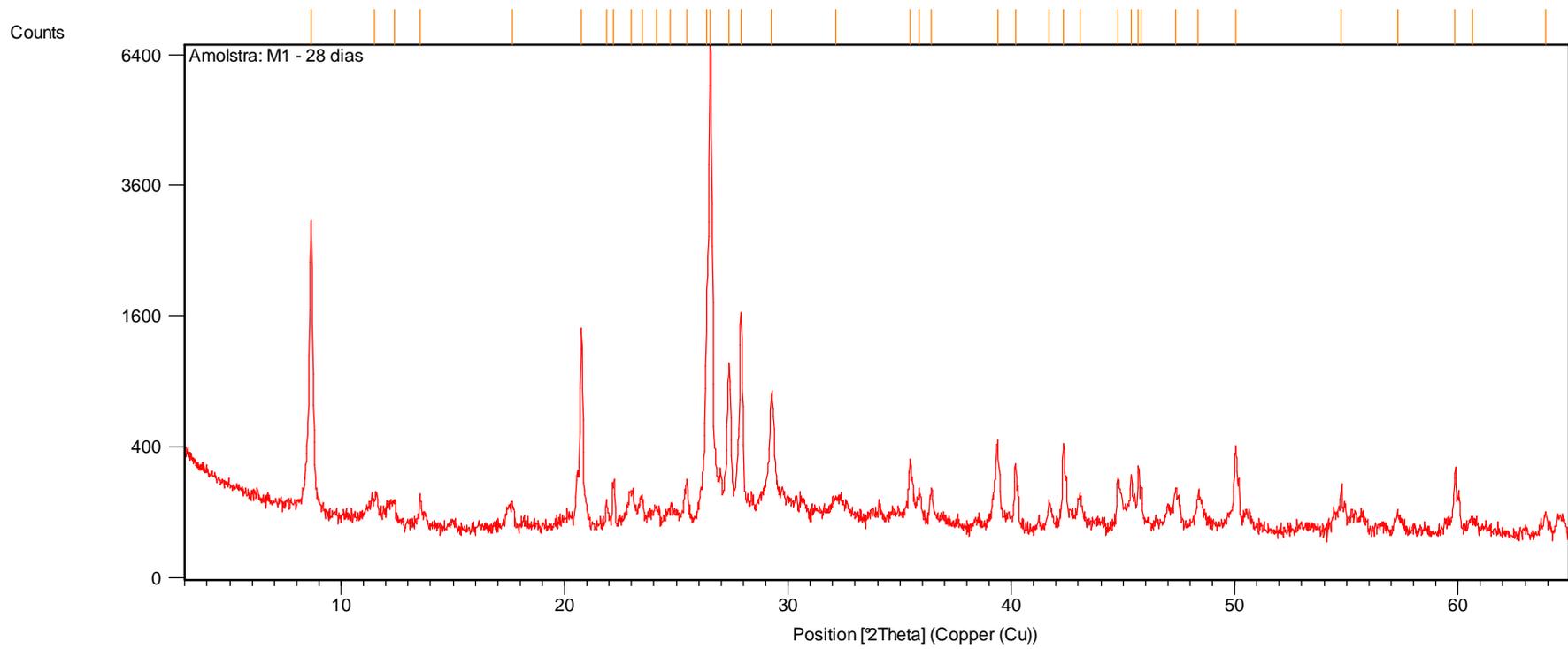
Peak List
Quartz; Si O ₂
Muscovite-2VTMNRG#1, ammonian; (K , N ₁ H ₄ , Na) Al ₂ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Sanidine; K Al Si ₃ O ₈
Hematite, syn; Fe ₂ O ₃

Difratograma 2 – Agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv)



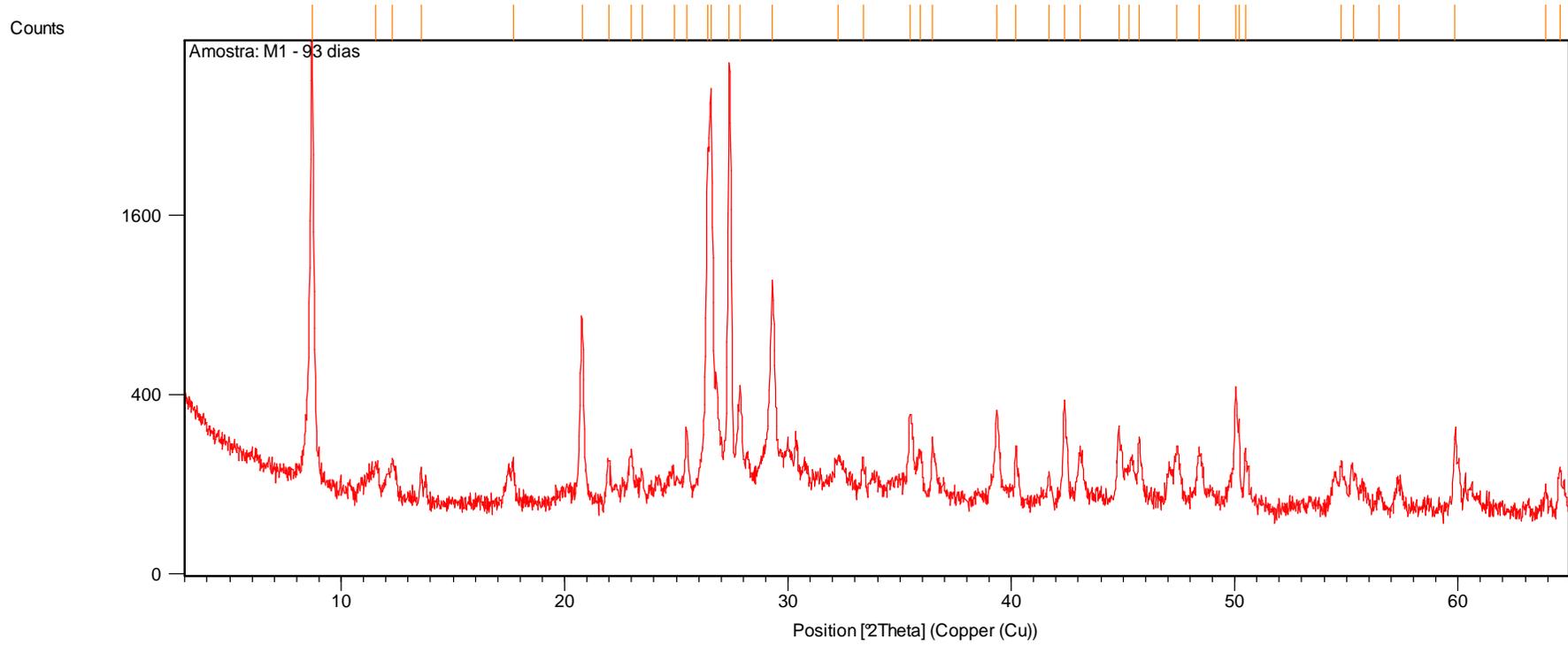
Peak List
Quartz; Si O ₂
Calcite; Ca C O ₃
Albite high; K _{0.2} Na _{0.8} Al Si ₃ O ₈
Muscovite-2VTMARG#1, ammonian; (K , NH ₄ , Na) Al ₂ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Gypsum, syn; Ca S O ₄ 1/2 H ₂ O
Calcium Silicate; Ca ₂ Si O ₄
Calcium Silicate Hydrate; Ca _{1.5} Si O _{3.5} !x H ₂ O
Kaolinite 1Md; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ !11 H ₂ O

Difratograma 3 – Mistura Cim – 7 dias de cura



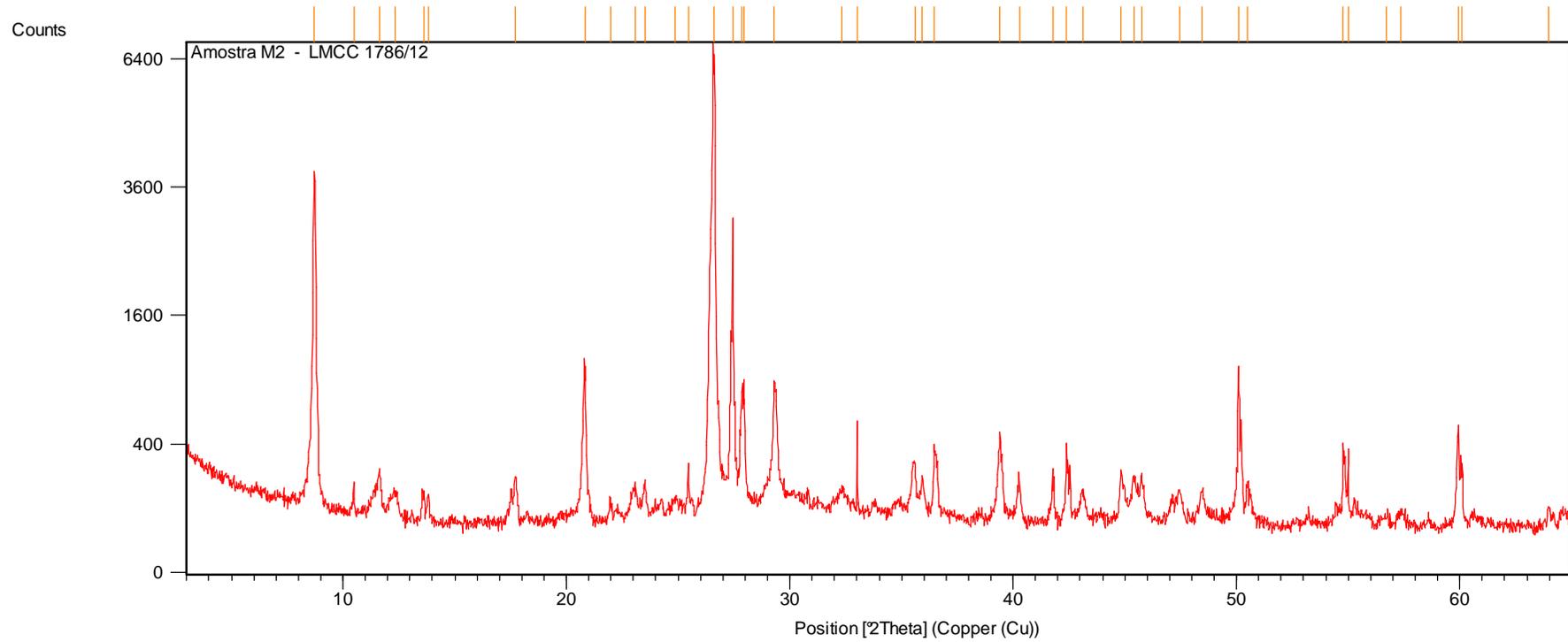
Peak List
Quartz; Si O ₂
Calcite; Ca C O ₃
Anorthite, ordered; Ca Al ₂ Si ₂ O ₈
Muscovite-2TMARG#1, ammonian; (K , N ₁ H ₄ , Na) Al ₂ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Calcium Silicate; Ca ₂ Si O ₄
Gypsum, syn; Ca S O ₄ 1/2 H ₂ O
Calcium Silicate Hydrate; Ca _{1.5} Si O _{3.5} !x H ₂ O
Kaolinite 1Md; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ !11 H ₂ O

Difratograma 4 – Mistura Cim – 28 dias de cura



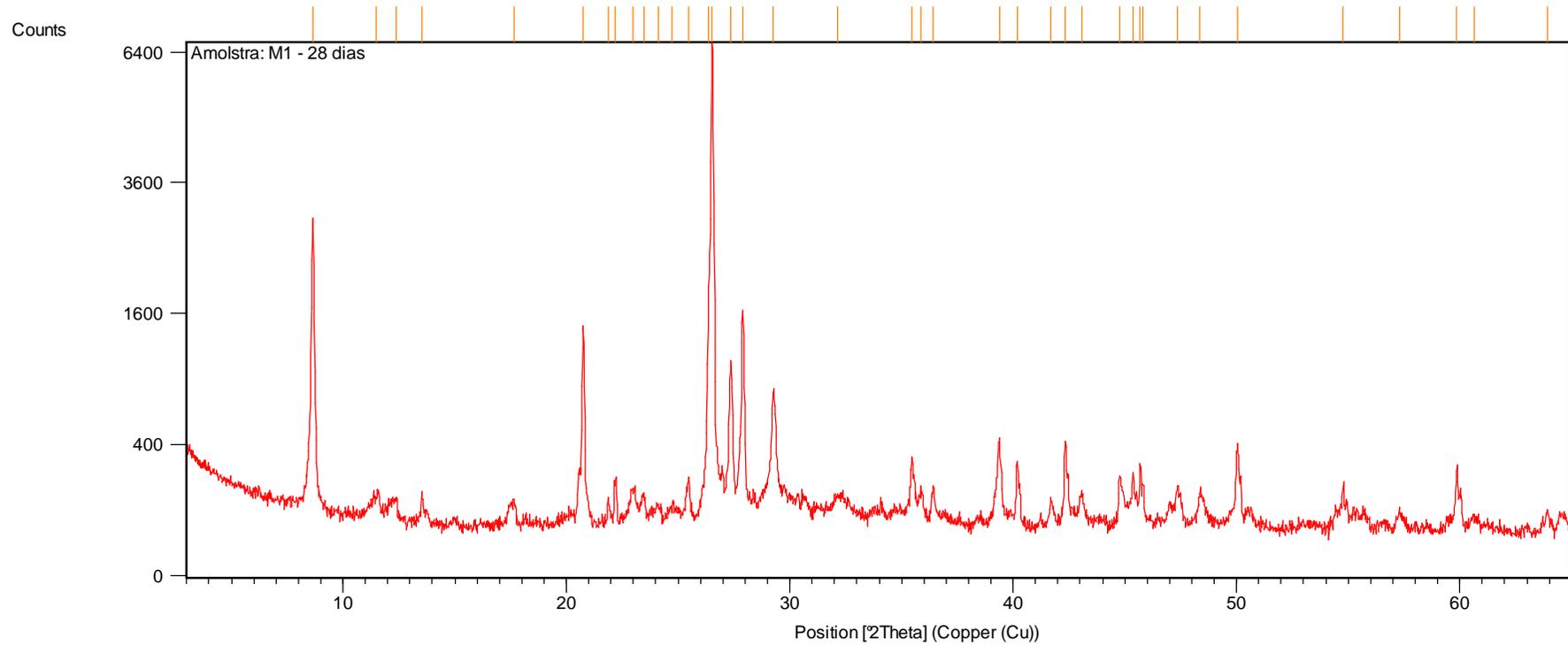
Peak List
Quartz; Si O ₂
Calcite; Ca C O ₃
Anorthite, ordered; Ca Al ₂ Si ₂ O ₈
Muscovite-2VTMARG#1, ammonian; (K, N ₁ H ₄ , Na) Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Calcium Silicate; Ca ₂ Si O ₄
Gypsum, syn; Ca S O ₄ 1/2 H ₂ O
Calcium Silicate Hydrate; Ca _{1.5} Si O _{3.5} 1/2 H ₂ O
Kaolinite 1Md; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ 11 H ₂ O

