

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO E DURABILIDADE DE ARGAMASSAS  
INCORPORADAS COM RESÍDUO DE CAULIM CALCINADO**

Suellen Lisboa Dias Beltrão

CAMPINA GRANDE

Agosto/2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO E DURABILIDADE DE ARGAMASSAS  
INCORPORADAS COM RESÍDUO DE CAULIM CALCINADO**

Suellen Lisboa Dias Beltrão

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título DOUTOR EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Heber Carlos Ferreira

Co-orientador: Dr. Gelmires de Araújo Neves

Agência Financiadora: CNPq

Campina Grande

Agosto/2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B453c Beltrão, Suellen Lisboa Dias.  
Comportamento mecânico e durabilidade de argamassas incorporadas com resíduo de caulim calcinado / Suellen Lisboa Dias Beltrão. – Campina Grande, 2014.  
162p f. : il. color.

Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira, Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves".  
Referências.

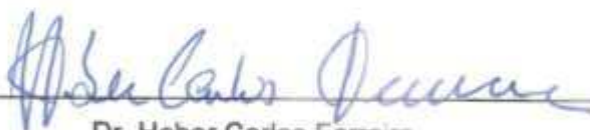
1. Argamassa. 2. Pozolana. 3. Resíduo de Caulim. I. Ferreira, Heber Carlos. II. Neves, Gelmires de Araújo. III. Título.

CDU 620:666.971(043)


**COMPORTAMENTO MECANICO E DURABILIDADE DE ARGAMASSAS  
INCORPORADAS COM RESIDUOS DE CALIM CALCINADO**

**SUELLEN LISBOA DIAS BELTRÃO**

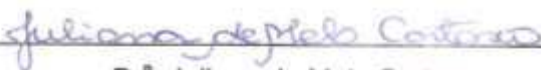
Tese Aprovada em 27/08/2014 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:



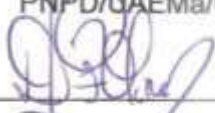
Dr. Heber Carlos Ferreira  
(Orientador)  
UAEMa/UFCG



Dr. Gelmires de Araújo Neves  
(Orientador)  
UAEMa/UFCG



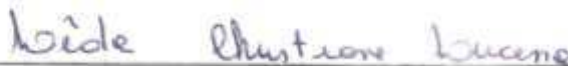
Dr.ª Juliana de Melo Cartaxo  
(Examinadora Externa)  
PNPD/UAEMa/UFCG



Dr.ª Diane de Fátima Oliveira  
(Examinadora Externa)  
UEPB



Dr. Heber Sivini Ferreira  
(Examinador Externo)  
DEMat/UFPB



Dr.ª Leda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena  
(Examinadora Externa)  
UAEC/UFCG

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, razão da minha existência, força minha. Grandioso Pai a quem devo toda Honra e Glória.*

*A minha família, a minha mãe e ao meu pai (in memoriam) aos meus irmãos, irmãs, sobrinhos pelo apoio, força, compreensão pelos momentos de ausência, a eles os meus mais carinhosos agradecimentos.*

*Ao meu marido pelo companheirismo, pela paciência, pelo apoio em todos os momentos, pela grande ajuda na produção deste trabalho, sem a qual não teria conseguido. Maurílio muito obrigada!*

*A Marina, pedacinho meu, minha filha que chegou a um ano do fim do doutorado e que trouxe com ela uma força que eu não sabia que tinha, e um enorme desejo de concluir este trabalho para poder desfrutar da sua companhia e do seu lindo sorriso.*

*Ao querido professor, orientador, conselheiro, homem de muitas virtudes, honrado, íntegro, sábio Heber Carlos Ferreira, pela paciência, compreensão e ensinamentos durante esses 52 meses de orientação e desenvolvimento deste trabalho. Professor Heber muito obrigada.*

*Ao professor Gelmires de Araújo Neves pelo apoio e contribuição para que este trabalho pudesse ser realizado.*

*Aos amigos que fiz durante estes quatro anos que se tornaram minha segunda família amigos estes, que compartilham comigo a satisfação de poder concluir este trabalho. A todos vocês com carinho muito obrigada.*

*Aos funcionários do Laboratório de Reciclagem pela ajuda no desenvolvimento dos ensaios, quando mais precisei. Obrigada.*

*Aos amigos que acreditam e torcem por mim, meus agradecimentos sinceros;*

*Ao Cnpq pelo apoio financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.*

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

*Muito obrigada a todos.*

## RESUMO

O ambiente construído do futuro está sendo edificado no começo de uma nova era ecológica, a da reutilização. Nesse sentido, a utilização de resíduos como forma alternativa de substituição do cimento em argamassas pode vir a alcançar o patamar da sustentabilidade. A produção excessiva de resíduos de caulim tanto no estado da Paraíba como no interior do estado do Rio Grande do Norte vem sendo alvo de pesquisas. Os resíduos de caulim oriundos do processo de beneficiamento do caulim classificados como resíduo grosso e resíduo fino são descartados de forma indiscriminada no meio ambiente, causando grande impacto ambiental e prejudicando a população circunvizinha das pilhas de resíduos. Na tentativa de propor alternativas para a reutilização destes resíduos e produção de materiais inovadores para os mais variados setores da construção civil este trabalho apresenta como objetivo avaliar o comportamento mecânico e durabilidade de argamassas incorporadas com resíduo de caulim calcinado. A mistura utilizada foi composta por 50% de resíduo de caulim grosso + 50% de resíduo de caulim fino, foram incorporados em argamassas nas proporções em massa de 1:2:6 e 1:2:8 com teores de substituição do cimento de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 30%. As argamassas foram submetidas a curas distintas sendo estas, realizadas em ambiente interno e em ambiente externo, obedecendo as idades de 30, 60, 90, 180 e 360 dias e ainda submetidas aos ensaios de durabilidade acelerada por meio dos ciclos de molhagem e secagem. Para a incorporação deste resíduo nas argamassas foram realizadas a caracterização física, química e mineralógica do resíduo, assim como avaliação da temperatura de queima do resíduo para avaliação da reatividade da pozolana. A pozolana com melhor característica física foi determinada a uma temperatura de 800°C e a partir desta, deu-se prosseguimento a incorporação do resíduo de caulim calcinado sob forma de pozolana nas argamassas. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm. Os corpos de prova conforme o tipo de cura e idade foram avaliados mecanicamente através do ensaio de resistência a compressão simples. Amostras das argamassas foram pulverizadas em pistilo com almofariz de porcelana e peneiradas em peneira ABNT de nº200 após o ensaio de resistência a compressão para serem analisadas por meio das técnicas de difratometria de raios-X, análise térmica diferencial e gravimétrica. Diante dos valores de resistência apresentados, as argamassas com substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado, podem ser classificadas de acordo com a NBR 13281 (2001) como sendo do Tipo I com valores de resistência mecânica  $\geq 0,1$  e  $\leq 4,0$  (MPa) e Tipo II com  $\geq 4,0$  e  $\leq 8,0$  (MPa) para ambos os traços 1:2:6 e 1:2:8.

**Palavras-chave:** pozolana, argamassas, resíduo de caulim

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades pozolânicas de uma metacaulinita.....	34
Quadro 2 – Granulometria do resíduo de caulim.....	54
Quadro 3 – Determinação do agregado miúdo.....	56
Quadro 4 – Composição das argamassas para o ensaio de atividade pozolânica.....	62
Quadro 5 – RCS das argamassas submetidas ao ensaio de atividade pozolânica.....	62
Quadro 6 – Índice de atividade pozolânica do resíduo de caulim com o cimento aos 7 dias.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigências mecânicas para argamassas conforme NBR 13281 (1995)..	21
Tabela 2 – Superfície específica do resíduo natural e calcinado.....	57
Tabela 3 - Composição química do resíduo de caulim calcinado, cal e cimento.....	60
Tabela 4 – Perda de massa das argamassas com e sem substituição do cimento pelo resíduo de caulim.....	74
Tabela 5 – Resistência a tração por compressão diametral das argamassas de traço 1:2:6.....	75
Tabela 6 – Perda de massa das argamassas de traço 1:2:8 com e sem substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado.....	86
Tabela 7 - RCS das argamassas de traço 1:2:6 submetidas ao ensaio de envelhecimento.....	88
Tabela 8 – Perda de massa das argamassas de traço 1:2:6 com e sem substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado submetidas ao ensaio de envelhecimento.....	95
Tabela 9 - RCS das argamassas de traço 1:2:8 submetidas ao ensaio de envelhecimento.....	97
Tabela 10 - Perda de massa (%) das argamassas de traço 1:2:8 submetidas aos ciclos de molhagem e secagem.....	104



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de carregamento e plano de ruptura no ensaio de RT.....	22
Figura 2- Diagrama simplificado do beneficiamento de calim via úmida.....	27
Figura 3 - Etapas do desenvolvimento da pesquisa.....	41
Figura 4 - Corpos de prova no ensaio de resistência à compressão.....	47
Figura 5 - Corpos de prova no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	48
Figura 6 - Gráfico das análises térmicas do resíduo de caulim.....	52
Figura 7 - Distribuição do tamanho de partículas do RC natural e calcinado.....	53
Figura 8 - Distribuição granulométrica do cimento Portland.....	55
Figura 9 - Distribuição granulométrica da cal Carbomil.....	56
Figura 10 - Difratoograma do resíduo de caulim calcinado natural e calcinado a 600°C.....	58
Figura 11 - Difratoograma do resíduo de caulim 650°C e 700°C.....	59
Figura 12 - Difratoograma do resíduo de caulim 750°C e 800°C.....	59
Figura 13 - Gráfico da RCS das argamassas para o ensaio de atividade pozolânica.....	63
Figura 14 - Difratoograma das argamassas de referência para o ensaio de atividade pozolânica.....	64
Figura 15 - Difratoograma das argamassas com RC a 800°C para avaliação da atividade pozolânica.....	65
Figura 16 - Representação gráfica do ensaio de absorção de água (AA) para a argamassa no traço 1:2:6.....	66
Figura 17 - Resistência a compressão das argamassas de traço 1:2:6 sob cura interna..	67
Figura 18 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 30 dias de cura.....	69
Figura 19 - Difratoograma das argamassas aos 60 dias de cura traço 1:2:6.....	70
Figura 20 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 90 dias de cura.....	71
Figura 21 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 180 dias de cura.....	72
Figura 22 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 360 dias de cura.....	73
Figura 23 - Resistência a tração por compressão diametral das argamassas de traço 1:2:6.....	76
Figura 24 - Comportamento das argamassas no ensaio de absorção.....	77
Figura 25 - Resistência a compressão das argamassas de traço 1:2:8.....	78
Figura 26 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 30 dias de cura.....	80
Figura 27 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 60 dias de cura.....	81