Difratograma 5 – Mistura Cim – 91 dias de cura



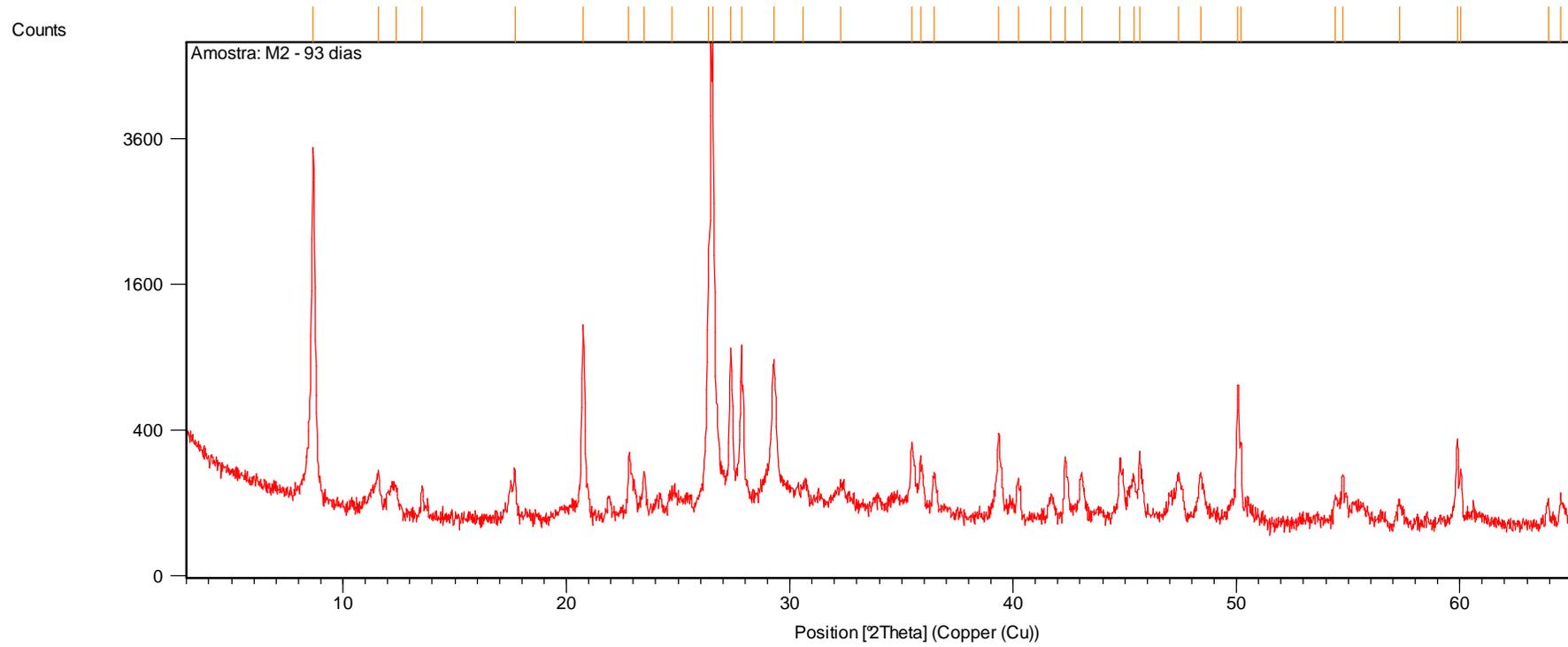
Peak List
Quartz; Si O ₂
Calcite; Ca C O ₃
Albite high; K _{0.2} Na _{0.8} Al Si ₃ O ₈
Muscovite-2VTMARG#1, ammonian; (K , N ₁ H ₄ , Na) Al ₂ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Gypsum, syn; Ca S O ₄ 1/2 H ₂ O
Calcium Silicate; Ca ₂ Si O ₄
Calcium Silicate Hydrate; Ca _{1.5} Si O _{3.5} 1x H ₂ O
Richterite, potassian; syn; Na (Ca K) Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ 1.1 H ₂ O
Kaolinite 1Md; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄

Difratograma 6 – Mistura Cim+Cv<0,15mm – 7 dias de cura



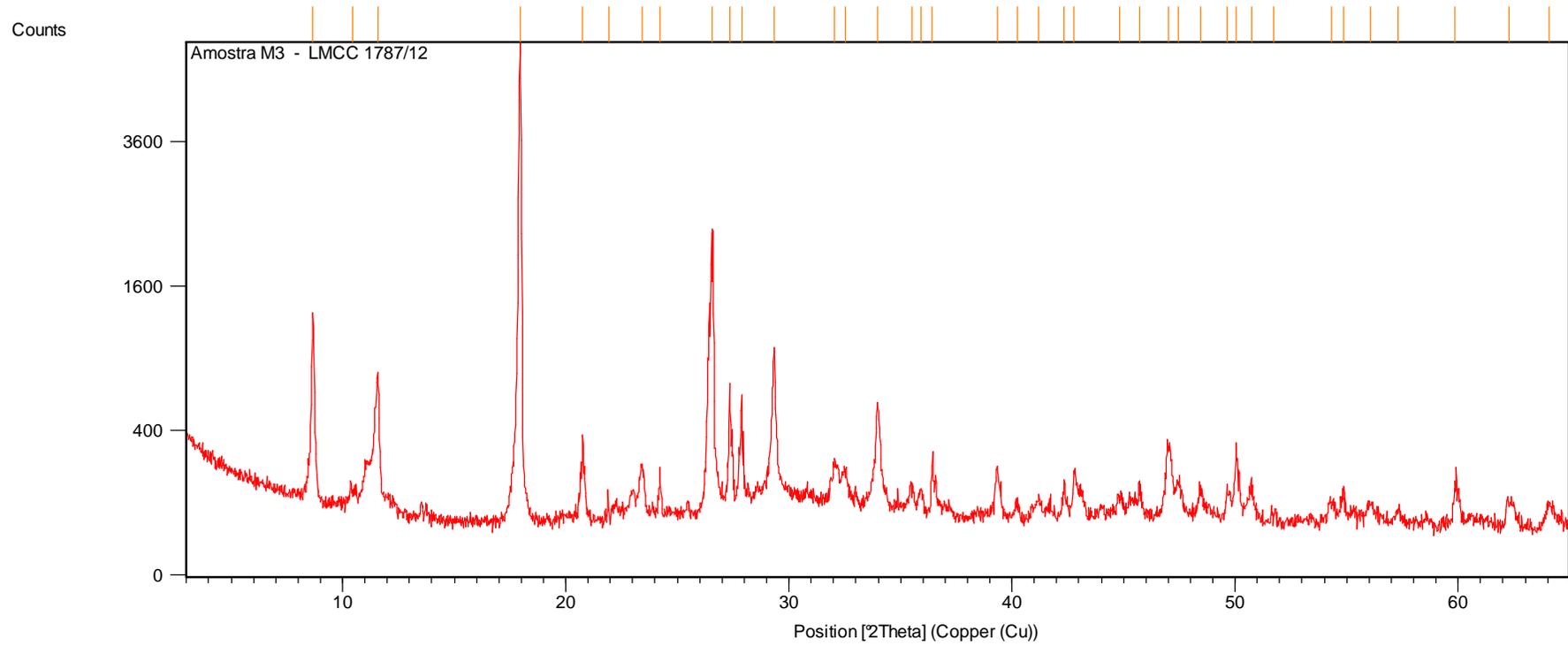
Peak List
Quartz; Si O ₂
Calcite; Ca C O ₃
Anorthite, ordered; Ca Al ₂ Si ₂ O ₈
Muscovite-2TMARG#1, ammonian; (K, N ₄ H, Na) Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Calcium Silicate; Ca ₂ Si O ₄
Gypsum, syn; Ca S O ₄ 1/2 H ₂ O
Calcium Silicate Hydrate; Ca _{1.5} Si O _{3.5} !x H ₂ O
Kaolinite 1Md; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ !11 H ₂ O

Difratograma 7 – Mistura Cim+Cv<0,15mm – 28 dias de cura



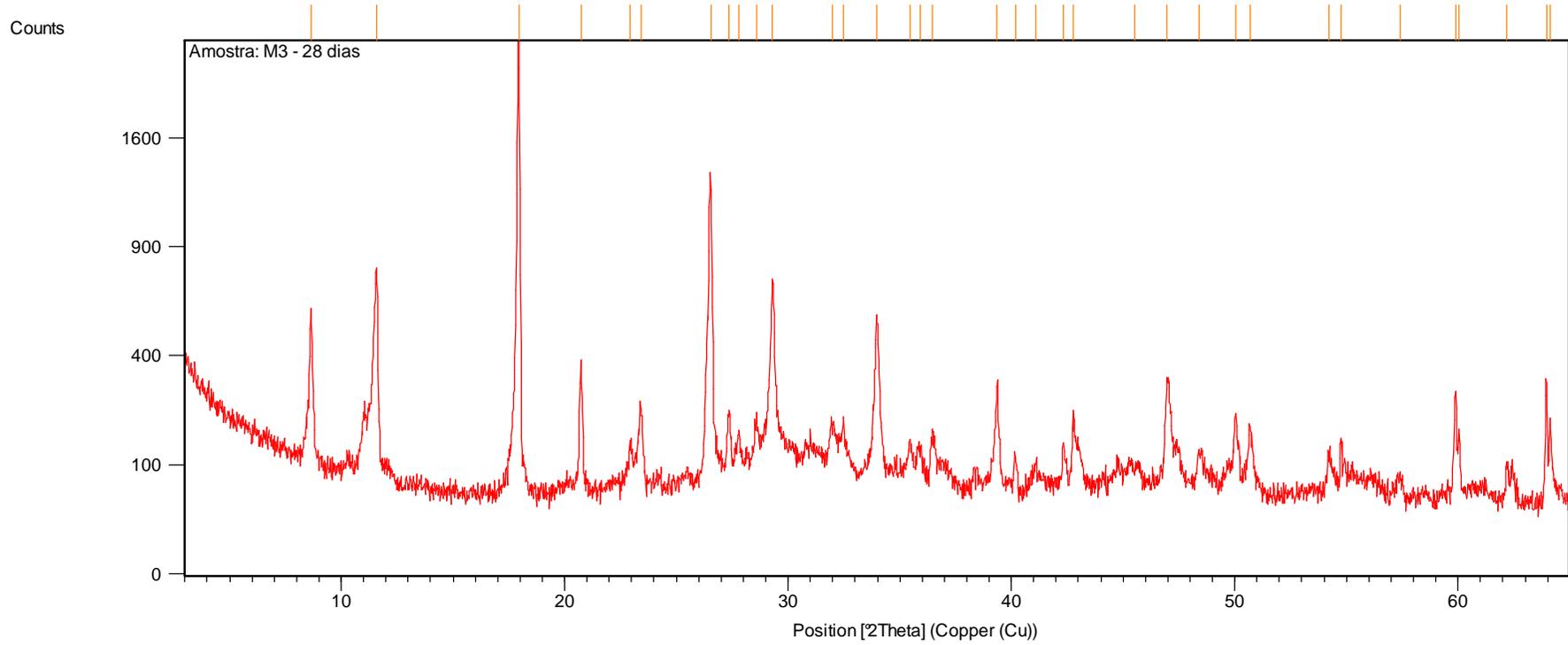
Peak List
Quartz; Si O ₂
Biotite-1VTMRG; K (Mg, Fe +2) ₃ (Al, Fe +3) ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂
Anorthoclase, disordered; (Na, K) (Si ₃ Al) O ₈
Calcite, syn; Ca C O ₃
Calcium Silicate Hydrate; Ca _{1.5} Si O _{3.5} !x H ₂ O
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ !11 H ₂ O
Larnite, syn; Ca ₂ Si O ₄
Kaolinite 1Md; Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Gypsum, syn; Ca S O ₄ !2 H ₂ O

Difratograma 8 – Mistura Cim+Cv<0,15mm – 91 dias de cura



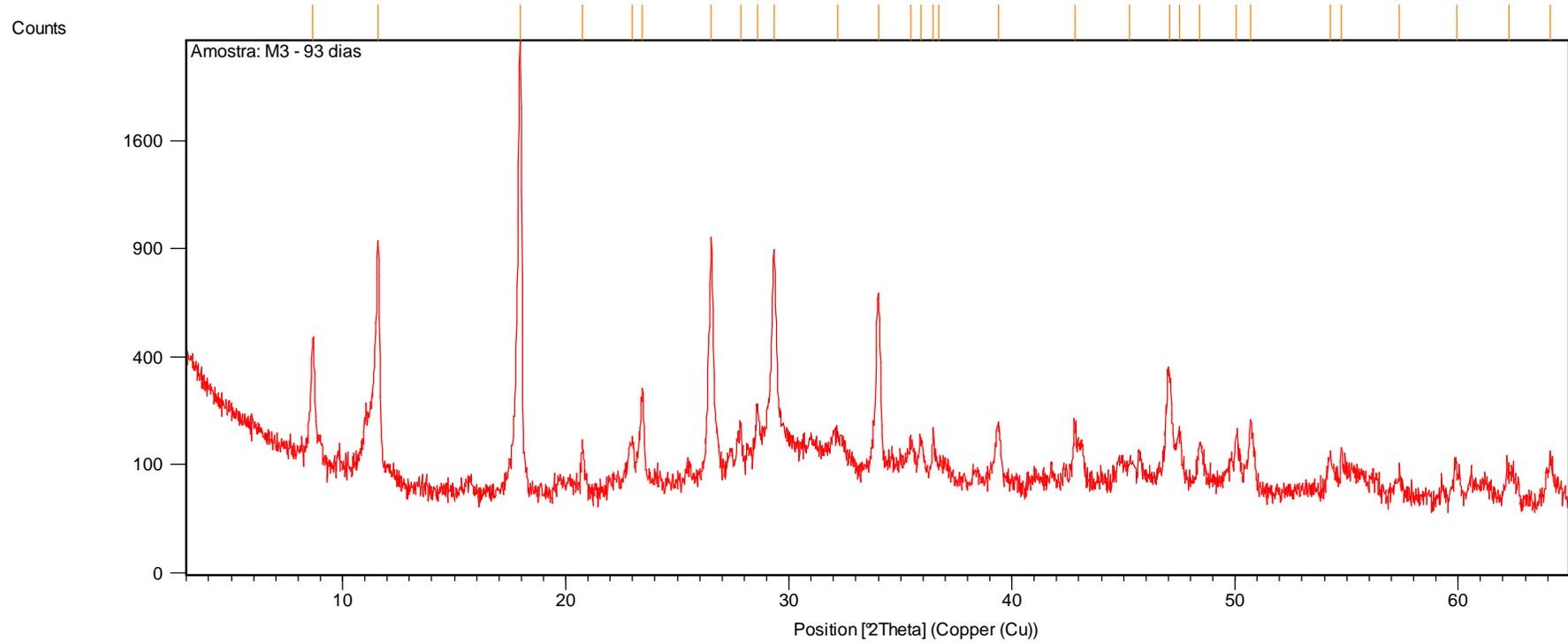
Peak List
Quartz; Si O ₂
Biotite; K Fe Mg ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (OH) ₂
Portlandite; Ca (OH) ₂
Calcite, syn; Ca C O ₃
Larnite, syn; Ca ₂ Si O ₄
Gypsum; Ca (S O ₄) (H ₂ O) ₂
Cordierite (Mn-exchanged), syn; Mn ₂ (Al ₄ Si ₅ O ₁₈)
Calcium Silicate Hydrate; Ca _{1.5} Si O _{3.5} !x H ₂ O
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ !11 H ₂ O
Anorthite, ordered; Ca Al ₂ Si ₂ O ₈

Difratograma 9 – Mistura Cim+cP – 7 dias de cura



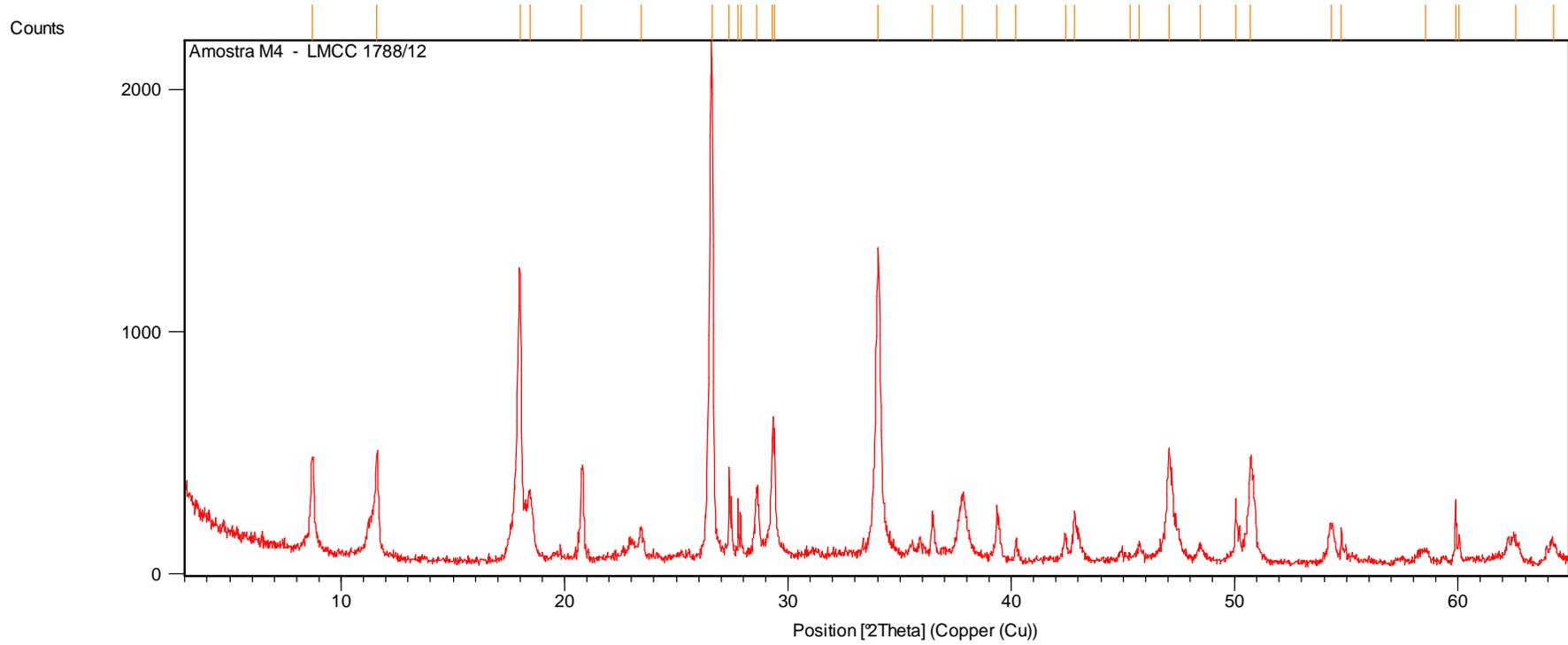
Phase Name	Chemical Formula
Quartz α	SiO ₂
Calcite	CaCO ₃
Portlandite, syn	Ca(OH) ₂
Biotite-1VTMRG	K(Mg, Fe+2) ₃ (Al, Fe+3)Si ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate	Ca ₄ Al ₂ O ₆ CO ₃ ·11H ₂ O
Calcium Silicate	Ca ₂ SiO ₄
Anorthoclase, disordered	(Na, K)(Si ₃ Al)O ₈
Calcium Silicate Hydrate	Ca _{1.5} Si _{0.5} ·xH ₂ O
Microcline	KAlSi ₃ O ₈

Difratograma 10 – Mistura Cim+cP – 28 dias de cura



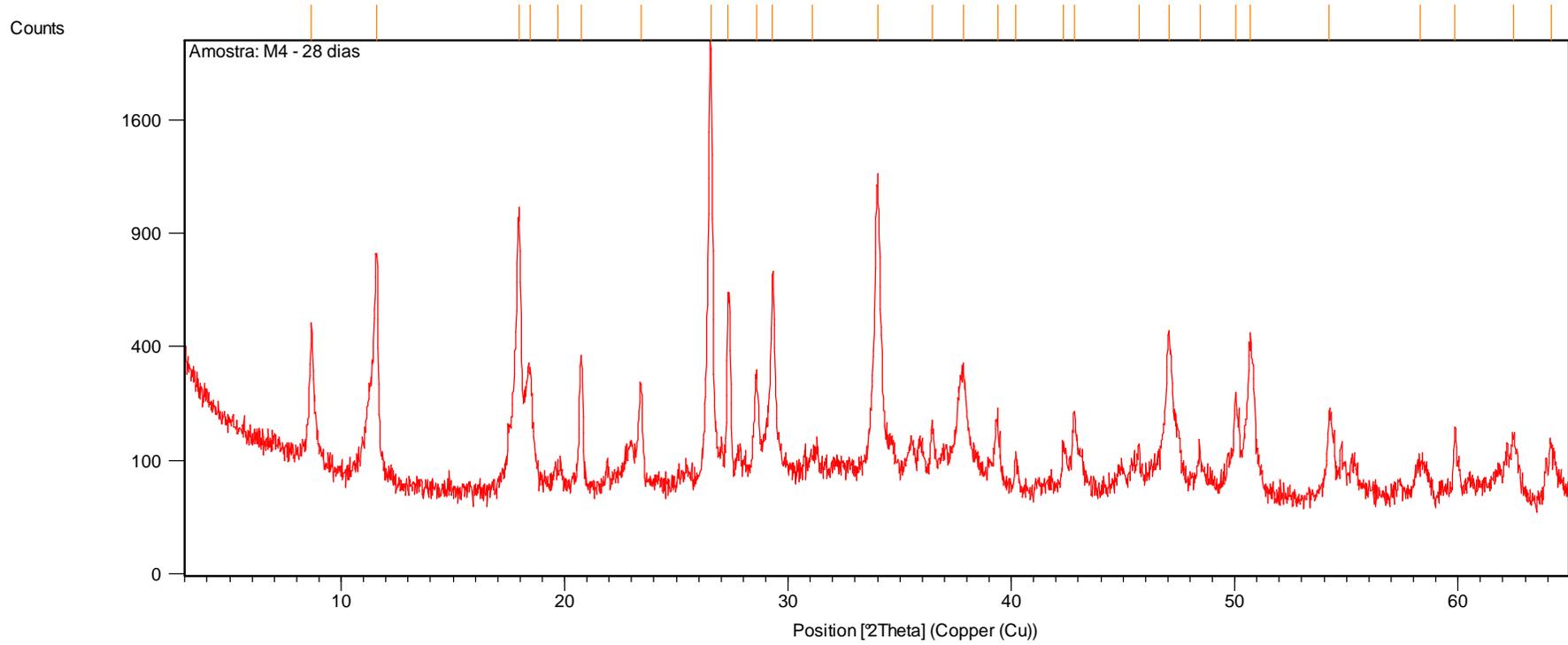
Phase Name	Chemical Formula
Portlandite, syn;	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Calcite;	CaCO_3
Quartz α ;	SiO_2
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate;	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{C}_3\text{H}_{11}\text{O}$
Biotite-1\text{TM}RQ;	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2})_3(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$
Calcium Silicate;	Ca_2SiO_4
Calcium Silicate Hydrate;	$\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$
Anorthoclase, disordered;	$(\text{Na}, \text{K})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$

Difratograma 11 – Mistura Cim+cP – 91 dias de cura



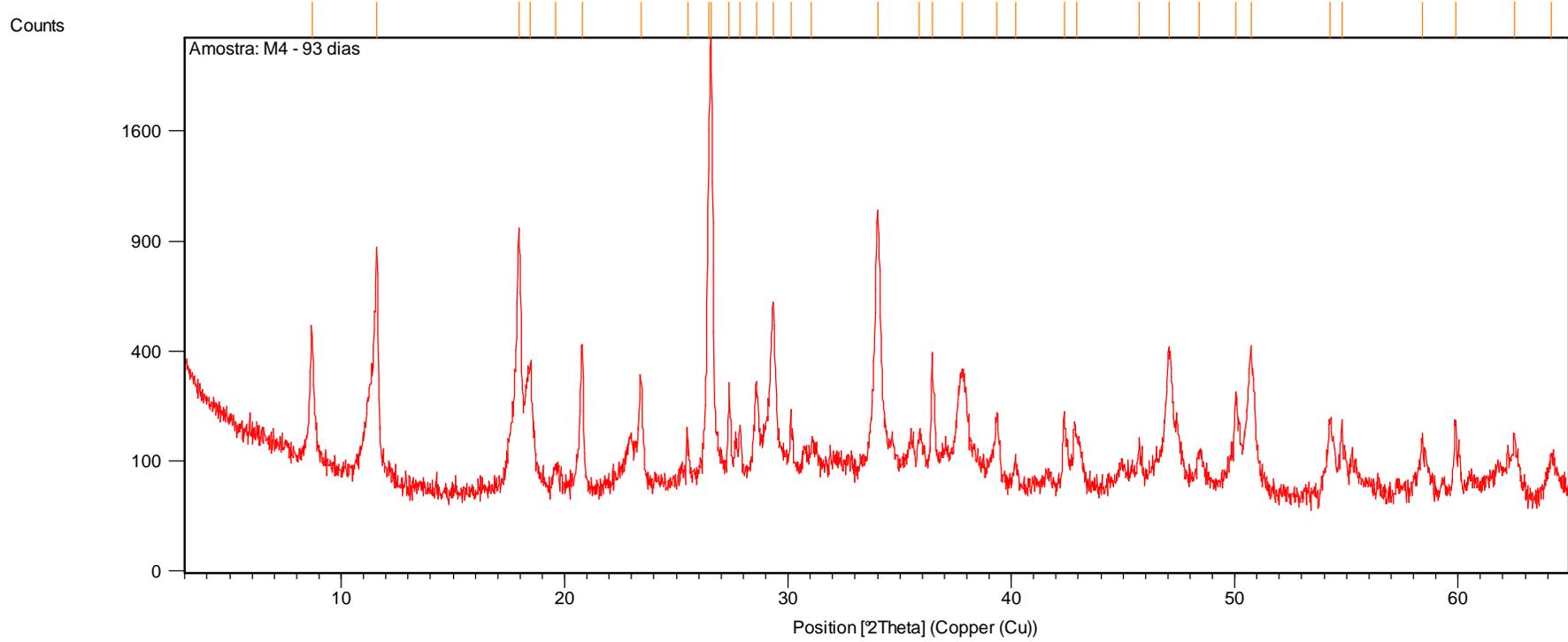
Phase Name	Chemical Formula
Quartz	Si O ₂
Portlandite, syn;	Ca (OH) ₂
Calcite, syn;	Ca (C O ₃)
Brucite;	Mg (OH) ₂
Biotite 1M Ti-rich;	K (Mg _{1.48} Fe _{1.28} Ti _{0.24}) (Al _{1.2} Si _{2.8} O ₁₀) (OH) _{1.4} F _{0.32} O _{0.28}
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate;	Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ 11 H ₂ O
Anorthite, ordered;	Ca Al ₂ Si ₂ O ₈