Figura 28 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 90 dias de cura.....	82
Figura 29 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 180 dias de cura.....	83
Figura 30 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 360 dias de cura.....	84
Figura 31 - Resistência a tração por compressão diametral das argamassas de traço 1:2:8.....	87
Figura 32 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 10 ciclos.....	90
Figura 33 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 20 ciclos.....	91
Figura 34 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 30 ciclos.....	92
Figura 35 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 40 ciclos.....	93
Figura 36 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 50 ciclos.....	94
Figura 37 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 10 ciclos.....	99
Figura 38 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 20 ciclos.....	100
Figura 39 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 30 ciclos.....	101
Figura 40 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 40 e 50 ciclos.....	102
Figura 41 - RCS das argamassas submetidas a cura externa.....	106
Figura 42 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 90 dias de cura.....	107
Figura 43 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 210 dias de cura.....	108
Figura 44 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 360 dias de cura.....	109
Figura 45 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 512 dias de cura.....	110
Figura 46 A - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 90 dias de cura.....	112
Figura 46 B - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 210 dias de cura.....	113
Figura 46 C - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 360 dias de cura.....	114
Figura 46 D - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 512 dias de cura.....	115
Figura 47 - RCS das argamassas submetidas a cura externa.....	117
Figura 48 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 90 dias de cura.....	118
Figura 49 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 210 dias de cura.....	119
Figura 50 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 360 dias de cura.....	120
Figura 51 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 512 dias de cura.....	121
Figura 52 - Argamassas antes de serem expostas ao meio ambiente.....	123
Figura 53 A - Argamassas expostas ao meio ambiente.....	123
Figura 53 B - Argamassas expostas ao meio ambiente.....	125
Figura 53 C - Argamassas expostas ao meio ambiente por 512 dias.....	124

## SUMÁRIO

<b>1.Introdução.....</b>	12
<b>1.1 Objetivos.....</b>	13
1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivo específico.....	14
<b>2.Referencial teórico.....</b>	15
2.1 Argamassas.....	15
2.1.1 Componentes básicos das argamassas.....	16
2.1.1.1 Cimento.....	16
2.1.1.2 Cal.....	17
2.1.1.3 Agregados.....	19
2.1.1.4 Algumas propriedades das argamassas.....	20
2.1.1.4.1 Consistência.....	20
2.1.1.4.2 Resistência a compressão e tração por compressão diametral.....	20
<b>3. Pozolana.....</b>	22
3.1 Substituição parcial do cimento por pozolanas.....	23
3.2 Caulim.....	25
3.3 Resíduos de caulim e consequências ambientais.....	27
3.4 Utilização do resíduo de caulim como metacaulinita.....	29
3.5 Resíduo de caulim como material alternativo.....	31
3.6 Metacaulinita como pozolana.....	33
3.7 Considerações sobre a temática: utilização do resíduo de caulim.....	34
<b>4. Durabilidade.....</b>	35
4.1 Envelhecimento acelerado.....	37
<b>5.Materiais métodos.....</b>	39
5.1 Materiais.....	39
5.2 Métodos.....	40
5.2.1 Coleta e beneficiamento das amostras.....	42
5.2.2 Caracterização.....	42
5.2.3 Granulometria.....	42
5.2.4 Análise da superfície específica pelo método do BET.....	43
5.2.5 Composição química.....	43
5.2.6 Difração de raios X.....	43
5.2.7 Análise térmica diferencial.....	44
5.2.8 Avaliação da temperatura de calcinação do resíduo de caulim.....	44
5.2.9 Atividade pozolânica.....	44
5.2.10 Preparação das argamassas.....	45
5.2.11Moldagem dos corpos de prova.....	46
5.2.12 Ensaio de absorção por imersão.....	47
5.2.13 Ensaio de resistência à compressão simples.....	47
5.2.14 Resistência a tração na compressão diametral.....	48
5.2.15 Avaliação do envelhecimento acelerado.....	49
5.2.16Avaliação da cura externa.....	49
<b>6. Resultados e discursões.....</b>	51
6.1 Caracterizações dos materiais.....	51
6.1.1 Análise térmica diferencial.....	53
6.1.2 Análise granulométrica.....	53
6.1.2.1 Resíduo de caulim.....	55
6.1.2.2 Cimento.....	55
6.1.2.3 Cal.....	55

6.1.2.4 Areia.....	56
6.1.2.5 Análise de superfície específica por BET.....	57
6.1.4 Análise por difratometria de raios X.....	58
6.1.5 Análise química.....	60
6.1.6 Determinação da atividade pozolânica.....	61
6.1.6.1 Resistência a compressão simples.....	62
6.1.6.2 Índice de atividade pozolânica.....	63
6.1.6.3 Difratogramas das argamassas.....	64
6.2 Avaliação das argamassas com adição de resíduo de caulim para o traço 1:2:6 sob cura interna.....	66
6.2.1 Absorção de água.....	66
6.2.2 Resistência a compressão simples.....	67
6.2.3 Análise mineralógica.....	68
6.2.4 ATD das argamassas incorporadas com resíduo de caulim calcinado.....	73
6.2.5 Resistência a tração na compressão diametral para o traço 1:2:6.....	75
6.3 Avaliação das argamassas com resíduo de caulim para o traço 1:2:8.....	77
6.3.1 Absorção de água.....	77
6.3.2 Resistência à compressão simples.....	78
6.3.3 Análise mineralógica.....	80
6.3.4 ATD das argamassas com resíduo de caulim calcinado.....	85
6.3.5 Resistência a tração na compressão diametral.....	86
<b>7. Envelhecimento acelerado.....</b>	<b>87</b>
7.1 Resistência a compressão das argamassas submetidas ao envelhecimento acelerado para o traço 1:2:6.....	87
7.1.1 Difração de raios X.....	89
7.1.2 ATD das argamassas submetidas ao envelhecimento acelerado.....	95
7.1.3 Resistência a compressão das argamassas submetidas ao envelhecimento acelerado para o traço 1:2:8.....	97
7.1.4 Difração de raios X.....	98
7.1.5 ATD das argamassas submetidas ao envelhecimento acelerado.....	103
<b>8. Avaliação da degradação das argamassas com adição de resíduo de caulim calcinado.....</b>	<b>105</b>
8.1 Traço 1:2:6.....	105
8.1.1 Resistência a compressão das argamassas sob cura externa.....	105
8.1.2 Difração de raios X.....	106
8.1.3 ATD das argamassas submetidas a cura externa.....	111
8.2 Traço 1:2:8.....	116
8.2.1 Resistência a compressão.....	116
8.2.2 Difração de raios X.....	118
8.2.3 ATD das argamassas submetidas a cura externa.....	121
8.3 Registro fotográfico das argamassas sob cura externa.....	122
<b>9. Conclusões.....</b>	<b>126</b>

<b>10. Conclusão final.....</b>	<b>128</b>
<b>11. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>129</b>
<b>12. Literatura citada.....</b>	<b>130</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE A - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 para cura interna.....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE B - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 para cura interna.....</b>	<b>144</b>
<b>APÊNDICE C - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 para o envelhecimento acelerado.....</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICE D - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 para o envelhecimento acelerado.....</b>	<b>154</b>
<b>APÊNDICE E - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 para cura externa.....</b>	<b>159</b>

## 1. Introdução

Nos últimos anos, questões relacionadas ao impacto ambiental, causadas por diversas fontes poluidoras, têm sido discutidas em todo o mundo. Entre elas a grande geração de resíduos urbanos e industriais são fontes de preocupação.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), recentemente instituída pela Lei nº. 12.305, de 02.08.2010, como um marco regulatório para a problemática dos resíduos sólidos, traz novas diretrizes para a destinação adequada dos insumos, considerando o bem estar social e, ao mesmo tempo, a sustentabilidade sob os pontos de vista ambiental, social e econômico.

Nesse sentido, o emprego de resíduos na construção civil pode se tornar uma atividade de extrema importância e mais frequente dada à diversidade e, principalmente, à quantidade disponível desses materiais (NÓBREGA, 2007).

São diversos os resíduos descartados ou acumulados pelas indústrias, com potenciais variados no tocante à aplicação, sejam como adições minerais, ativadores químicos ou como agregados na produção de concretos e argamassas. Isto pode oferecer uma maior quantidade e variedade de materiais de construção. Assim, a importância da reciclagem tanto na preservação ambiental quanto no fator econômico e social está ligada à aquisição de produtos, com desempenho satisfatório a partir de materiais reciclados e alternativos (JOHN, 1996 *apud* LIMA, 2004).

A indústria do beneficiamento de caulim produz uma grande quantidade de resíduos provenientes do seu processamento. Neste, são gerados dois tipos de resíduos, o primeiro é chamado de resíduo grosso e constituído basicamente por quartzo, proveniente da etapa de lavagem do caulim bruto. O segundo resíduo, procedente da etapa de separação em peneira ABNT nº. 200 (0,074mm) é conhecido como resíduo fino, ambos são considerados um problema ambiental, pois são descartados indiscriminadamente no meio ambiente.

Não há um controle nem processamento adequado para os resíduos gerados desprezando-se as exigências de utilização de aterros e provocando uma série de danos ao meio ambiente e a saúde da população residente nas regiões circunvizinhas aos “depósitos” de resíduos; isso faz com que os

moradores rurais, pequenos agricultores em geral, sejam os mais afetados pelo inadequado gerenciamento de resíduos da indústria de beneficiamento do caulim (CASTRO, 2008).

O resíduo de caulim apresenta como um de seus constituintes o argilomineral caulinita que, quando tratado termicamente, sofre rearranjo transformando-se em uma estrutura amorfa como consequência da desidroxilação da caulinita. A metacaulinita, produto do aquecimento do argilomineral caulinita, pode ser utilizada na construção civil adicionada a argamassas de assentamento e revestimento atuando como um material que apresenta propriedades pozolânicas.

A principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratado. Portanto, no cimento Portland o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos, reage com a pozolana, utilizada como substituição parcial do cimento, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados, que são os produtos mais estáveis do cimento hidratado.