Difratograma 12 – Mistura 70%Cim+30%Cv+cal – 7 dias de cura



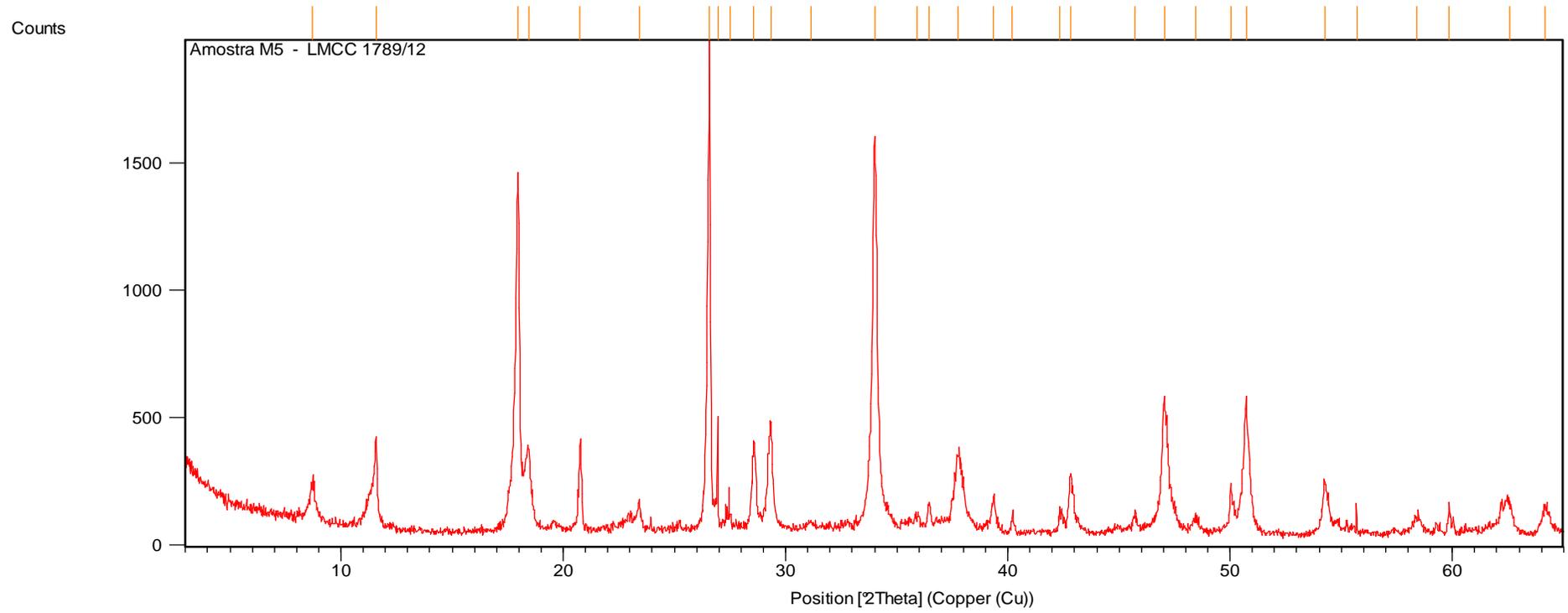
Peak List
Quartz; Si O ₂
Portlandite; Ca (OH) ₂
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ · 11 H ₂ O
Calcite, syn; Ca C O ₃
Microcline; K Al Si ₃ O ₈
Brucite; Mg (OH) ₂
Biotite; K Fe Mg ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (OH) ₂

Difratograma 13 – Mistura 70%Cim+30%Cv+cal – 28 dias de cura



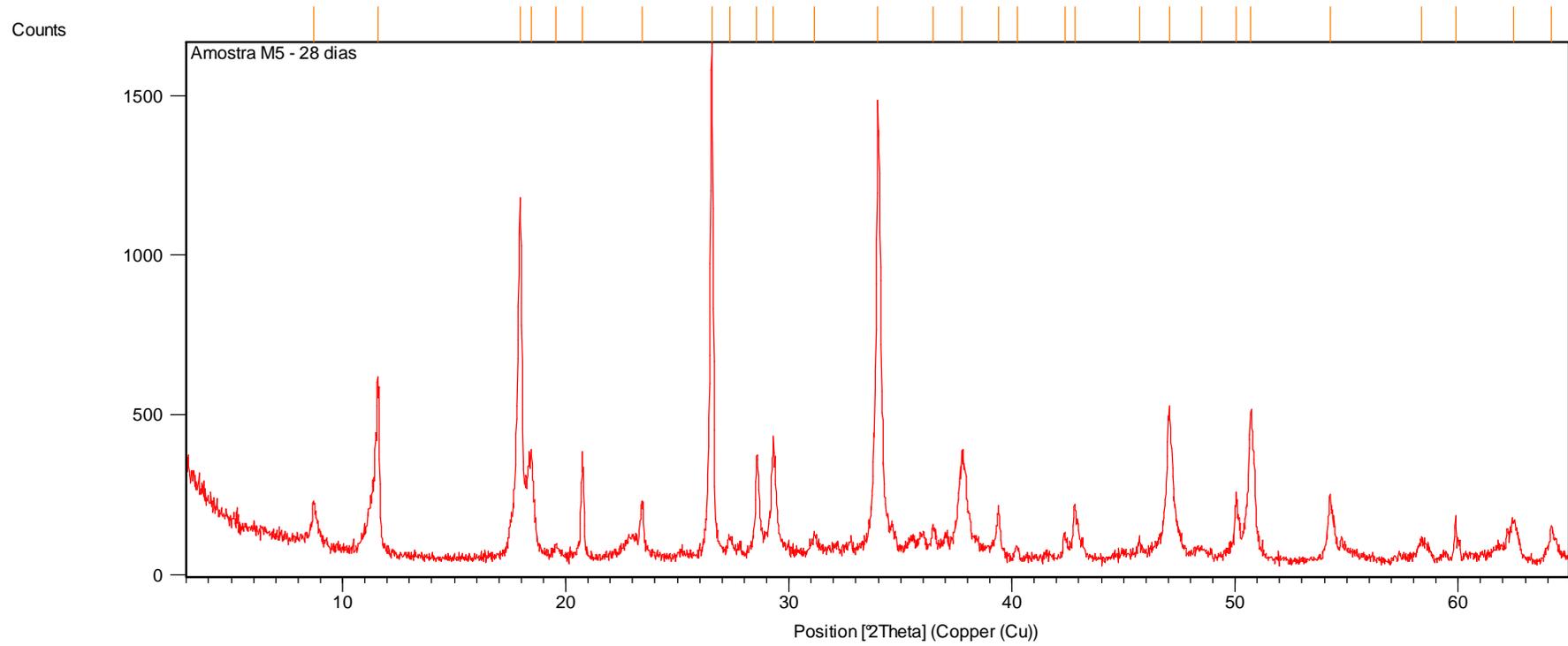
Phase Name	Chemical Formula
Quartz	Si O ₂
Portlandite	Ca (OH) ₂
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate	Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ · 11 H ₂ O
Calcite, syn	Ca C O ₃
Brucite	Mg (OH) ₂
Biotite	K Fe Mg ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (OH) ₂
Microcline	K Al Si ₃ O ₈
Albite, ordered	Na Al Si ₃ O ₈

Difratograma 14 – Mistura 70%Cim+30%Cv+cal – 91 dias de cura



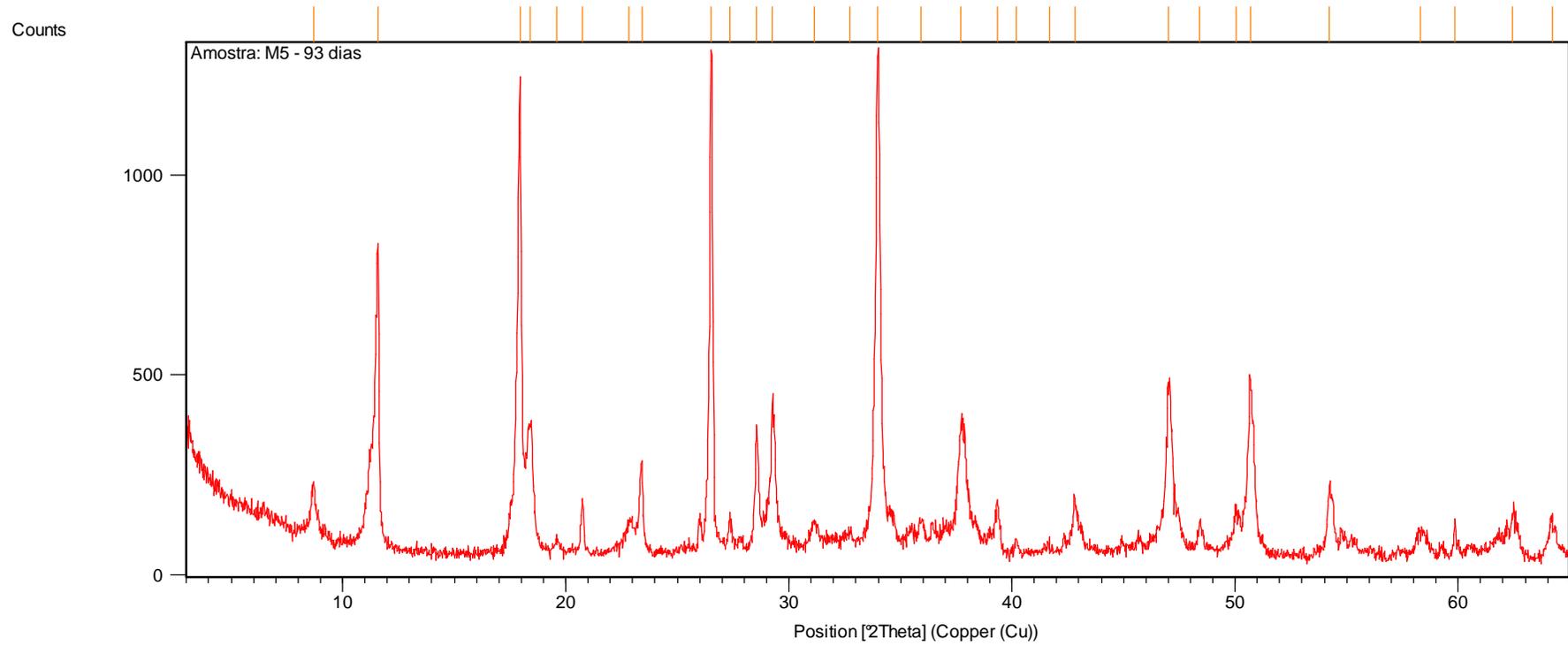
Peak List
Quartz; Si O ₂
Portlandite, syn; Ca (OH) ₂
Calcite; Ca C O ₃
Brucite, syn; Mg (OH) ₂
Biotite; K Fe Mg ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (OH) ₂
Sanidine; (K _{0.831} Na _{0.169}) (Al Si ₃ O ₈)
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ C O ₃ · 11 H ₂ O

Difratograma 15 - Difratograma de raios-X – Mistura Cv+cal – 7 dias de cura



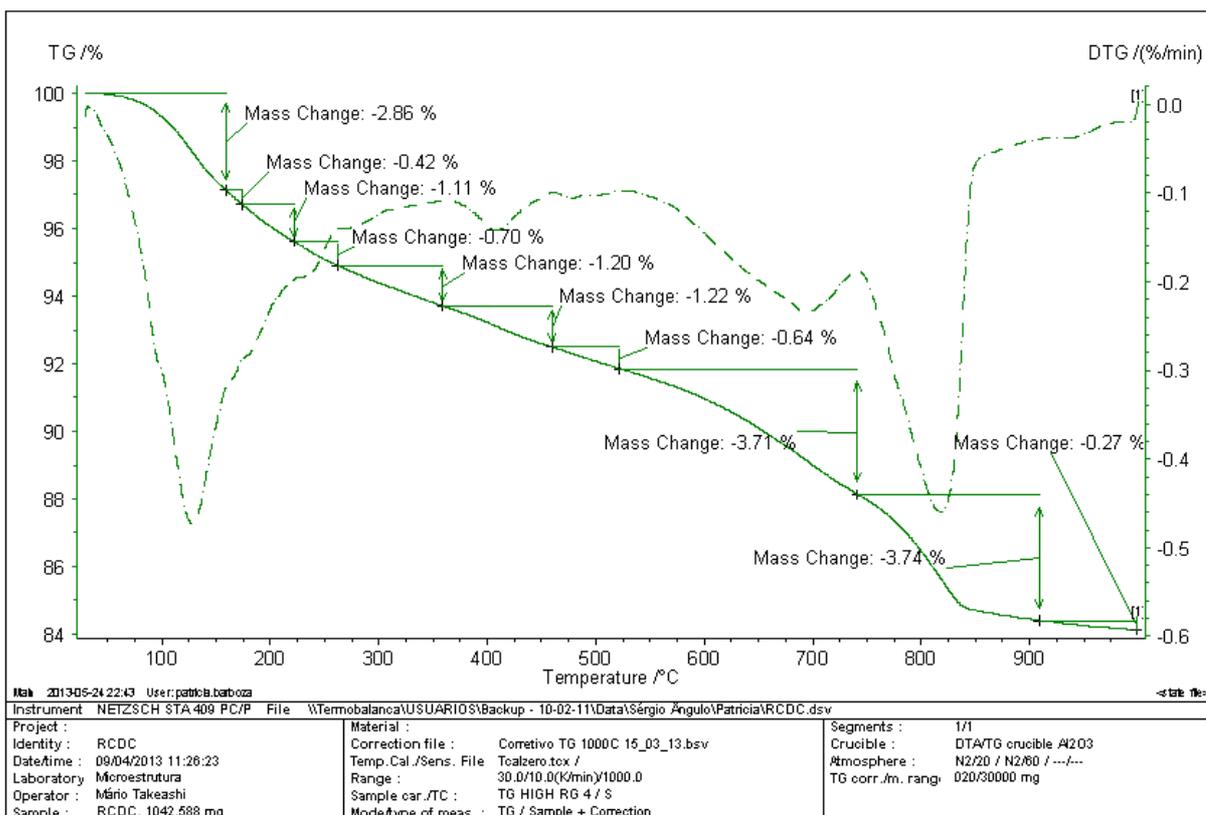
Peak List
Portlandite; $\text{Ca}(\text{OH})_2$
Quartz; SiO_2
Biotite; $\text{KFeMg}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{C}_2\text{O}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
Calcite, syn; CaCO_3
Brucite, syn; $\text{Mg}(\text{OH})_2$
Calcium Iron Oxide; CaFeO_2
Calcium Silicate; Ca_2SiO_4
Anorthoclase, disordered; $(\text{Na}, \text{K})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$

Difratograma 16 – Mistura Cv+cal – 28 dias de cura

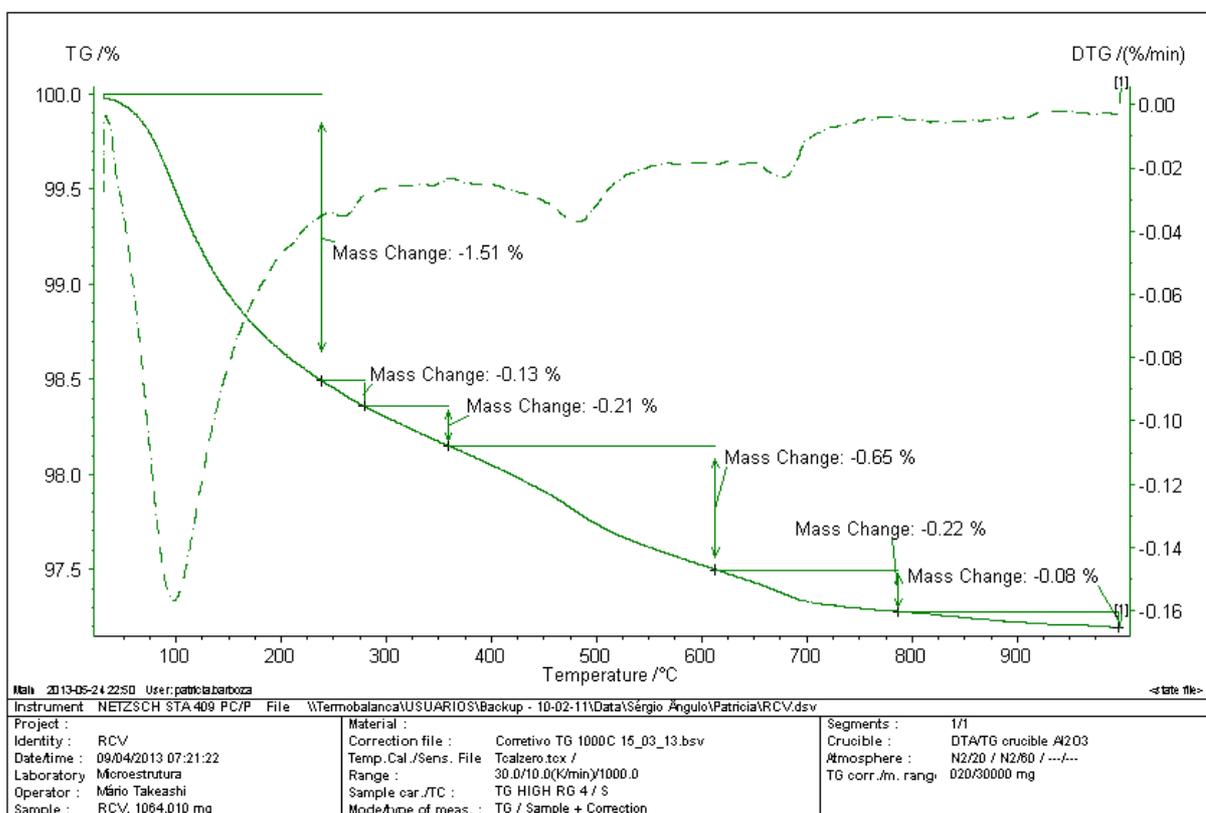


Peak List
Portlandite; Ca (OH) ₂
Quartz; Si O ₂
Biotite; K Fe Mg ₂ (Al Si ₃ O ₁₀) (OH) ₂
Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate; Ca ₄ Al ₂ O ₆ · 1/2 CaCO ₃ · 11 H ₂ O
Calcite, syn; Ca CO ₃
Brucite, syn; Mg (OH) ₂
Calcium Iron Oxide; Ca Fe O ₂
Calcium Silicate; Ca ₂ Si O ₄
Anorthoclase, disordered; (Na, K) (Si ₃ Al) O ₈

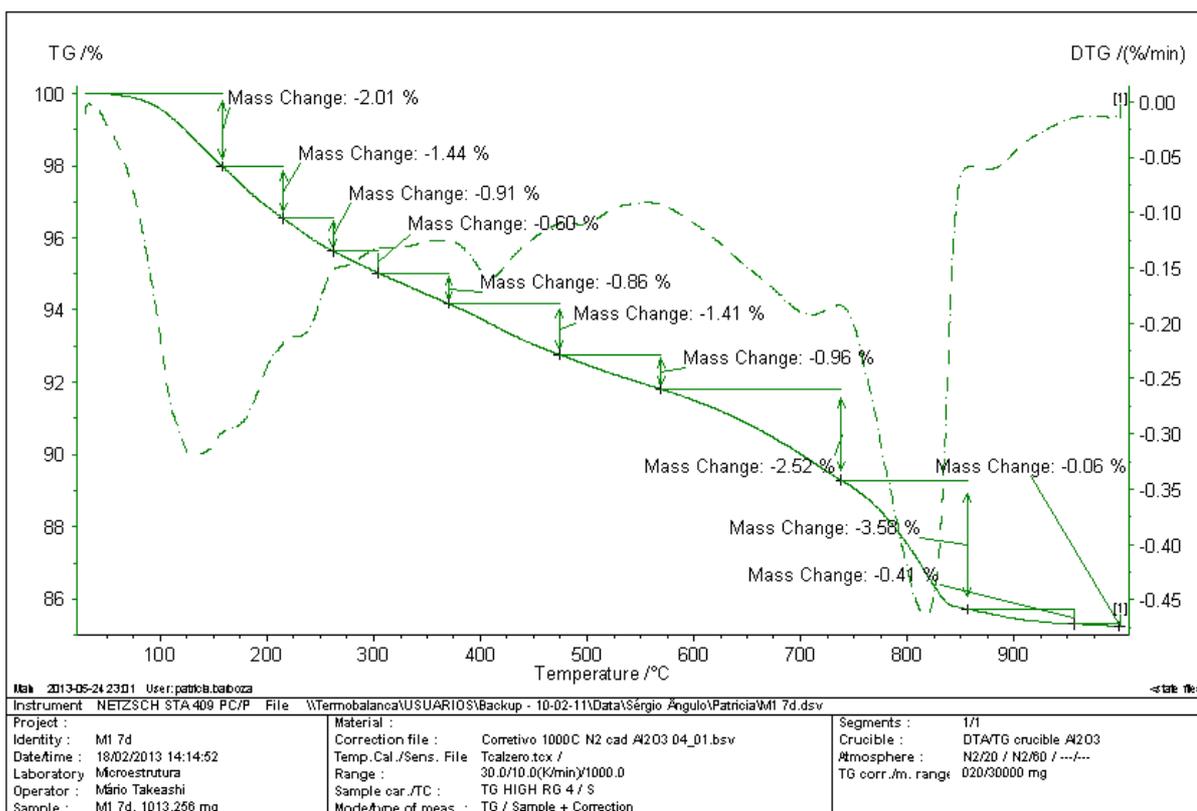
Difratograma 17 – Mistura Cv+cal – 91 dias de cura



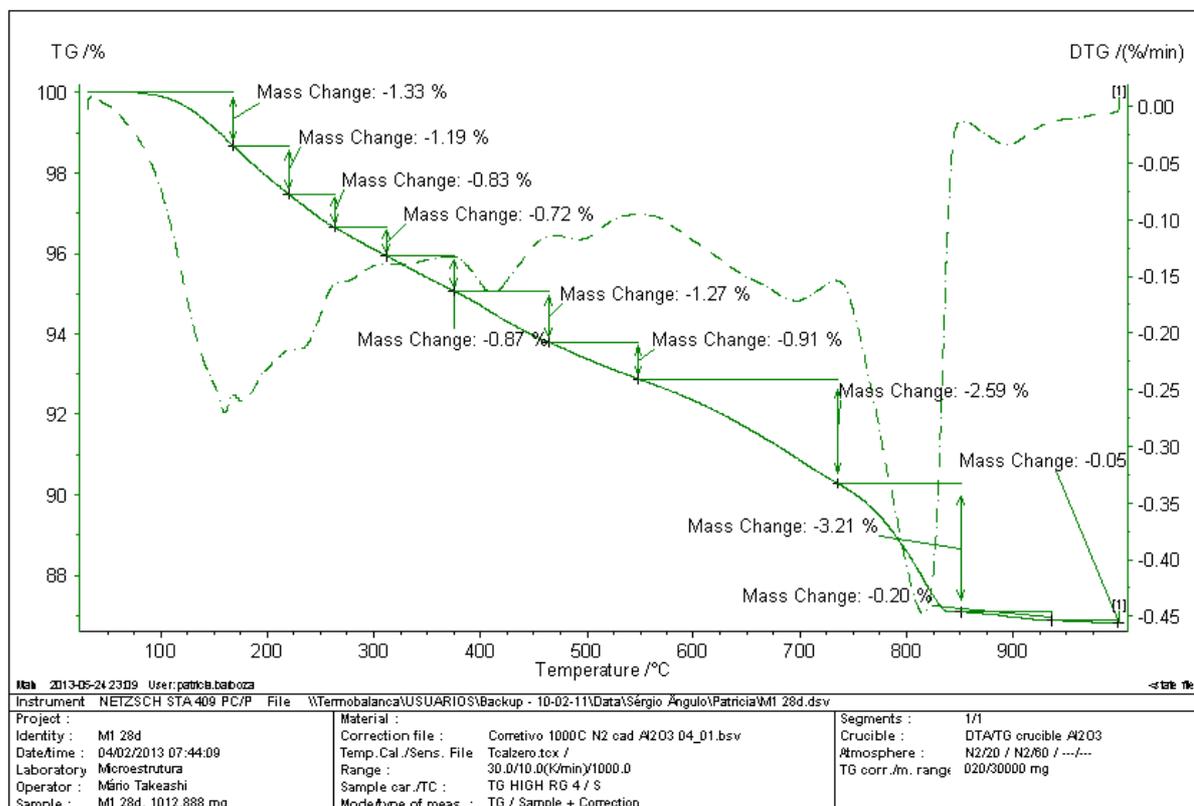
Termograma 1 - Agregado reciclado cimentício (Cim)



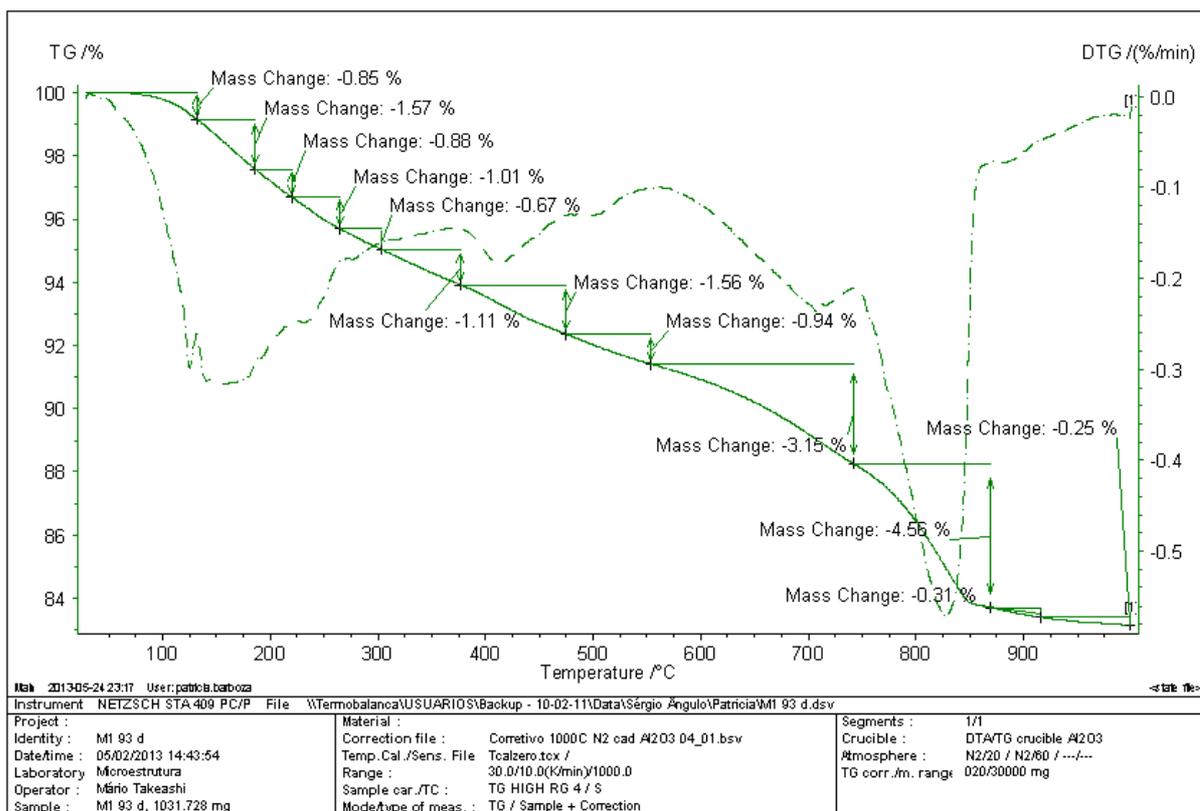
Termograma 2 - Agregado reciclado de cerâmica vermelha (Cv)