Com vistas para uma abordagem atual baseada na preservação ambiental e na conservação das matérias primas objetivando o desenvolvimento sustentável, uma das alternativas de aproveitamento e/ou reciclagem dos resíduos gerados pelo beneficiamento do caulim, é a sua utilização em argamassas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar o comportamento mecânico e durabilidade de argamassas incorporadas com resíduo de caulim calcinado.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- I) caracterizar as matérias primas convencionais e alternativas
- II) determinar a melhor temperatura de obtenção da metacaulinita utilizando a calcinação do resíduo de caulim,
- III) avaliar a atividade pozolânica do resíduo de caulim
- IV) estudar o comportamento mecânico das argamassas convencionais e alternativas, nos traços 1:2:6 e 1:2:8 com incorporação do resíduo de caulim em substituição ao cimento nos percentuais de 5%, 10%, 15%, 20% e 30% por período de cura de 30, 60, 90, 180, 360 e 512 dias
- V) avaliar o efeito da substituição do cimento pelo resíduo de caulim nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 30% nas argamassas submetidas aos ensaios de envelhecimento acelerado, por meio dos ciclos de molhagem e secagem utilizando as resistências mecânicas como parâmetro avaliador.
- VI) avaliar no decorrer do tempo de cura em ambiente externo a resistência mecânica das argamassas com adição do resíduo de caulim calcinado bem como, o comportamento destas frente as intempéries.
- VII) acompanhar as transformações de fases ocorridas através de ensaios complementares como as análises térmicas DTA e DTG e Raios – X das amostras de argamassas submetidas aos ensaios mecânicos sob cura em ambiente interno e externo, e sob envelhecimento acelerado.



## 2. Referencial Teórico

### 2.1 Argamassas

As argamassas são materiais muito empregados na construção civil, sendo os seus principais usos no assentamento de alvenarias e nas etapas de revestimentos. Além disso, possuem um papel importante relativo a durabilidade das alvenarias, uma vez que, entre outras funções, estas conferem proteção contra agentes agressivos do meio ambiente.

A NBR 13529 (2013) define a argamassa para revestimento como sendo “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”.

Para Sabbatini (1986), argamassa pode ser conceituada como um material complexo, constituído essencialmente de materiais de baixa granulometria (agregados miúdos) e de uma pasta com propriedades aglomerantes, composta por minerais e água (materiais ativos), podendo ser composto, ainda por produtos especiais, denominados aditivos.

De acordo com Carasek (2010) as argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais.

As argamassas As argamassas são classificadas, segundo a sua finalidade, em:

- para assentamento: usadas para unir blocos ou tijolos das alvenarias. Também para a colocação de azulejos, tacos, ladrilhos e cerâmica para revestimento.

- para revestimento: usadas para revestir tetos, paredes etc., protegendo da umidade.

## 2.1.1 Componentes básicos das argamassas

### 2.1.1.1 Cimento

Cimento Portland é uma substância alcalina, cuja composição é formada em sua maior parte de silicatos e aluminatos de cálcio que, por hidrólise, originam compostos cristalinos hidratados e gel. Os silicatos e aluminatos liberam hidróxido de cálcio durante a reação com a água. Os cristais aciculares acabam se entrelaçando à medida que avança o processo de hidratação, criando a estrutura que vai assegurar a resistência típica das pastas, argamassas e concretos (TAYLOR, 1992 *apud* MILANI, 2008).

A ASTM C150 (American Society for Testing and Materials) define o cimento Portland como um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos. Os clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de um material sintetizado, produzidos quando uma mistura de matérias-primas (calcário, argila, filito, minério de ferro) de composição pré-determinada são aquecidos a temperaturas médias de 1450 °C.

O clínquer sai do forno como uma mistura de duas fases de silicatos bem cristalizados, os quais são conhecidos como: silicatos tricálcicos ou alita ( $C_3S$ ), silicatos dicálcico ou belita ( $C_2S$ ), e uma fase intersticial composta de fase aluminato ( $C_3A$ ) e a fase ferrita ( $C_4AF$ ), mais ou menos cristalizada. Além destas fases, também podem ser encontradas poucas impurezas como o periclásio (MgO), óxido de cálcio endurecido (CaO) e sulfatos alcalinos (TIBONI, 2007).

O silicato tricálcico ( $C_3S$ ) é normalmente preponderante (50% a 70%) na composição do cimento Portland e aparece no formato de pequenos grãos de dimensões equivalentes e incolores (NEVILLE, 1997 *apud* TIBONI, 2007). O  $C_3S$  reage nos primeiros minutos e ocasiona elevado calor de hidratação, além de propiciar baixa resistência e forte retração. Os cimentos de alta resistência inicial (ARI) são ricos em  $C_3S$ .

Segundo a ABCP (2009) atualmente, existem 8 tipos básicos de cimento Portland normalizados e disponíveis no mercado brasileiro.

- Cimento Portland Comum (CP I)

- Cimento Portland Composto (CP II)
- Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)
- Cimento Portland Pozolânico (CP IV)
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)
- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)
- Cimento Portland Branco (CPB)

A esses tipos se somam subtipos, em função da natureza da adição e classes de resistência, que levam à existência de mais de duas dezenas de produtos normalizados no mercado.

### **2.1.1.2 Cal**

A cal é um aglomerante que resulta da calcinação de rochas carbonatadas constituídas por carbonato de cálcio, e/ou carbonato de cálcio e magnésio.

Segundo a Norma NP EN 459-1(2002), pode-se definir cal como um material abrangendo quaisquer formas físicas e químicas, sob as quais pode aparecer o óxido de cálcio (CaO), o óxido de magnésio (MgO) e ou hidróxidos de cálcio e magnésio (Ca(OH)<sub>2</sub> e Mg(OH)<sub>2</sub>). De acordo com a referida norma, existem diferentes tipos de cal de construção, destacando-se nestes a cal aérea e a cal hidráulica (Paulo, 2006).

De acordo com Faria (2012) e Carpio *et al.*, (2013) as cales são produzidas para uma temperatura máxima de calcinação da rocha de 900-1200<sup>o</sup>C. A rocha calcária (carbonato de cálcio), ao ser cozida e transformada em óxido de cálcio, libera dióxido de carbono para o ambiente; em contato com a água o óxido de cálcio purificado transforma-se em hidróxido de cálcio; quando em contato com o ar ambiente, o hidróxido de cálcio carbonata, absorvendo a parcela equivalente ao dióxido de carbono que tinha liberado.

Conforme a sua aplicação Coelho, Torgal e Jalali (2009) classificam os tipos de cal em:

cal aérea: cal obtida a partir de calcários puros, isto é, carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), com teores de impurezas inferiores a 5%, ou carbonato de cálcio e magnésio. A cal aérea é constituída principalmente por óxido ou hidróxido de

cálcio, a qual endurece lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono atmosférico. Esta cal não ganha presa em água visto não ter propriedades hidráulicas. Apresenta-se na forma de cal viva ou de cal hidratada.

cal viva (Q - Quicklime): cal aérea constituída, essencialmente, por óxido de cálcio e por óxido de magnésio (CaO e MgO). A cal viva é produzida através da calcinação de rocha calcária e/ou de dolomite e apresenta uma reação exotérmica quando em contato com a água. A cal viva pode encontrar-se sob a forma de cal cálcica ou de cal dolomítica.

cal hidratada (S - slaked lime): cal aérea, cálcica ou dolomítica, provenientes da extinção de cal vivas. São produzidas sob a forma de pó seco, em pasta ou em calda (leite de cal).

cal calcítica (CL): cal constituída, principalmente, por óxido de cálcio ou por hidróxido de cálcio, sem quaisquer adições de materiais hidráulicos ou pozolânicos.

cal dolomítica (DL): cal constituída principalmente por óxido de cálcio e por óxido de magnésio ou por hidróxido de cálcio e por hidróxido de magnésio, sem quaisquer adições de materiais hidráulicos ou pozolânicos.

cal hidráulica natural (NHL): cal constituída principalmente por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. A cal hidráulica possui a propriedade de ganhar presa e endurecer debaixo de água. O dióxido de carbono atmosférico também contribui para o seu endurecimento por reação com o hidróxido de cálcio.

cal hidráulica Natural com Material Adicional (Z): produto que pode conter materiais pozolânicos ou hidráulicos apropriados, adicionados até 20% em massa.

cal hidráulica (HL): cal constituída principalmente por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio. A cal hidráulica possui a propriedade

de ganhar presa e endurecer debaixo de água. O dióxido de carbono atmosférico também contribui para o seu endurecimento por reação com o hidróxido de cálcio. Em alguns países é também designada cal hidráulica artificial.

### **2.1.1.3 Agregados**

As areias são geralmente os agregados das argamassas. As mais frequentes são siliciosas, mas podem ser utilizadas areias de outras constituições mineralógicas (calcárias, graníticas, basálticas) e, nomeadamente, resultantes de subprodutos da exploração e preparação de rochas. As areias siliciosas podem ser lavadas ou conter algum teor em argila (FARIA, 2012)

Estas podem ser classificadas como natural ou artificial. A natural é originada da desagregação de rochas em consequência da ação de agentes atmosféricos, sendo de areias de rios, de minas e do mar. As naturais são obtidas pela trituração de rochas, sendo consideradas areias puras e devido a isso possui um custo mais elevado (BEZERRA, 2010).

A principal aplicação da areia é na fabricação de concretos e argamassas onde, em conjunto com um aglomerante (pasta de cimento Portland/água), constituem uma rocha artificial, com diversas utilidades em engenharia de construção.

De acordo com a NBR 7200 (ABNT, 1998), as areias utilizadas nas argamassas devem ser constituídas de grãos mistos de composição identificável em ensaios de laboratório. As areias, além de possibilitarem a fabricação de argamassas de natureza mais econômica do ponto de vista financeiro, tendo como base que o custo unitário da areia é inferior quando comparado ao do cimento, podem também favorecer outras propriedades tais como: redução da retração da pasta de cimento, aumento da resistência ao desgaste, melhor trabalhabilidade e aumento da resistência ao fogo.

#### **2.1.1.4 Algumas propriedades das argamassas**

##### **2.1.1.4.1 Consistência**

Cincotto *et al.*, (1995) define a consistência como sendo a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a resistir à deformação, não existindo uma unidade definida que a quantifique. No entanto, vários autores classificam as argamassas segundo esta propriedade, em argamassas secas, plásticas ou fluidas (CINCOTTO *et al.*, 1995). A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante (SILVA, 2006).

Segundo Bauer a consistência e plasticidade são apontadas como as principais propriedades que determinam uma condição de trabalhabilidade das argamassas de revestimento. Em determinados momentos, tal condição torna-se sinônimo destas duas propriedades. As várias definições destes termos, discutidas pelo meio técnico, derivam das apresentadas pelo documento RILEM (1982), que coloca:

- Consistência – é a propriedades pela qual a argamassa tende a resistir às deformações que lhe são impostas;
- Plasticidade – é a propriedades que permite a argamassas deformar-se sem ruptura, sob a ação de forças superiores às que promovem a sua estabilidade, mantendo a deformação depois de retirado o esforço.