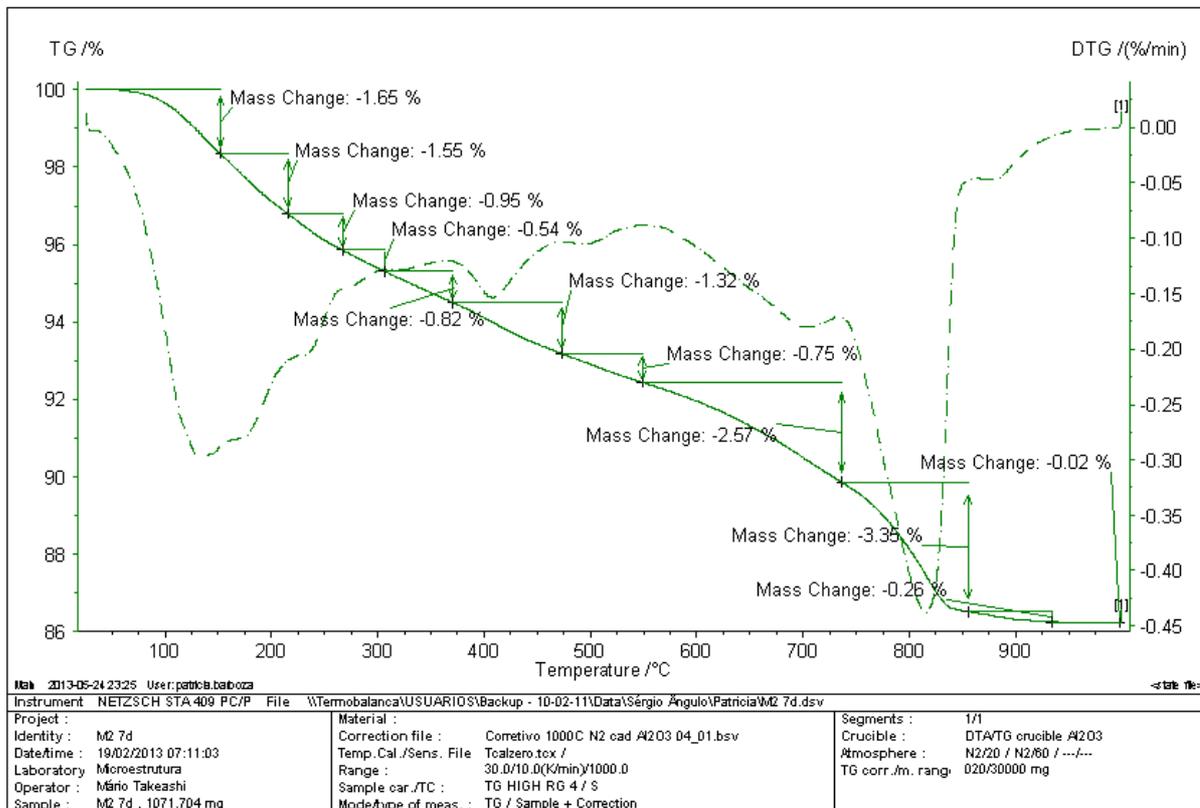
Termograma 3 - Mistura Cim aos 7 dias de cura



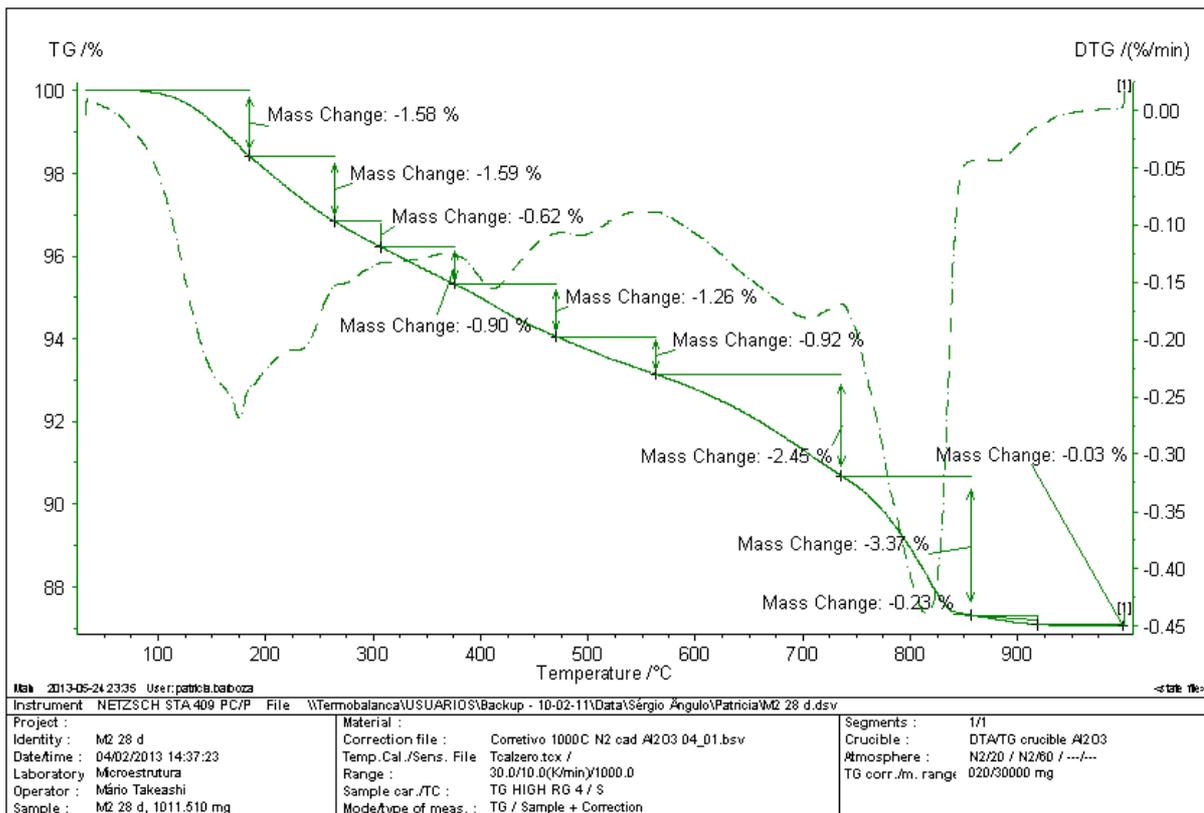
Termograma 4 - Mistura Cim aos 28 dias de cura



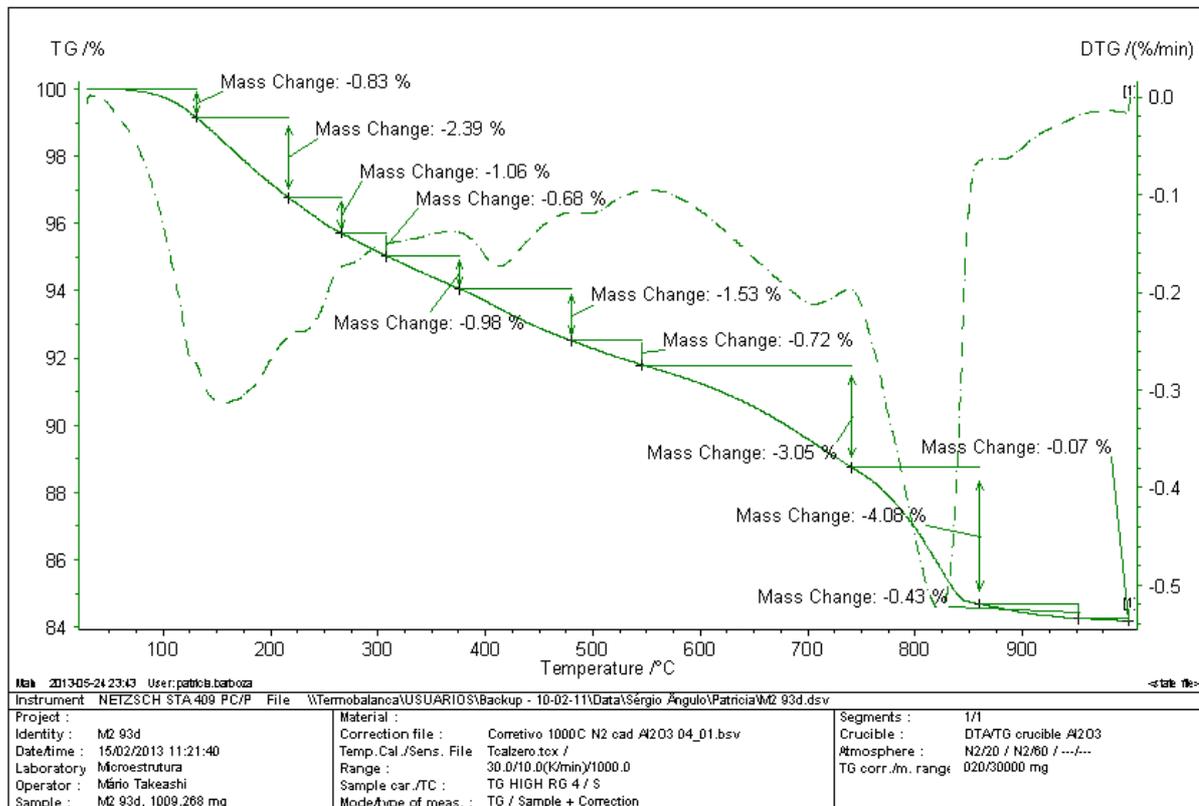
Termograma 5 - Mistura Cim aos 91 dias de cura



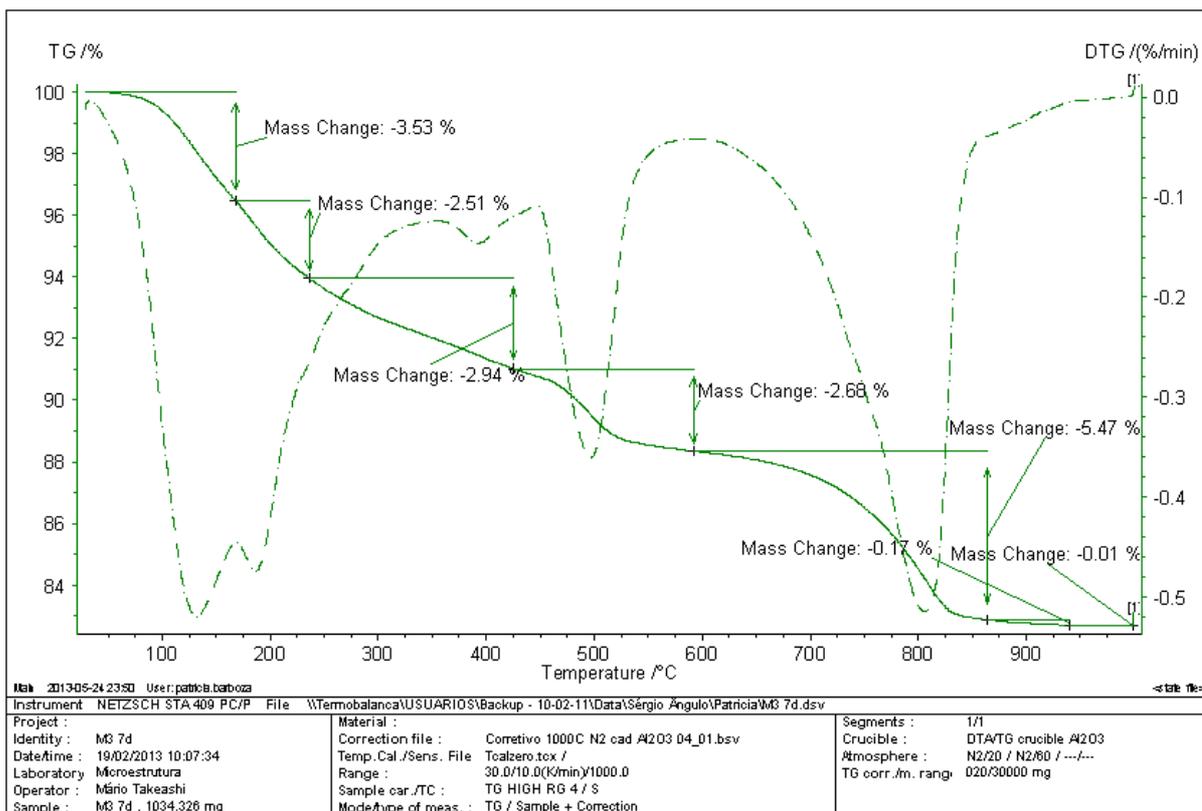
Termograma 6 - Mistura Cim+Cv<0,15mm aos 7 dias de cura



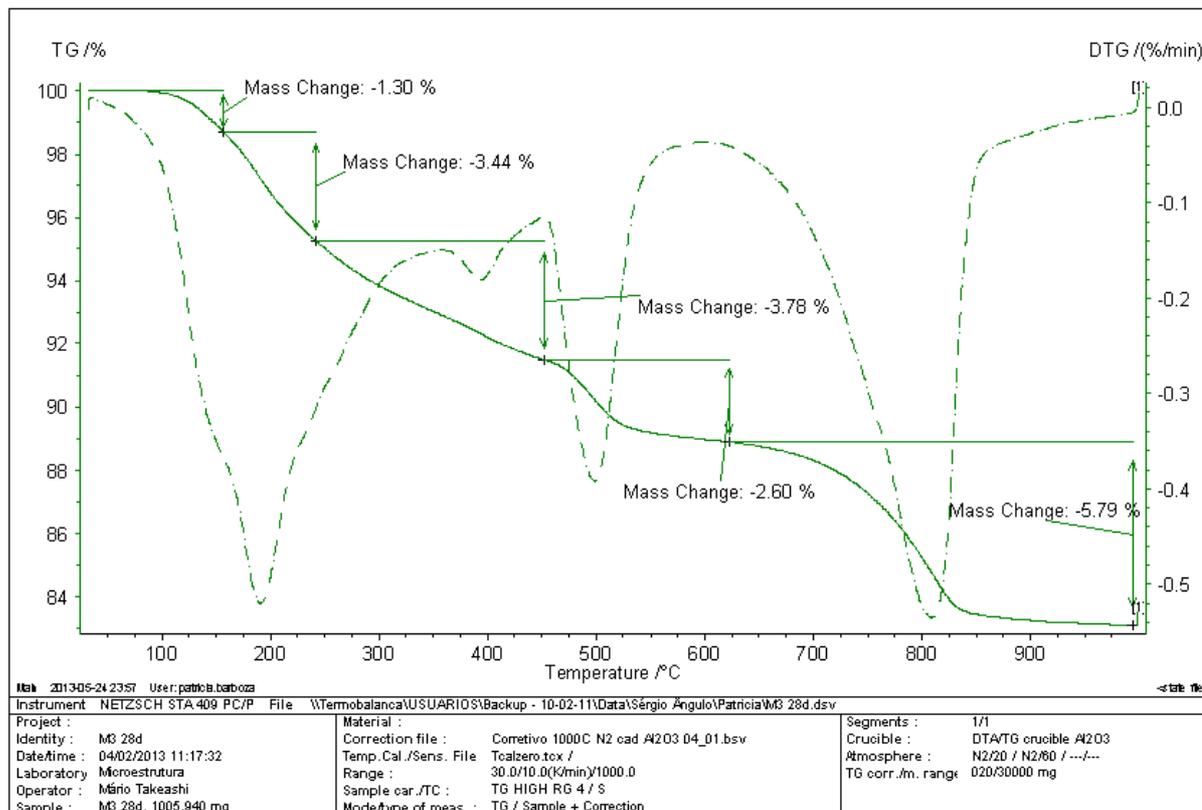
Termograma 7 - Mistura Cim+Cv<0,15mm aos 28 dias de cura