É certo que as duas propriedades são interligadas e, em determinados momentos, não podendo ser tratadas independentemente quando se analisa uma condição de trabalhabilidade.

##### **2.1.1.4.2 Resistência a compressão e tração por compressão diametral**

A resistência a compressão é definida como a capacidade das argamassas resistirem as tensões de compressão, tração ou cisalhamento. Esta propriedade das argamassas esta diretamente ligada a natureza e dosagem dos materiais e também da relação água/aglomerante (ROCHA,

2005). De acordo com CARASEK (2007) apud SANTOS (2008) a resistência mecânica diz respeito a propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens e que se traduzem, em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento.

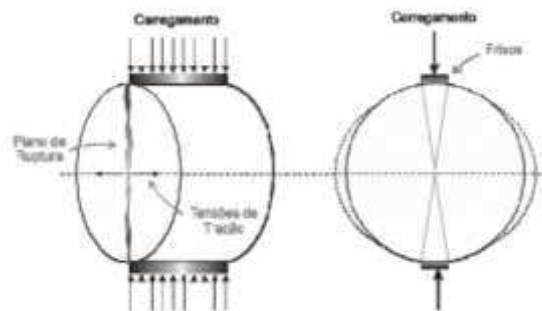
A NBR 13281 (ABNT, 1995) prescreve que os requisitos mecânicos das argamassas devem estar em conformidade com as exigências indicadas na Tabela 1.

**Tabela 1** - Exigências mecânicas para argamassas de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 1995).

Características	Identificação	Limites	Método
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$	NBR 13279 (ABNT, 2004)
	II	$\geq 4,1$ e $\leq 8,0$	
	III	$> 8,0$	

De acordo com Brito (2006), o ensaio de compressão diametral foi desenvolvido por Carneiro (1943) para determinação da resistência a tração (RT) de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland; por ter sido desenvolvido no Brasil ficou conhecido mundialmente como sendo “ensaio brasileiro” considerando ser um ensaio simples, de baixo custo e adequado para a representação de tensões que acontece em campo.

Este ensaio normalizado pela NBR-7222 (2010) resulta em uma tensão de compressão relativamente uniforme atuando perpendicularmente ao plano diametral carregado ocasionando, assim, uma ruptura ao longo do plano solicitado. A Figura 1 ilustra esquematicamente o princípio deste ensaio.



**Figura 1-** Esquema de carregamento e plano de ruptura típica no ensaio de RT

Fonte: Brito (2006)

### 3 Pozolana

Originalmente o termo pozolana foi associado com formações naturais de cinzas vulcânicas e terras calcinadas, as quais reagem com a cal em temperaturas ambientes e na presença de água. Recentemente o termo tem sido estendido para cobrir todos os materiais sílico/aluminosos os quais, em forma finamente dividida e na presença de água, irão reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio para formar compostos que possuem propriedades cimentícias. Esta definição geral engloba resíduos como cinzas volantes (fly ash) cinzas de casca de arroz e sílica ativa (sílica fume) (SABIR *et al.*, 2001).

De acordo com Lima e Rossignolo (2010) a reação pozolânica se caracteriza pelo consumo lento do hidróxido de cálcio livre (CH), após hidratação do cimento anidro, pelo material pozolânico que gera C-S-H (silicato de cálcio hidratado) adicional.

Para Cordeiro e Désir (2010) durante as reações de hidratação do cimento Portland ocorre a liberação do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) em grande quantidade (em torno de 20% da massa dos compostos hidratados). A reação entre compostos amorfos presentes na pozolana, como sílica e alumina, e o hidróxido de cálcio produz silicatos/aluminatos de cálcio hidratado, similares aos produzidos na hidratação do cimento.



Pozolanas naturais são provenientes de magmas geralmente ricos em sílica que solidificaram rapidamente e ficaram no estado amorfo ou cripto-cristalino. Enquanto que as pozolanas artificiais (argilas de qualquer tipo depois de sujeitas a temperaturas suficientes para a sua desidroxilação, mas inferiores ao início de recristalização) são obtidas pela criação de uma instabilidade interna a custa da saída de íons  $\text{OH}^-$  da rede cristalina dos minerais argilosos (TORGAL e JALALI, 2011).

As pozolanas, sejam elas naturais ou artificiais, devem ter como constituinte preponderante a sílica, que reage com a cal para formar o CSH, contribuindo para a resistência mecânica do sistema cimentício. Estas podem conter também alumina e óxido de ferro, responsáveis pela formação de sílicoaluminatos e aluminatos, com contribuição menos expressiva para a resistência mecânica, além de óxidos de metais alcalinos e óxido de cálcio (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Segundo Massena, (2011) as primeiras utilizações bem documentadas das pozolanas datam do tempo do Império Romano quando se descobriu que as cinzas vulcânicas, finamente trituradas e misturadas com cal, produziam uma argamassa resistente e duradoura. Rapidamente as explorações foram alargadas a outras zonas e mais tarde, a toda a bacia mediterrânea. A utilização de pozolanas foi estendida a produtos artificiais (onde as pozolanas naturais não existiam) fazendo-se uso das diversas colorações do material, variáveis conforme a sua origem. Vitruvius, engenheiro e arquiteto romano, que viveu no século I a.C., descreveu quatro tipos de pozolanas (negra, branca, cinzenta, e vermelha) e os seus usos.

Atualmente a substituição em parte do cimento pelo uso de adição mineral como pozolanas vêm crescendo em virtude dos conhecimentos técnico-científicos cada vez mais sistematizados, consolidando as características e propriedades destes materiais para uso nos mais diversos setores industriais em especial, o da construção civil.

### **3.1 Substituição parcial do cimento por pozolanas**

A busca e o desenvolvimento de materiais para a construção civil que beneficiem o meio ambiente e permitam o uso de rochas e materiais residuais

que podem contaminar o meio físico-biótico e reduzir os gases (CO<sub>2</sub>) nocivos têm sido alvo de muitas pesquisas técnico-científicas. Por conseguinte, pesquisadores e industriais investem em várias iniciativas no intuito de produzirem cimento, concreto e argamassas ambientalmente corretos que dêem sustentabilidade a um ligante extremamente vantajoso sob os aspectos tecnológico, econômico, geológico e ambiental (MONTANHEIRO *et al.*, 2011).

Nesse sentido, o segmento que ultimamente tem merecido destaque é o dos materiais pozolânicos. Tais materiais se apresentam, em parte, como substitutos do clíquer Portland na fabricação do cimento e, simultaneamente contribuem para a redução das emissões de gases causadores do efeito estufa nesse setor industrial que, por si só, é o responsável por 5% do total das emissões de gases do planeta (WBCSD, 2010).

As aplicações de resíduos como adição mineral ou pozolana no cimento, têm grande aplicabilidade na construção civil, visto que esses materiais possuem características físicas e químicas que são próprias para utilização em concretos e argamassas (MANNAN; GANAPATHY, 2004). Outro fator relevante deve-se a sua composição física (estado amorfo ou cristalino) e, endurecimento em meio aquoso na presença de hidróxido de cálcio (LIMA e ROSSIGNOLO, 2009).

As pozolanas freqüentemente são mais baratas do que o cimento Portland que elas substituem, possuem a característica de uma hidratação lenta, e uma baixa taxa de desenvolvimento de calor: isto é de grande importância na construção em massa, e é por isso que o cimento Portland-pozolana ou uma substituição parcial do cimento Portland pela pozolana é vista como promissora (SABIR, *et al.*, 2001; COIMBRA, *et al.*, 2002).

De acordo com Oliveira e Barbosa (2006) algumas das vantagens técnicas resultantes do emprego de pozolanas em argamassas e concretos, se destacam: a redução ou inibição da reação álcali-agregado; aumento da resistência mecânica; a resistência a cloretos, sulfatos e água do mar, pode ser melhorada; a permeabilidade pode ser reduzida e a liberação de calor diminuída. Além dessas vantagens técnicas, tem-se o benefício econômico obtido por um consumo menor de cimento Portland, mantendo ou aumentando a resistência mecânica e melhorando a durabilidade.

No entanto, todas essas vantagens da mistura cimento Portland-pozolana dependem de uma série de parâmetros, tais como, finura e forma das partículas, área superficial específica, relação água/cimento, composição, tipo e quantidade da pozolana, os quais influenciam na sua reatividade pozolânica (MEHTA, 1987; ACI 232, 2000; MASSAZZA, 2004).

Graças as propriedades favoráveis do ligante, as pozolanas são amplamente usadas em todo o mundo como substitutas parciais do cimento Portland. O uso generalizado dos cimentos Portland com adições em concreto e argamassa tornou-se quase inevitável devido os efeitos benéficos de suas propriedades tecnológicas (MEHTA, 1981; ACI 232, 1994).

### **3.2 Caulim**

O termo caulim é utilizado para denominar a rocha que contém o mineral caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e os minerais acessórios tais como mica, quartzo feldspato dentre outros, assim como o produto de seu beneficiamento. É uma rocha constituída de material argiloso, com baixo teor de ferro e cor branca ou quase branca e de granulometria fina (LUZ, 1994; WILSON, SOUZA SANTOS, 1998; MURRAY, 2000; CONCEIÇÃO *et al.*, 2005; COELHO, 2007)

Os caulins são resultantes de alterações de silicatos de alumínio, particularmente, os feldspatos e podem ocorrer em dois tipos de depósitos: os primários ou residuais (eluvial) e os secundários. Depósitos primários são resultantes das alterações de rochas *in situ*, enquanto que os secundários são oriundos da deposição de materiais transportados por correntes de água doce (LUZ, 1994; WILSON, SANTOS, 1998; ; LUZ; COELHO, 2007; CARVALHO, BERTOLINO, 2009).

O caulim é considerado uma rocha industrial, em função de suas propriedades físicas e químicas, pode ser utilizado como matéria-prima em diversos tipos de indústrias, tais como as de papel, cerâmica, tinta, plástico, concreto, vidros, borracha, cosmético, fármacos, catalisadores, fertilizantes, entre outras (LUZ, 2009; INDUSTRIAL MINERALS, 2001).

No entanto, o uso mais importante do caulim é na fabricação de papel, podendo ser utilizado como carga ou cobertura, com um consumo de

aproximadamente 45% de todo o caulim produzido no mundo; assim, dos 37 milhões de toneladas de caulim beneficiado no mundo, cerca de 16 milhões são utilizados na indústria de papel. O Brasil é responsável por aproximadamente 7% da produção mundial de caulim e detém em torno de 28% das reservas mundiais (LUZ, 2000; LUZ *et al.*, 2008; LUZ, 2009,).

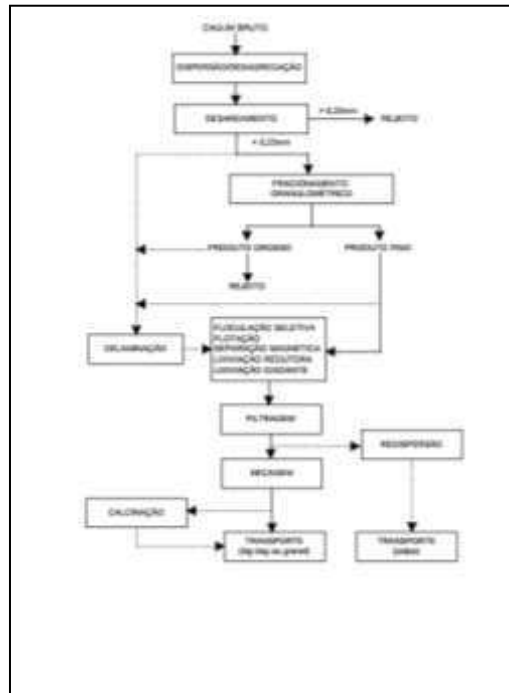
Segundo Luz, (2008) o caulim é constituído principalmente de caulinita, um silicato de alumínio hidratado. A caulinita é um filossilicato (argilo-mineral) com composição química teórica de 39,50% de  $Al_2O_3$ , 46,54% de  $SiO_2$  e 13,96% de  $H_2O$ ; no entanto, podem ser observadas pequenas variações em sua composição.

As principais impurezas associadas aos caulins comerciais são quartzo, feldspato, muscovita, biotita, óxidos de titânio e óxidos ou hidróxidos de ferro, tais como goethita, hematita e magnetita. Essas impurezas afetam significativamente a alvura do caulim, principal propriedade física relacionada à sua aplicação na indústria de papel (SILVA, 2007).

Para promover o melhor aproveitamento do caulim é necessário realizar operações de beneficiamento, as quais vão depender do uso a que se destina. Existem dois processos de beneficiamento que ocorrem por duas vias, seca e úmida.

Para o Cetem (2008) no beneficiamento por via seca o caulim bruto é inicialmente fragmentado (britador) abaixo de 2,54 cm (1pol.), sendo em seguida conduzido para secagem em secadores rotativos. Após seco, o caulim é pulverizado em moinhos de rolos, para então ser classificado, por tamanho, por meio de um processo denominado flotação com ar (*air flotation*), onde as partículas mais finas são conduzidas para o topo do aero-separador por uma corrente de ar quente, havendo assim a separação de partículas por tamanho. No entanto, dificilmente encontra-se caulins, no estado natural, com esses pré-requisitos, predominando, assim, o beneficiamento realizado a úmido.

De acordo com Luz *et al.* (2005) e Monte *et al.* (2001), o beneficiamento a úmido envolve muitas etapas sendo estas descritas na Figura 2.



**Figura 2** - Diagrama simplificado do beneficiamento de caulim via úmida

Fonte: Luz *et al.*, 2005

### 3.3 Resíduos de caulim e conseqüências ambientais

O caulim é um material com vasta gama de aplicações nos mais diversos setores industriais, no entanto, sua extração e beneficiamento provocam a geração de enormes quantidades de resíduos (ROCHA, 2008, VARELA *et al.*, 2009).

Dois tipos de resíduos são gerados durante o processamento do caulim, um oriundo da etapa de separação do minério caulim, que representa cerca de 70% do total do resíduo produzido, e é gerado pelas empresas mineradoras na etapa logo após a extração, sendo comumente chamado resíduo grosso, nessa etapa já se verifica a grande quantidade de rejeito produzido na obtenção do mineral. O segundo resíduo se origina na fase do beneficiamento, que objetiva separar a fração fina do minério, purificando o caulim e gerando um resíduo denominado, em geral, resíduo fino (MENEZES *et al.*, 2007).

Segundo Varela (2009) esses resíduos são constituídos basicamente de caulinita, mica, muscovita e quartzo.

Segundo Dias (2010), em virtude da forma que é descartado o resíduo do processamento do caulim provoca uma série de impactos ambientais tanto ao meio físico como ao biótico. Os resíduos são depositados a céu aberto, ocupando uma grande área. Quando secos, suas partículas finas são espalhadas pela ação do vento, ocasionando poluição do ar (COSTA, 2006).

A deposição deste rejeito constitui uma tarefa delicada, quer por questões econômicas, quer por questões ambientais. Em alguns casos, os rejeitos são utilizados para preenchimento de cavas, na recuperação ambiental de áreas já lavradas. No entanto, a absoluta maioria do resíduo continua exposta e contaminando o meio ambiente circunvizinho (DUTRA, 2005).

De acordo com Rocha (2008) a indústria de extração e beneficiamento do caulim não deve apresentar comportamento de manipulação e tratamento de resíduos. Portanto, sendo semelhante ao observado em grande parte da indústria mundial, considerando seus resíduos apenas como materiais que precisam ser descartados, independentemente do modo de destinação final.

De acordo com Rezende (2008) não é possível precisar os efeitos futuros na flora e fauna das regiões que acomodam as montanhas de resíduos. O que faz com que a imprecisão dobre e que os impactos desses materiais se intensifiquem ainda mais.

Segundo o Conama (2010) pode-se definir impacto ambiental como sendo qualquer alteração nas características físicas, químicas e/ou naturais do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas, que, direta ou indiretamente, afetem: a saúde, segurança e bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; o conjunto de plantas e animais de uma determinada área; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos naturais.

Esforços ainda se mostram pequenos perante o volume de produção e graves problemas são gerados pelos resíduos. Frente a este cenário, se evidencia que alternativas de reciclagem e/ou reutilização devem ser investigadas e, sempre que possível, implementadas (DIAS, 2010).

Com base em dados da quantidade disponível e das características do resíduo, é possível o seu direcionamento para um ciclo produtivo, a fim de utilizar parte do volume de resíduo a ser descartado e economizar matérias-primas não renováveis e energia, de modo a contribuir para o desenvolvimento sustentável (REZENDE, 2008).

### **3.4 Utilização do resíduo de caulim como metacaulinita**

Há, razões importantes para estender a prática da substituição parcial do cimento em concreto e argamassas por resíduos e outros materiais processados com menos energia, os quais tenham propriedades pozolânicas. Uma possível fonte de pozolana é a argila calcinada proveniente do resíduo de caulim (SABIR *et al.*, 2001).

O resíduo de caulim tratado termicamente pode ser utilizado na construção civil em argamassas atuando como um material de elevada atividade pozolânica, formando fases do grupo dos silicatos, especificamente os silicatos de alumínio e cálcio hidratados resultantes da sua reação com o hidróxido de cálcio ou cal hidratada nas argamassas (MENEZES *et al.*, 2009).

O resíduo do beneficiamento do caulim é um material alternativo que, apresenta elevado potencial para utilização em argamassas como metacaulinita, em virtude de suas características físicas e mineralógicas (ROCHA, 2005).

O uso deste resíduo com propriedades pozolânicas em substituição parcial ao cimento vem a ser uma alternativa para reduzir custos promovendo melhorias significativas nas propriedades mecânicas de argamassas e concreto (REZENDE, 2011). Pesquisas recentes avaliam esta incorporação e os seus resultados reagem positivamente quanto a este uso.

Barata (2012) investigou as características físicas, químicas e mineralógicas dos resíduos processados da Região do Jari e do Capim, na Região Amazônica, de modo a avaliar se atendem aos requisitos como matéria-prima para a produção de uma pozolana de alta reatividade. Os resultados das análises foram convergentes e apontam ambos os caulins estudados como excelentes matérias-primas para a produção de um metacaulim de alta reatividade.

Menezes, (2009) analisou a viabilidade técnica e a atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para a produção de argamassas. Observou nos resultados, que os resíduos são constituídos de caulinita, mica e quartzo e que a utilização do resíduo calcinado aumenta a resistência mecânica das argamassas após 28 dias de cura em até 150%.

Rocha (2008) utilizou o resíduo do beneficiamento do caulim como matéria-prima alternativa em argamassas para a construção civil. Com base nos resultados, concluiu que o resíduo de caulim pode ser utilizado na produção de argamassas para construção civil apresentando propriedades mecânicas de acordo com a normalização.

Castro (2008) estudou a incorporação dos resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil. Foram realizados ensaios de caracterização física, química, mineralógica e ambiental. Nos ensaios tecnológicos foram estudados os índices de atividade pozolânica dos resíduos no estado natural e calcinados na temperatura de 600°C durante o período de duas horas. Os traços para argamassas de assentamento e revestimento foram incorporados com 5%, 10%, 15% e 20% de resíduo de caulim com e sem calcinação, em substituição à parte do cimento. Os resultados obtidos mostraram que os resíduos calcinados apresentaram elevada atividade pozolânica e resistência a compressão simples. Os resíduos sem calcinação incorporados até 10% nos traços das argamassas apresentaram comportamento mecânicos dentro das normas da ABNT, concluindo que existe viabilidade técnica da utilização do resíduo para o uso na construção civil em argamassas de assentamento e revestimento de alvenarias.

Severo (2013) avaliou o reaproveitamento de resíduos do beneficiamento do caulim e da serragem do granito minerais para o desenvolvimento de corpos geopoliméricos com aplicações na construção civil. Em seus resultados constatou a eficácia da ativação alcalina na produção de corpos cerâmicos e que os melhores resultados mecânicos estão associados a uma maior quantidade de resíduo de caulim calcinado.

Barata e Dal Molim (2002) avaliaram as potencialidades do emprego do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento do caulim como matéria prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. Os resultados demonstram que este resíduo caulínico possui uma elevada reatividade com o



cimento, apresentando um IAP, 103%. Este fato foi atribuído a sua elevada área específica e a grande quantidade de caulinita desordenada, características que determinam que essa adição mineral apresentará os mesmos mecanismos de ação de uma sílica ativa.

### **3.5 Resíduos de caulim como material alternativo**

A inserção dos resíduos num ciclo produtivo representa uma opção de recuperação alternativa, sendo interessante tanto no aspecto ambiental como no econômico (ANDREOLA *et al.*, 2002).

A reciclagem e a re-utilização estão entre as principais alternativas na busca pelo desenvolvimento sustentável, tanto pelos fatores econômicos, como pelos ambientais, possibilitando a economia das matérias-primas não renováveis e de energia, reduzindo os impactos ambientais dos resíduos na sociedade moderna.