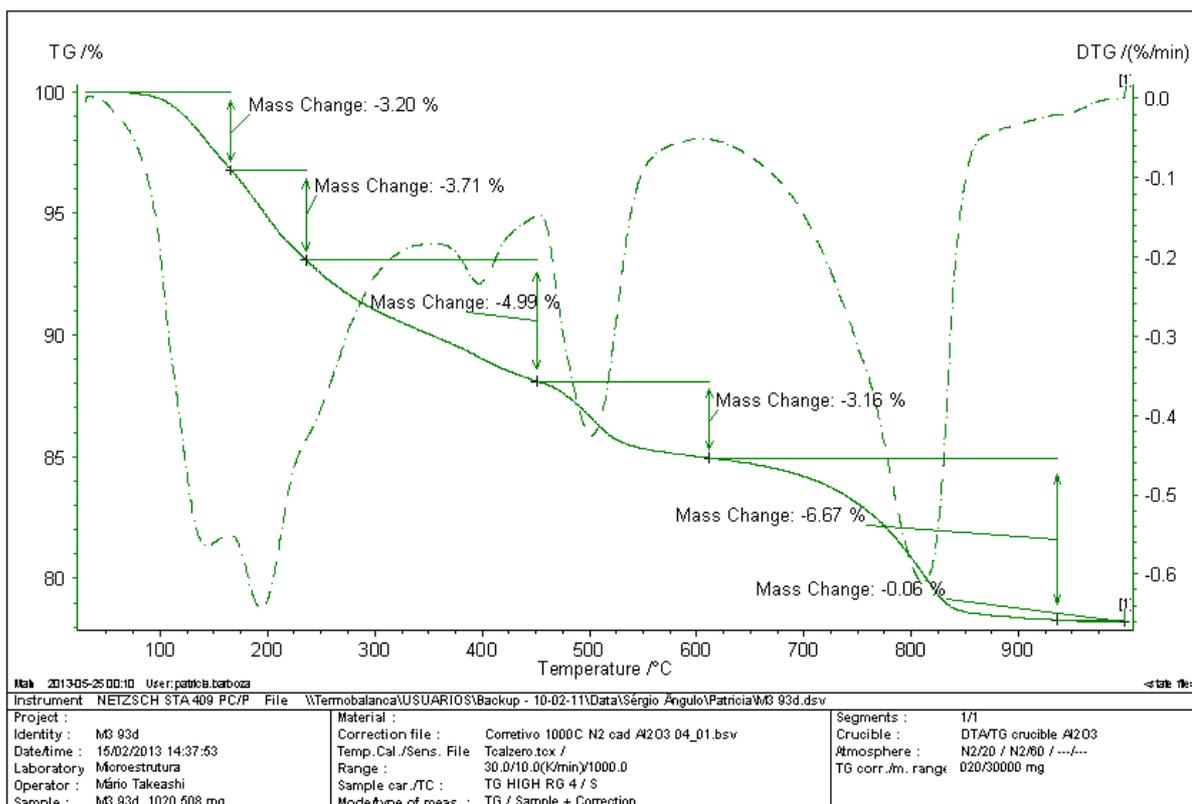
Termograma 8 - mistura Cim+Cv<0,15mm aos 91 dias de cura



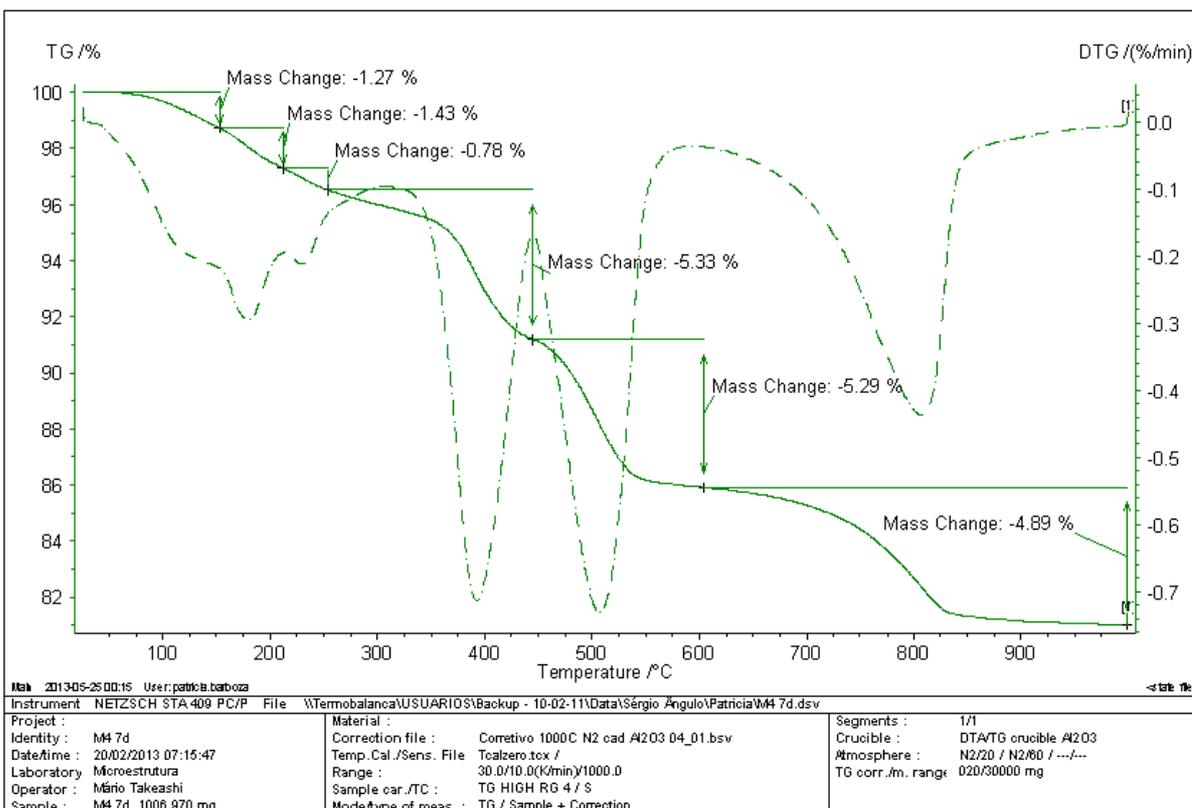
Termograma 9 - mistura Cim+cP aos 7 dias de cura



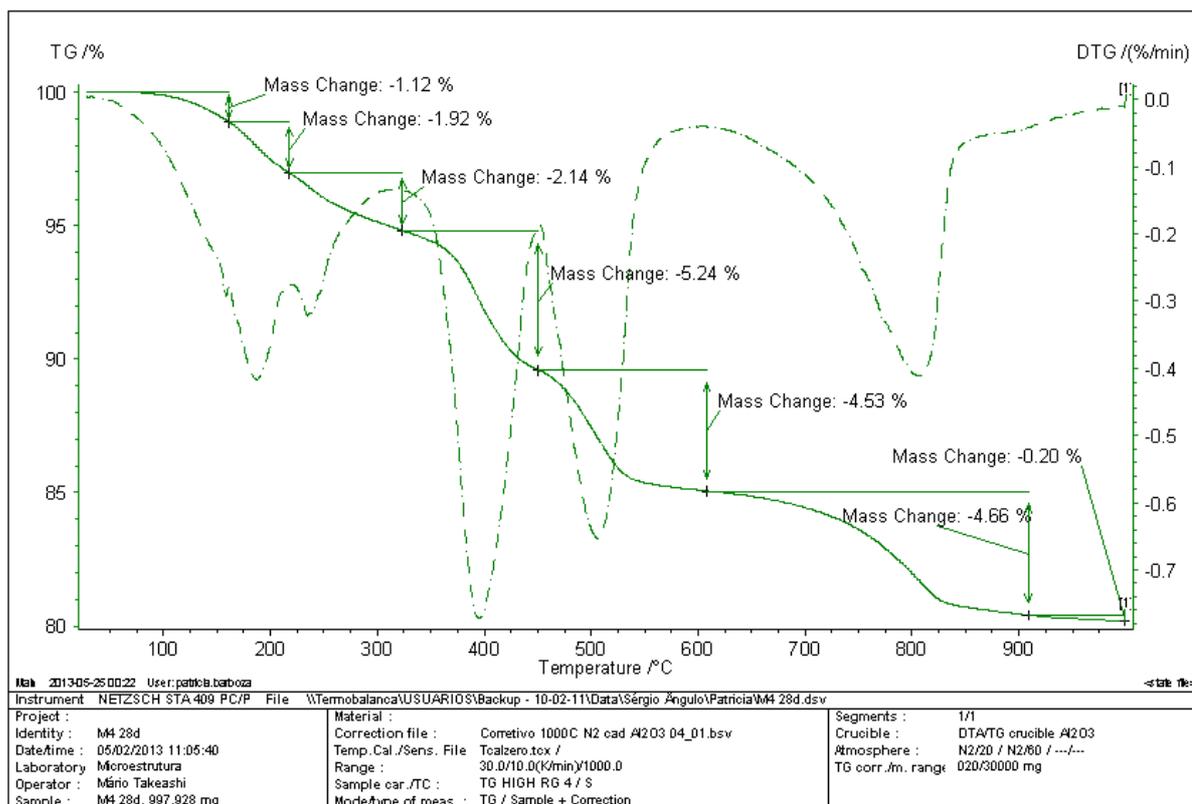
Termograma 10 - Mistura Cim+cP aos 28 dias de cura



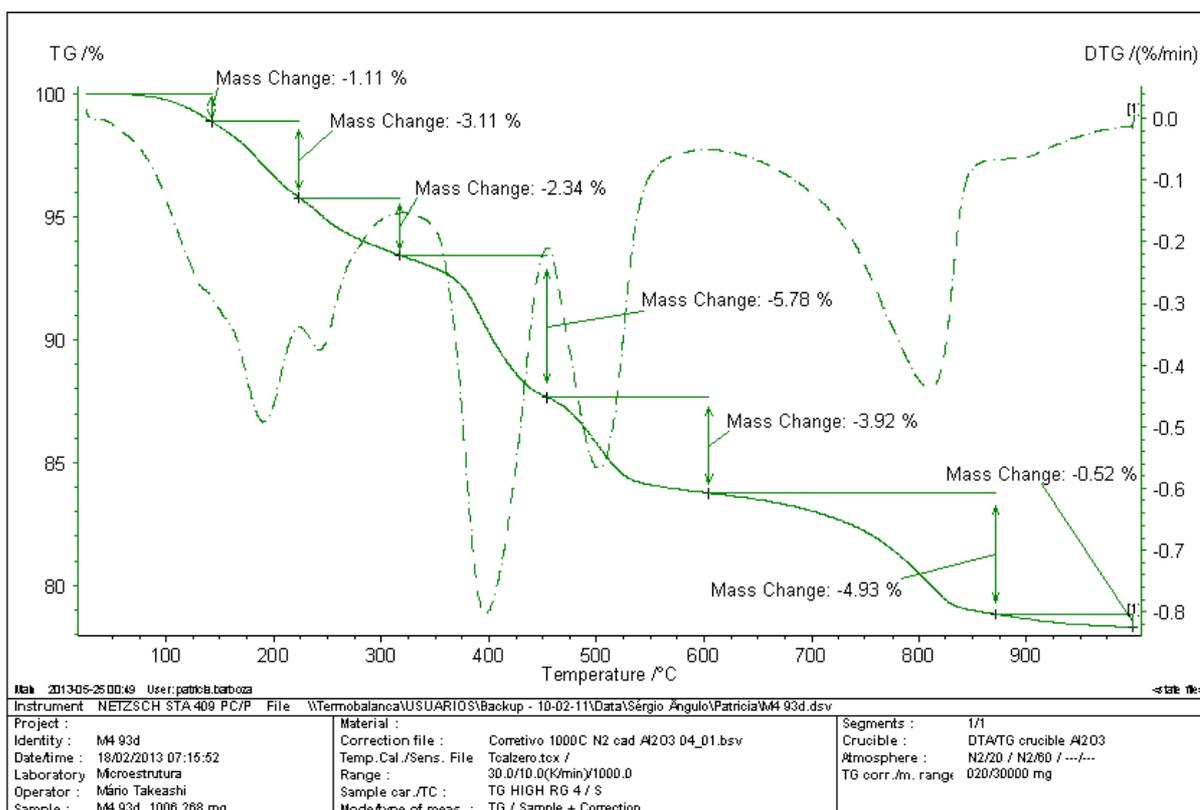
Termograma 11 - mistura Cim+cP aos 91 dias de cura



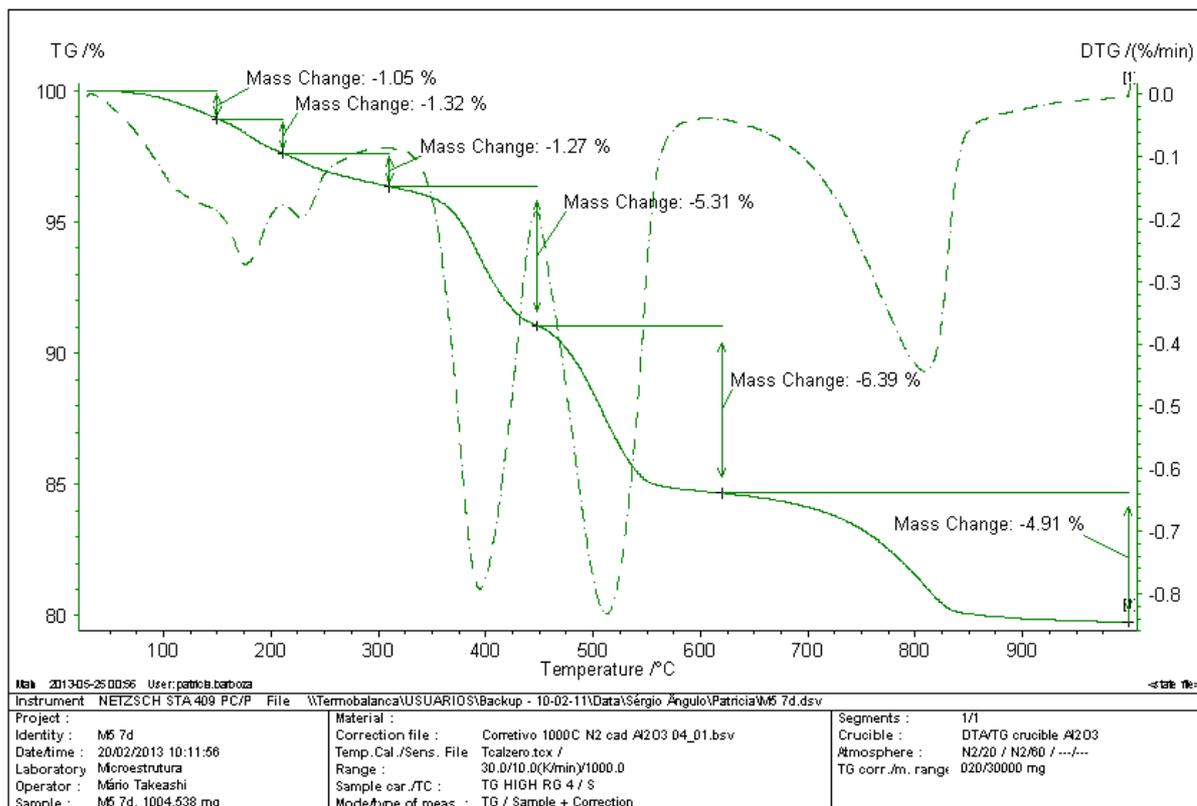
Termograma 12 - Mistura 70%Cim+30%Cv+cal aos 7 dias de cura



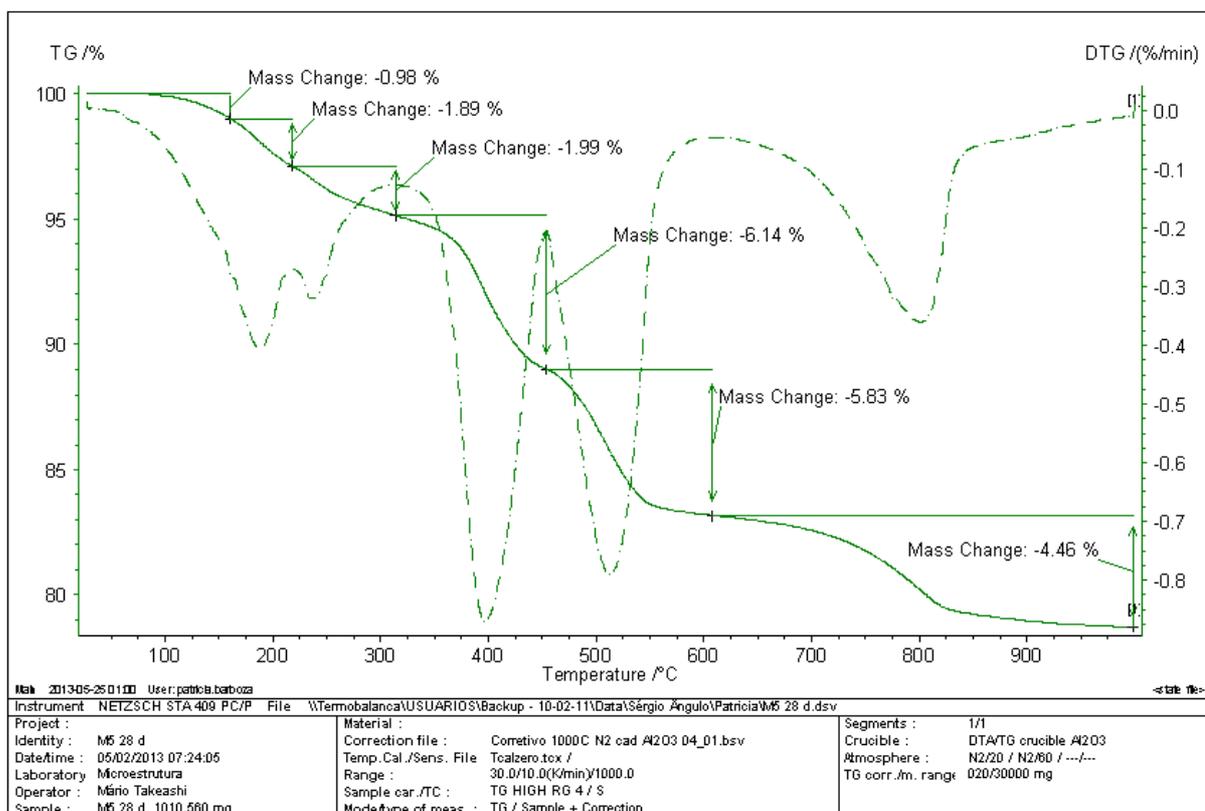
Termograma 13 - Mistura 70%Cim+30%Cv+cal aos 28 dias de cura



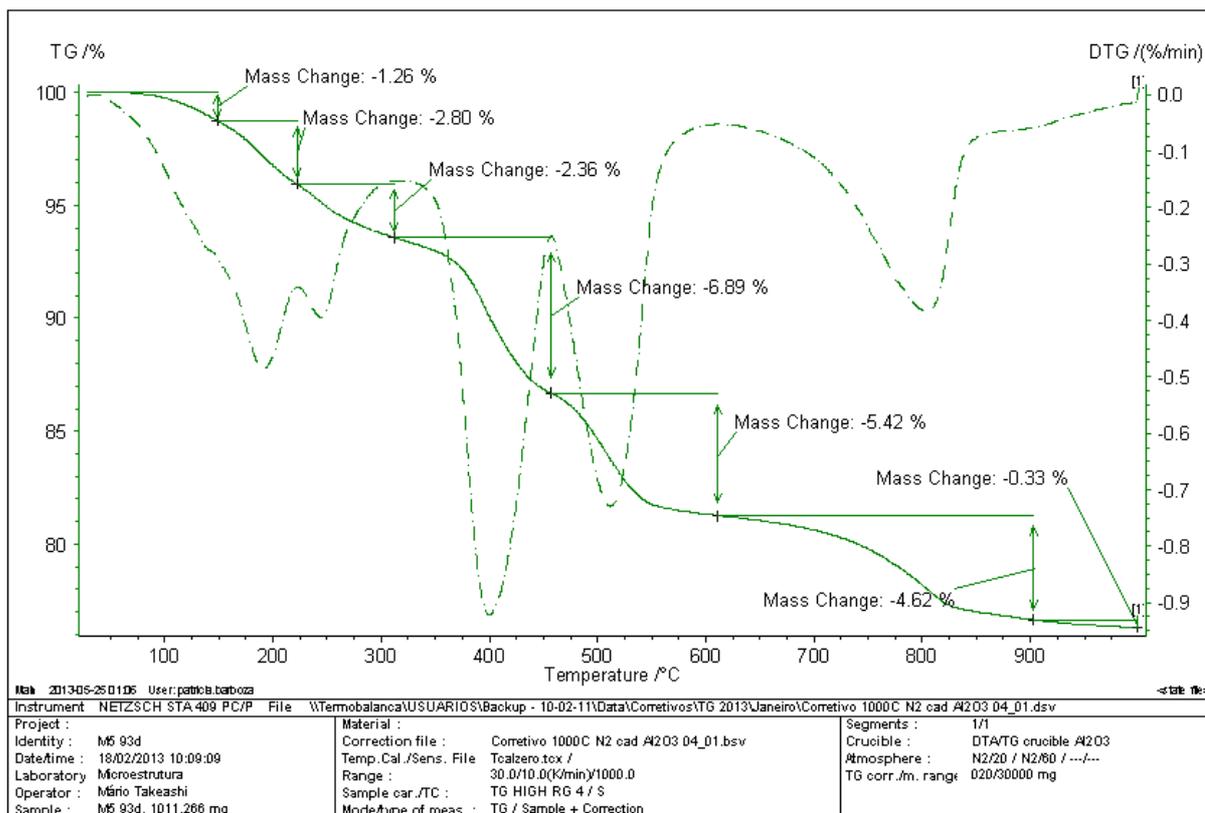
Termograma 14 - Mistura 70%Cim+30%Cv+cal aos 91 dias de cura



Termograma 15 - Mistura Cv+cal aos 7 dias de cura



Termograma 16 - Mistura Cv+cal aos 28 dias de cura



Termograma 17 - mistura Cv+cal aos 91 dias de cura

**APÊNDICE B – ESTIMATIVA DE VOLUME DE HIDRATOS
PRODUZIDOS PELAS REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO E DIMINUIÇÃO
DAS POROSIDADES**

Conforme mencionado no Capítulo 3 (item 3.4.3.1), a partir dos resultados das porcentagens de perda de água combinada obtidos nos ensaios de TG, foram efetuadas as estimativas dos volumes de cada um dos produtos de hidratação gerados pelas reações de cimentação, e da conseqüente diminuição de porosidade ocorrida nas misturas em estudo para as três idades de cura (7, 28 e 91 dias).

Neste Apêndice é apresentado, como exemplo, o detalhamento destes cálculos para a mistura Cim aos 7 dias de cura.

1) Determinação da relação em massa entre o composto químico e a água combinada

C-S-H



$$3CaO = 3 \times (40 + 16) = 168 \text{ u}$$

$$2SiO_2 = 2 \times (28 + 32) = 120 \text{ u}$$

$$3H_2O = 3 \times (2 + 16) = 54 \text{ u}$$

Assim temos que a relação em massa para o C-S-H, entre sua água combinada e sua composição química completa, pode ser expressa por:

$$\frac{3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O}{3H_2O} = \frac{168 + 120 + 54}{54} = 6,33$$

Seguindo o mesmo procedimento feito para o C-S-H, foram determinadas as relações em massa para os compostos C-A-H, Mg(OH)₂ e Ca(OH)₂. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Relação em massa composto/água para os hidratos produzidos pelas reações de cimentação

Composto	Relação em massa composto / água combinada
C-S-H	6,33
C-A-H	3,45
Mg(OH) ₂	3,23
Ca(OH) ₂	4,17

2) Estimativa da porcentagem em massa de hidratos

Para o C-S-H, aos 7 dias de cura tem-se:

- ✓ % de água combinada = 3,45%
- ✓ % em massa do composto (fração < 0,15 mm) = $3,45 \times 6,33 = 21,84\%$
- ✓ % < 0,15 mm na mistura = 3,6%
- ✓ % em massa em relação à mistura = $0,036 \times 21,84 = 0,7862\%$

Sabendo-se que ρ_d da mistura Cim = 1,956 g/cm³ (1956kg/m³), admitindo 1,0 cm³ de volume de mistura, tem-se:

- ✓ Massa de mistura = 1,956 g
- ✓ Massa de hidrato = $1,956 \times 0,007862 = 0,0154$ g

Pelo mesmo procedimento efetuado para o C-S-H foram calculadas as massas para os outros hidratos, conforme apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Massa estimada de hidratos para a mistura Cim aos 7 dias de cura

Composto	Massa estimada (g)
C-S-H	0,0154
C-A-H	0,0037
Mg(OH) ₂	0,0052
Ca(OH) ₂	0,0028

3) Estimativa da porcentagem em volume de hidratos

- ✓ $\rho_{C-S-H} = 2,200$ g/cm³ (2200 kg/m³)

$$\checkmark V_{C-S-H} = \text{massa estimada} \times \rho_{C-S-H} = 0,0154 \times 2,2 = 0,007 \text{ cm}^3$$

Usando o mesmo procedimento foram calculados os volumes para os outros hidratos, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Volume estimado de hidratos para a mistura Cim aos 7 dias de cura

Composto	Volume estimado (cm ³)
C-S-H	0,0070
C-A-H	0,0015
Mg(OH) ₂	0,0022
Ca(OH) ₂	0,0013

Para a mistura Cim, o volume de vazios (V_v) inicial pode ser determinado por:

$$V_v = \frac{\rho_{s \text{ real}} - \rho_d}{\rho_{s \text{ real}}} \times 100 = \frac{2315 - 1956}{2315} \times 100 = 15,5\%$$

Onde:

V_v = volume de vazios, %

$\rho_{s \text{ aparente}}$ = massa específica real dos grãos da mistura, kg/m³

ρ_d = massa específica aparente seca, kg/m³

Sabendo o volume de vazios (V_v) inicial pode-se determinar o volume de sólidos na mistura por:

$$V_s = 100 - V_v = 100 - 15,5 = 84,5\%$$

Onde:

V_s = volume de sólidos, %

Sabendo que em 1,0 cm³ temos 84,5% de sólidos, por relação pode-se calcular a porcentagem de volume de hidratos por:

$$\% V_{C-S-H} = \frac{84,5\% \times 0,0070 \text{ cm}^3}{1 \text{ cm}^3} = 0,59\%$$

Da mesma forma, foram determinadas as porcentagens de volume para os outros hidratos, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Porcentagem estimada de volume de hidratos para a mistura Cim aos 7 dias de cura

Composto	% estimada de volume
C-S-H	0,59
C-A-H	0,12
Mg(OH) ₂	0,18
Ca(OH) ₂	0,11
Total	1,0

4) Estimativa da porosidade

Considerando que o volume de hidratos produzidos preencheu o volume de vazios inicial tem-se:

$$V_{s\ 7d} = V_{v\ \text{inicial}} - \% \text{ de volume de hidratos} = 15,5 - 1,0 = 14,5\%$$

Onde:

$V_{v\ 7d}$ = volume de vazios aos 7 dias, %

Com o $V_{v\ 7d}$, calcula-se, para 7 dias de cura, a p_d utilizando a mesma relação do cálculo do volume de vazios inicial, e a porosidade (η), utilizando as seguintes equações:

$$V_{v\ 7d} = \frac{P_{s\ \text{real}} - P_{d\ 7d}}{\text{real}} \times 100$$

$$e_{7d} = \frac{\rho_s}{\rho_{d7d}} - 1$$

$$\eta_{7d} = \frac{e}{1 + e}$$

Onde:

ρ_{d7d} - massa específica aparente seca aos 7 dias de cura, kg/m³

ρ_s - massa específica aparente dos sólidos, kg/m³

e_{7d} - índice de vazios aos 7 dias de cura

η_{7d} - porosidade aos 7 dias de cura

Efetuada-se os cálculos obtiveram-se os seguintes valores para a mistura Cim aos 7 dias de cura:

$$\rho_{d7d} = 1979 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_{7d} = 0,235$$