De acordo com o Guia de Sustentabilidade da Construção, (2008) desenvolvimento sustentável é o tipo de desenvolvimento que atende às necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades. Portanto, a sustentabilidade é a situação desejável que permite a continuidade da existência do ser humano e de nossa sociedade, ou seja, é o objetivo máximo do processo de desenvolvimento sustentável, buscar integrar aspectos econômicos, sociais, culturais e ambientais da sociedade humana com a preocupação principal de preservá-los, para que os limites do planeta, a habilidade e a capacidade das gerações futuras não sejam comprometidas.

Nesse sentido, a incorporação dos resíduos da extração e do beneficiamento mineral em produtos para construção civil tem-se mostrado uma ótima alternativa para diversificar a oferta de matérias-primas e para a economia de recursos naturais.

A indústria da construção civil pode ter um papel relevante como receptora de resíduos sólidos no tocante à sua disposição final. A incorporação desses resíduos em matrizes cerâmicas e cimentícias com o objetivo de produção de artefatos para a construção civil, se feita de maneira criteriosa,

permite dar um destino ambientalmente correto para resíduos que, de outra forma, seria fonte de poluição (LUCAS e BENATTI, 2008)

Diante disso, Rezende, (2008) avaliou a viabilidade do resíduo de caulim como matéria-prima alternativa para a produção de blocos de vedação cimento-areia, substituindo parte da areia pelo resíduo. Os resultados com substituição de até 70% de areia foram adequados para alvenaria de vedação.

Andrade *et al.* (2009) estudou o efeito da incorporação de um resíduo proveniente do beneficiamento de caulim sobre as propriedades físicas, químicas e tecnológicas de revestimentos cerâmicos de alta qualidade com o objetivo de caracterizar e estudar o processamento do resíduo com adição de uma argila plástica em formulações para revestimentos cerâmicos. Os resultados preliminares mostraram que o resíduo estudado pode ser considerado como matéria-prima de grande potencial para a indústria de pisos e revestimentos cerâmicos.

Anjos (2011) estudando a utilização de resíduo de caulim para produção de blocos solo cal, avaliou o traço de 1:10 de blocos de solo-cal convencional e solo-cal com a introdução de resíduo de caulim nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40% curados em câmara úmida por períodos de 28, 60 e 90 dias. Neste estudo o autor observou que o comportamento mecânico foi melhorando com o aumento do período de cura, sendo os melhores resultados para 28 dias de cura de 1,62MPa, para 60 dias de 2,04MPa e para 90 dias de 5,05MPa. Esses resultados indicam a ocorrência da reação pozolânica, por garantir maior resistência, sendo uma reação mais lenta que favorece a durabilidade do material observada com maior significância para os 90 dias de cura aos 20% de substituição.

Segundo Souza (2008) sendo a construção civil um dos ramos da atividade tecnológica que tem o maior consumo (volume) de recursos naturais, parece ser o mais indicado a absorver boa parte dos resíduos sólidos, tanto o gerado pela própria construção civil (entulho), como os provenientes de outras atividades.

Frente a isto, segundo dados do SINAPROCIM 2010 – Sindicato Nacional das Indústrias de Produtos de Cimento houve em 2009 um decréscimo de 2,2% no consumo de cimento e aumento de 3,3% no consumo

de aditivos minerais, o que demonstra a confiabilidade do produto e avanço da consciência ecológica.

### **3.6 Metacaulinita como pozolana**

As argilas mais utilizadas para a produção de pozolana são as caulinitas, montmorilonitas e as ilitas (Souza Santos, 1992).

De acordo com Sabir *et al.* (2001) e Shvarzman *et al.* (2003), o aproveitamento da argila caulinita calcinada como adição pozolânica moderna para argamassas e concreto, tem recebido nos últimos anos muita atenção por parte dos pesquisadores.

A argila caulinita sofre alterações em suas propriedades físicas e químicas, quando submetida a tratamentos térmicos. A metacaulinita ( $Al_2Si_2O_7$ ) é um produto amorfo resultante do processo de desidroxilação da caulinita, por meio da calcinação em temperaturas controladas. A temperatura de calcinação das argilas afeta a atividade pozolânica do produto resultante. A argila se torna mais reativa quando conduz à perda da hidroxila, resultando em colapso e desarranjo da estrutura da argila (OLIVEIRA e BARBOSA, 2005)

Segundo Kakali *et al.* (2001), o desenvolvimento das propriedades pozolânicas de argilas calcinadas depende da natureza e da abundância do argilomineral, das condições de calcinação e da granulometria do produto final. As propriedades pozolânicas são desenvolvidas por calcinação a cerca de 500°C, cujas temperaturas ótimas são entre 700°C e 900°C (SOUZA SANTOS, 1992).

Em sistemas a base de cimento Portland, a metacaulinita acelera o processo de hidratação, já que é constituída por partículas extremamente finas que atuam como pontos de nucleação para formação do hidróxido de cálcio, como também reagem rapidamente com este produto de hidratação. Na metacaulinita, independente do teor de incorporação, a reação pozolânica alcança o seu pico no período máximo entre 7 e 14 dias (BARATA E DAL MOLIN, 2002).

As propriedades pozolânicas de uma metacaulinita podem ser estabelecidas pelas normas ABNT NBR 12653 e pela ASTM 618, apresentadas no Quadro 1.

**Quadro1** - Propriedades pozolânicas de uma metacaulinita

Propriedades	ABNT NBR 12653	ASTM 618
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe	>93%	>95%
SiO <sub>2</sub>	59,4%	52,0%
Tamanho médio	1,6µm	1,5µm
Partículas>45 µm	0,5%	-
Área específica	14,2m <sup>2</sup> /kg	-
Densidade aparente	2,57kg/dm <sup>3</sup>	-

### 3.7 Considerações sobre a temática: utilização do resíduo de caulim

O caulim por ser considerado uma rocha industrial apresenta grande aplicabilidade nos mais variados setores industriais tais como: a indústria de papel, a de cerâmica, na fabricação de tintas, medicamentos, produtos de higiene dentre outros, atuando como matéria prima para o desenvolvimento de vários produtos. Considerando-se um importante insumo não renovável, faz-se necessário o estudo de políticas alternativas para a sua utilização.

A atividade minerária de caulim, por sua própria natureza, altera as condições ambientais. A extração de um volume expressivo de argila e de materiais rochosos, em todas as suas fases, envolve atividades que provocam impactos para o meio físico e biótico e acarretam problemas sócio-econômicos.

O beneficiamento do caulim gera uma grande quantidade de resíduos, que depositados inadequadamente geram transtornos para o meio ambiente bem como para os habitantes das localidades próximas as indústrias de beneficiamento.

Os resíduos de caulim contêm o argilomineral caulinita em sua composição, esse material de estrutura cristalina quando tratado termicamente sofre rearranjo estrutural, e torna-se amorfo. Essa propriedade pode ser aproveitada para utilização como material pozolânico, em argamassas de assentamento e revestimento, além de aplicações diversas no setor da construção civil.

Aliando a necessidade de diminuição do impacto causado pelos resíduos de caulim no meio ambiente e a grande emissão de dióxido de carbono oriundo da produção do cimento, a substituição em parte deste, pelo resíduo de caulim como material pozolânico em argamassas poderá vir a ser uma alternativa que promova a construção civil como receptora deste material nas suas diversas formas de utilização.

Assim, a disposição adequada de resíduos passa a ser primordial para a preservação ambiental, surgindo a necessidade de se desenvolverem mecanismos para promover a conscientização e a busca por soluções para a implantação de tecnologias capazes de, a um só tempo, minimizar os impactos decorrentes da disposição destes resíduos no ambiente e reduzir os custos envolvidos nessa atividade.

Diante da necessidade de implementação de práticas que busquem o desenvolvimento sustentável e que valorize o conceito de sustentabilidade, a utilização de resíduos advindos do beneficiamento do caulim, pode ser considerado uma alternativa promissora para o setor da construção civil.

#### **4. Durabilidade**

A norma internacional ISO (International Organization for Standardization 2001) 15686-1 apresenta definições para os conceitos de durabilidade dentre elas, a durabilidade aparece descrita como a capacidade de um edifício ou de uma parte de um edifício de desempenhar a sua função durante um determinado intervalo de tempo, sob a ação dos agentes presentes em serviço.

De acordo com Raposo (2010), a durabilidade ou previsão do tempo de vida útil de um material ou componente pode basear-se, quer em métodos determinísticos, quer em métodos probabilísticos: nos métodos determinísticos, a vida útil de um elemento é função de uma durabilidade de referência, normalmente indicada pelo fabricante, posteriormente modificada por fatores externos, obtendo-se um valor indicativo da sua durabilidade; os métodos probabilísticos define a probabilidade de ocorrência, de uma mudança de estado de um elemento para superar a incerteza relacionada com a sua forma de degradação e a imprevisibilidade das respectivas condições de serviço.

Estes métodos baseiam-se no estudo dos fatores de degradação, dos mecanismos de atuação e da sua quantificação, traduzida em função da degradação obtida através de dados recolhidos em testes de degradação em laboratório.

Todavia, nenhum material é eternamente durável, a manutenção das estruturas sempre existirá independente dos materiais dos quais são constituídas. Hoje se observa uma preocupação maior com a qualidade de serviços e produtos para que resulte num menor custo de produção e de manutenção (SOUZA, 2008).

Segundo Vasconcelos e Akasaki (2010) com vistas à durabilidade, alguns resíduos, quando adicionados às pastas, às argamassas e aos concretos, podem ser benéficos, enaltecendo propriedades do material, além de tornar os resíduos, fontes de matéria-prima para a construção civil.

De acordo com Farias Filho (2007), os processos de reciclagem e reutilização de resíduos são fundamentais por diversos aspectos, dentre os quais podem se destacar: i) economia de energia na produção; ii) redução na ocupação de áreas como depósito de resíduos; iii) reciclagem destes resíduos para aproveitamento como material alternativo na construção civil; iv) contribuição para alcançar o desenvolvimento sustentável; etc.

Para Oliveira (2006) o processo de desenvolvimento de um novo produto deve resultar em uma tecnologia pronta para ser utilizada, pois a abordagem eminentemente tecnológica é insuficiente no seu desenvolvimento, especialmente no caso do aproveitamento de resíduos. A eventual presença de compostos agressivos misturados aos resíduos sólidos pode não afetar o comportamento tecnológico do material, mas pode expor os futuros usuários a riscos de saúde ou a prejuízos devido à baixa qualidade do produto alternativo proposto. Neste sentido, é condição fundamental a estimativa do comportamento do novo produto dentro dos princípios de avaliação de desempenho.

Considerando a complexidade dos mecanismos de degradação, a prolongada vida útil dos produtos da construção civil e o elevado custo das obras civis, a avaliação da durabilidade é certamente o aspecto mais importante do desenvolvimento de um novo material (JONH, 1997).

Para que se haja confiabilidade nas características tecnológicas de um novo material e indicação deste como uma possibilidade técnica, a ser disponibilizada no mercado, é fundamental o conhecimento de suas condições de uso e de sua vida útil (SIDERIS, 2006).

Farias Filho (2011) salienta que não existe um modelo ou metodologia padrão para realização do estudo da durabilidade. No entanto, alguns parâmetros podem ser avaliados, principalmente, as propriedades mecânicas através da resistência à compressão simples.

#### **4.1 Envelhecimento acelerado**

O envelhecimento pode ser genericamente definido como qualquer processo de degradação produzido pela interação entre o material e o ambiente, alterando sua estrutura e suas propriedades dimensionais, mecânicas, elétricas, químicas ou térmicas. Esse processo de constante mudanças nas condições a que os materiais são submetidos (umidade, temperatura, etc.) faz com que a velocidade de deterioração, favoreça o surgimento de patologias prematuras e a possibilidade de recuperações antecipadas (NIK, 2005).

Os ensaios de envelhecimento acelerado envolvem a exposição do material a elevadas concentrações do fator de degradação ou a temperaturas mais elevadas que favorecem a taxa de reação química. Como na maioria das vezes a correlação destes resultados com os de envelhecimento natural é difícil, sua maior utilidade é comparativa. Não é possível projetar um método de envelhecimento acelerado sem o conhecimento prévio e preciso dos fatores de degradação relevantes (JONH, 1997).

De acordo com a norma ISO 15686-2 um dos meios de obter dados sobre o envelhecimento a curto prazo dos produtos da construção são os ensaios de curta duração acelerados que consistem na exposição acelerada de materiais em laboratório, onde os agentes de degradação são controlados de maneira a simular o ambiente natural o mais preciso possível.

Os ensaios acelerados possuem a vantagem da rapidez. Possibilitam respostas em menor intervalo de tempo a respeito do desempenho do material ao longo da sua vida útil baseando-se na simulação de fatores de degradação

importantes em intensidades elevadas. Apesar de eficientes no tocante a respostas rápidas, podem fornecer resultados imprecisos, pois é difícil submeter o material a vários fatores simultaneamente e a elevada intensidade pode provocar reações diferentes afirma Savastano Junior e John, (2009).



## 5. Materiais e Métodos

### 5.1 Materiais

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os materiais descritos a seguir:

**Resíduo de Caulim** – Os resíduos de caulim grosso (RCG) e resíduo fino (RCF) foram fornecidos pela empresa Caulim Caiçara S/A, localizada no município de Equador- RN.

**Cal Carbomil** - Foi utilizada uma cal hidratada conhecida comercialmente como Carbomil, fabricada no Município de Limoeiro do Norte – CE. A cal Carbomil é comercializada em sacos de papel “Kraft”, 3 camadas, contendo 20 kg e ao chegar ao laboratório foi reembalada em sacos plástico para evitar sua hidratação.

**Cimento Portland** - O cimento utilizado foi o Portland do tipo CPII-F 32, da marca CIMPOR BRASIL, onde este, não apresenta adição de pozolana. Pode ser encontrado no mercado varejista em sacos de 50 kg. Foi acondicionado dentro de sacos plásticos em sala aquecida para evitar a sua hidratação.

**Areia** - Agregado miúdo oriundo do Rio Paraíba. A areia foi seca em estufa a uma temperatura de 110 °C, passada na peneira ABNT nº 4 (4,8 mm), sendo desprezado o material retido, com a finalidade de diminuir a influência da zona de transição entre o agregado e a pasta (SOUZA, 2008).

**Água** - Água potável, fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba, para o sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande – PB.

## 5.2 Métodos

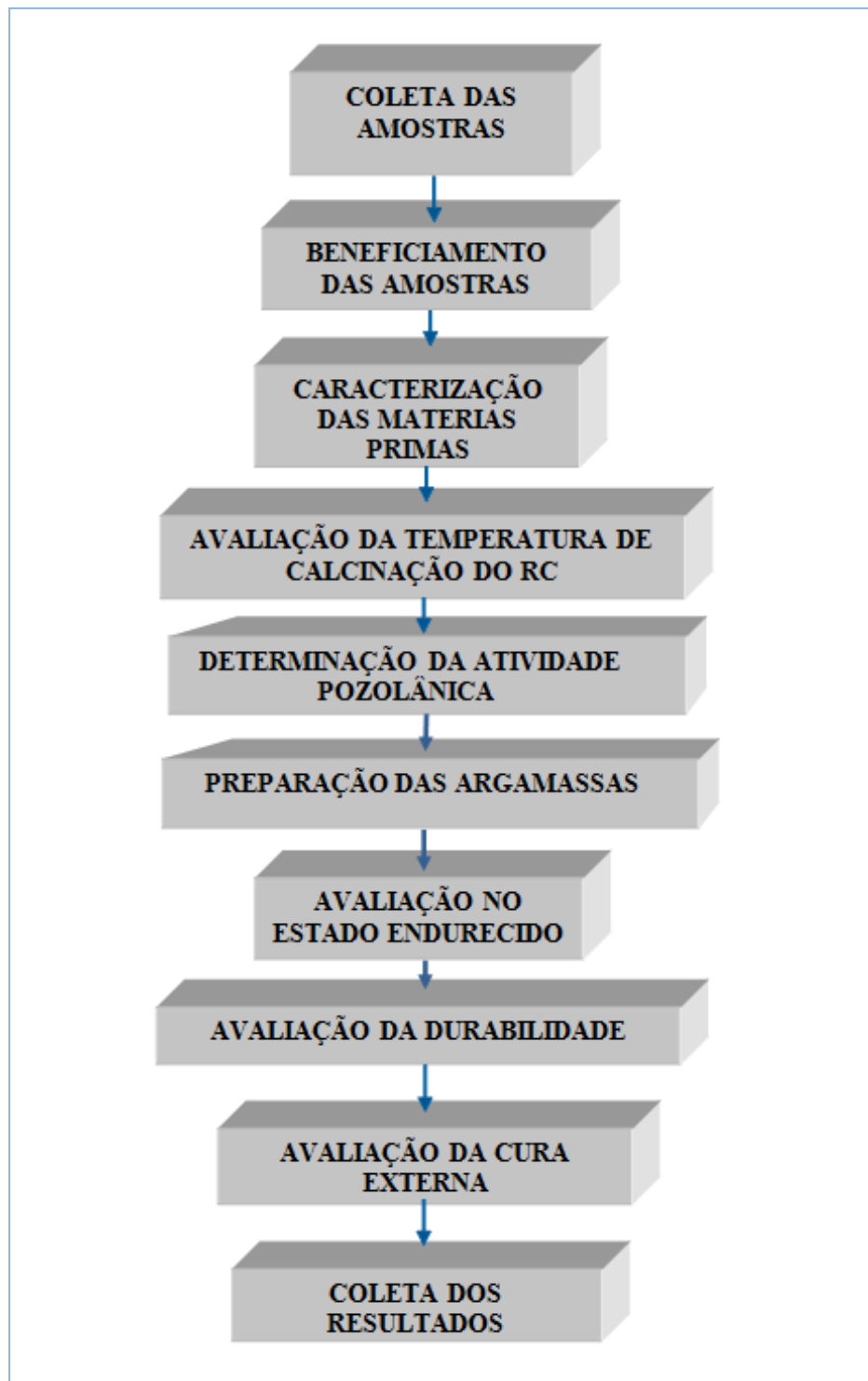
O procedimento experimental deste estudo, esquematizado no fluxograma na Figura 2, foi elaborado para a avaliação de dois tipos de argamassas de uso comum na construção civil. Foi utilizado dois traços 1:2:6 e 1:2:8 (cimento:cal:areia) conforme PINI (2008) para assentamento e revestimento.

Ambas as argamassas foram caracterizadas, e o cimento Portland foi substituído parcialmente, em massa, pelo resíduo de caulim calcinado (matacaulinita) em cinco porcentagens (5%, 10%, 15%, 20% e 30%).

Os teores de substituição avaliados foram também utilizados por Souza (2008) e de forma comparativa foram utilizados neste trabalho sendo o substituto do cimento o resíduo de caulim, objetivando analisar a sua influência nas propriedades mecânicas destas argamassas.

As argamassas foram submetidas a dois tipos de cura interna e externa e ao envelhecimento acelerado. Estas foram realizadas no Laboratório de Reciclagem do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

A caracterização dos materiais constituintes das argamassas, a dosagem, o preparo dos corpos-de-prova, os ensaios no estado endurecido foram realizados no Laboratório de Reciclagem e no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).



**Figura 3** - Etapas do desenvolvimento da pesquisa  
Fonte: Autor 2014

### **5.2.1 Coleta e beneficiamento das amostras**

As amostras de resíduos de caulim foram recolhidos separadamente sendo uma proveniente da primeira etapa de beneficiamento, chamada de resíduo grosso (RCG) e a segunda resultante da etapa de peneiramento, retida em peneira ABNT nº 200 chamada resíduo fino (RCF), foram secos em estufa a 100°C devidamente identificadas e armazenadas em sacos plásticos.

Os resíduos foram misturados nas proporções 1:1 sendo 50%RCG e 50%RCF, micronizados em moinhos que faz uso da circulação de jatos opostos de ar comprimido do tipo MultiNo<sup>®</sup> 270 M/S/M que proporcionou obtenção de 90% de material com granulometria inferior a 45 µm. A moagem foi realizada pela empresa Microfine Technologies localizada em Indaiatuba-SP.

### **5.2.2 Caracterização**

Os resíduos foram caracterizados por meio da determinação de sua distribuição de tamanho de partículas (Cilas,1064LD), área específica pelo método de BET, análise química por fluorescência de raios X (Shimadzu EDX-720), difração de raios X (Shimadzu, XRD 6000) e análise térmica diferencial (BP Engenharia RB3020 e DTG-60/60H Shimadzu)

### **5.2.3 Granulometria a Laser**

Para realização deste ensaio, os resíduos de caulim moídos foram dispersos em 250 ml de água destilada em agitador Hamilton Beach modelo 936 na velocidade de 17.000 rpm por 10 min. Em seguida 15 ml são separados e colocados em dispersor ultra sônico por 10 min; após agitação a amostra de resíduo de caulim foi colocada em um equipamento CILAS modelo 1064, em modo úmido, até atingir a concentração ideal 150 unidades de difração/área de incidência que é considerada ideal para o início do ensaio.

#### **5.2.4 Análise da superfície específica pelo método do BET**

A análise da área específica, do resíduo de caulim, foi realizada no Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste localizado em Recife-PE (CETENE-PE) em equipamento do tipo BJH Adsorption Reports ASAP 2420 V2.02. A técnica compreende em análises de área superficial desde 0,01 m<sup>2</sup>/g e de tamanho de poros de 3,5 Å a 0. Estes parâmetros são determinados por adsorção de um gás inerte (geralmente o N<sub>2</sub>).

#### **5.2.5 Composição química por fluorescência de raios X**

Para determinação da composição química realizada nos materiais, cimento, resíduo de caulim e a cal, a técnica utilizada foi à espectrometria de fluorescência de raios X. Esta técnica baseia-se no princípio de que a absorção de raios X pelo material provoca a excitação interna dos elétrons, gerando uma radiação característica conhecida como “fluorescência”. Nesta análise são obtidos os óxidos presentes (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, Ti<sub>2</sub>O, entre outros).

#### **5.2.6 Difração de raios X**

O ensaio de DRX foi realizado para o resíduo de caulim natural e calcinado a 650°C, 700°C, 750°C e 800°C tendo como objetivo caracterizá-los mineralogicamente. Na execução do ensaio, as amostras micronizadas passantes em peneira ABNT nº 325, foram submetidas a análise pelo método do pó. O aparelho utilizado para realização do ensaio, foi o difratômetro SHIMADZU XRD-6000 com radiação CuK $\alpha$ , tensão de 40kV, corrente de 30 mA, modo *fixed time*, com passo de 0,02 e tempo de contagem de 0,6 s com ângulo 2 $\theta$  percorrido de 5° variando entre 45° para as amostras referentes a caracterização e 60° para as amostras referentes as argamassas com adição do resíduo de caulim como substituto parcial do cimento.

### **5.2.7 Análise térmica diferencial**

As análises DTA das amostras de resíduo de caulim foram realizadas nos equipamentos BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12,5°C/min e DTG-60H, da SHIMADZU tendo como gás de purga o nitrogênio. A temperatura máxima utilizada nas análises térmicas foi de 1000°C. Este ensaio consiste em aquecer simultaneamente uma amostra e uma substância termicamente inerte. As diferenças de temperatura são medidas continuamente entre a amostra e o material inerte e refletem as reações provocadas pelo aquecimento. As transformações endotérmicas e exotérmicas são apresentadas como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Reciclagem da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande-PB.

### **5.2.8 Calcinação do resíduo de caulim**

Após a caracterização, os resíduos foram submetidos a queima em forno elétrico por duas horas em faixas de temperaturas que variaram de 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C utilizando uma razão de aquecimento de 5°/min. Objetivando avaliar a que temperatura ocorreria à total desidroxilação da caulinita, presente no resíduo.

### **5.2.9 Atividade pozolânica**

Para determinação da atividade pozolânica do resíduo de caulim foi realizado o ensaio de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 1992), que determina a atividade pozolânica utilizando o cimento.

Na realização deste ensaio, foi determinada a quantidade de água para um índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm de acordo com as prescrições estabelecidas pela ABNT. Após a determinação da quantidade de água a ser utilizada foram produzidos corpos de prova de 50 mm x 100 mm para a determinação do índice e da atividade pozolânica de acordo com a norma NBR

7215 (1996) e a NBR 5752 (1992) e submetidos a períodos de cura de 7, 14 e 28 dias. A capacidade de desempenho da metacaulinita com o cimento conforme a NBR 15894 P1 (2010) também foi determinada.

#### **5.2.10 Preparação das argamassas**

Foram utilizados dois tipos de argamassas, nas seguintes proporções 1:2:6 (cimento+resíduo de caulim:cal:areia) e 1:2:8 (cimento+resíduo de caulim:cal:areia) segundo as indicações prescritas por PINI (2008) para assentamento e revestimento.

Após a determinação das proporções em volume das argamassas foi necessário transformá-las em massa tendo como medidas de conversão de m<sup>3</sup> para kg respectivamente. O proporcionamento dos materiais, em massa, foi definido de acordo com a massa unitária de cada material utilizado na produção das argamassas.

Com a transformação dos traços em massa, determinou-se o índice de consistência das argamassas seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 13276 (ABNT, 1995) para obter um espalhamento de 260 mm ± 10 mm. Em cada traço foram moldados um correspondente a 10 corpos de prova para utilização nos ensaios e para os períodos de cura de 30, 60, 90, 180 e 360 dias.

Para efeito comparativo, as argamassas foram preparadas com e sem adição da metacaulinita produzida a partir do resíduo de caulim calcinado, tendo como teores de substituição 0% (sem adição de resíduo, sendo a argamassa de referência) e 5%, 10%, 15%, 20% e 30% de substituição parcial do cimento pelo resíduo.

A moldagem dos corpos de prova sucedeu com a separação dos componentes das argamassas. A areia foi seca em estufa a 110<sup>o</sup> C e passada em peneira de abertura 4,8 mm sendo desprezado o material retido. O cimento e a cal pesados e separados em sacos plásticos, para posterior mistura em misturador mecânico de movimento planetário, com capacidade máxima de 120 L.

### 5.2.11 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados seguindo duas etapas: a primeira composta pelos corpos de prova referente a cura interna e externa. A segunda, constituída dos corpos de prova destinados a avaliação da durabilidade através dos ensaios de envelhecimento acelerado.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões 50 mm x 100 mm de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Após desmoldados os corpos de prova foram identificados e em seguida submetidos a períodos de cura submersa em água saturada com cal por 30 dias. Após este período foram retirados e expostos ao ambiente de laboratório por 30, 60, 90, 180 e 360 dias. Compondo a primeira etapa da moldagem.

Para a segunda etapa de moldagem das argamassas, referente aos ensaios de envelhecimento, a cura foi realizada com os corpos de prova submersos por 30, 60, 90, 180 e 360 e após cada tempo de cura foram submetidos aos ciclos de molhagem e secagem.

A cura submersa foi realizada em um reservatório cheio de água, com 2% de cal utilizada para evitar carbonatação. Após cada período de cura, as argamassas foram submetidas aos ensaios de resistência a compressão simples (RCS), resistência a compressão na tração diametral (RCTD) e absorção de água por imersão (AA).

Os ciclos de molhagem e secagem tiveram duração de 24 horas, totalizando dez ciclos de molhagem e secagem. Os ciclos de molhagem tiveram duração de 13h, submersos em água, e o de secagem de 10h em estufa, à temperatura de  $60 \pm 2^\circ\text{C}$ , cada ciclo teve um intervalo de 30min ao sair de cada estado.

Após avaliação mecânica das argamassas de ambas as etapas as mesmas foram fragmentadas em almofariz, peneiradas em peneira ABNT nº 200 e submetidas aos ensaios mineralógicos e térmicos para acompanhamento das transformações de fases ocorridas.



### 5.2.12 Ensaio de absorção por imersão

O ensaio de absorção por imersão foi realizado seguindo os procedimentos da ABNT NBR 9778 (2005) após cada período de cura 30, 60, 90, 180 e 360 dias. Para cada traço foram moldados 60 corpos de prova sendo dois para cada período de cura conforme prescreve a norma.

### 5.2.13 Ensaio de resistência a compressão simples

Para a determinação da resistência a compressão simples das argamassas, foram utilizados os procedimentos indicados pelas normas da ABNT a NBR 7215 (1996) e NBR 13729 (1995). As resistências mecânicas foram avaliadas para as curas internas, externas e para o ensaio de durabilidade conforme cada idade de cura.

A prensa utilizada foi a de fabricação da SHIMADZU AG-IS com célula de carga de 100 kN.

A Figura 4 apresenta os corpos de prova no ensaio de resistência a compressão.



**Figura 4-** Corpos de prova no ensaio de resistência a compressão

Fonte: Autor 2012

### 5.2.14 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral

O ensaio de resistência a tração por compressão diametral (RTCD), foi realizado utilizando quatro corpos de prova para cada composição das argamassas com e sem adição de resíduo de caulim calcinado (metacaulinita). Os parâmetros seguidos foram os da NBR 7222 (2010). A prensa utilizada foi a de fabricação da SHIMADZU AG-IS com célula de 100 KN. A Figura 5 ilustra a disposição do corpo de prova na prensa.



**Figura 5** - Corpo de prova no ensaio de resistência a tração por compressão diametral

Fonte: Autor 2012

### **5.2.15 Avaliação do envelhecimento acelerado**

O ensaio de envelhecimento acelerado foi realizado com adaptação da Norma da ABNT – NBR 13554/96 do método de envelhecimento acelerado a partir do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem de solo-cimento.

A avaliação do envelhecimento acelerado nesse estudo objetiva a determinação do comportamento mecânico das argamassas por meio da resistência mecânica destas, submetidas a ciclos de molhagem e de secagem em temperatura controlada.

Para cada teor de substituição (5%, 10%, 15%, 20% e 30%) foram produzidos oito corpos de provas com adição de resíduo e sem adição de resíduo. Estes foram curados por 30, 60, 90, 180 e 360 dias, tendo o início do ciclo logo após os 30 dias de cura submersa e realizado a cada período correspondente a cura. Os procedimentos utilizados neste ensaio foram também realizados por Souza (2008).

Neste ensaio, utilizou-se como análise complementar, a análise termogravimétrica e difração de raios X com a finalidade de avaliar a perda de massa das argamassas ao longo do estudo, bem como verificar as transformações mineralógicas.

Para os ensaios complementares, as argamassas foram cominuídas e passadas em peneira ABNT de nº 200 (0,074mm) e submetidas a secagem em estufa a  $100^{\circ}\text{C} \pm 5$  por 24h. Após esse período as amostras foram esfriadas e acondicionadas em sacos plásticos fechados até a data do ensaio tentando desta forma, preservar as reações ocorridas durante cada período de cura.

### **5.2.16 Avaliação da cura externa**

Para a avaliação da cura externa foram moldados 3 corpos de prova nos traços de 1:2:6 e 1:2:8 para cada período de cura de 90, 210, 360 e 512 dias. Após a moldagem às argamassas foram expostas as condições naturais do ambiente submetidas a tempos de cura de 90, 210, 360 e 512 dias. A cada período de cura, foi avaliada a sua resistência mecânica e após esta, amostras

de fragmentos das argamassas foram recolhidas, cominuídas e encaminhadas para análise térmica e mineralógica.

Ao longo do tempo de cura tentou-se avaliar as possíveis manifestações patológicas existentes nas argamassas convencionais e incorporadas com resíduo de caulim, utilizando-se do registro fotográfico dos corpos de prova de argamassas submetidas a ação das intempéries.

## **6 Resultados e discussões**

### **6.1 Caracterização dos materiais**

#### **6.1.1 Análise térmica diferencial**

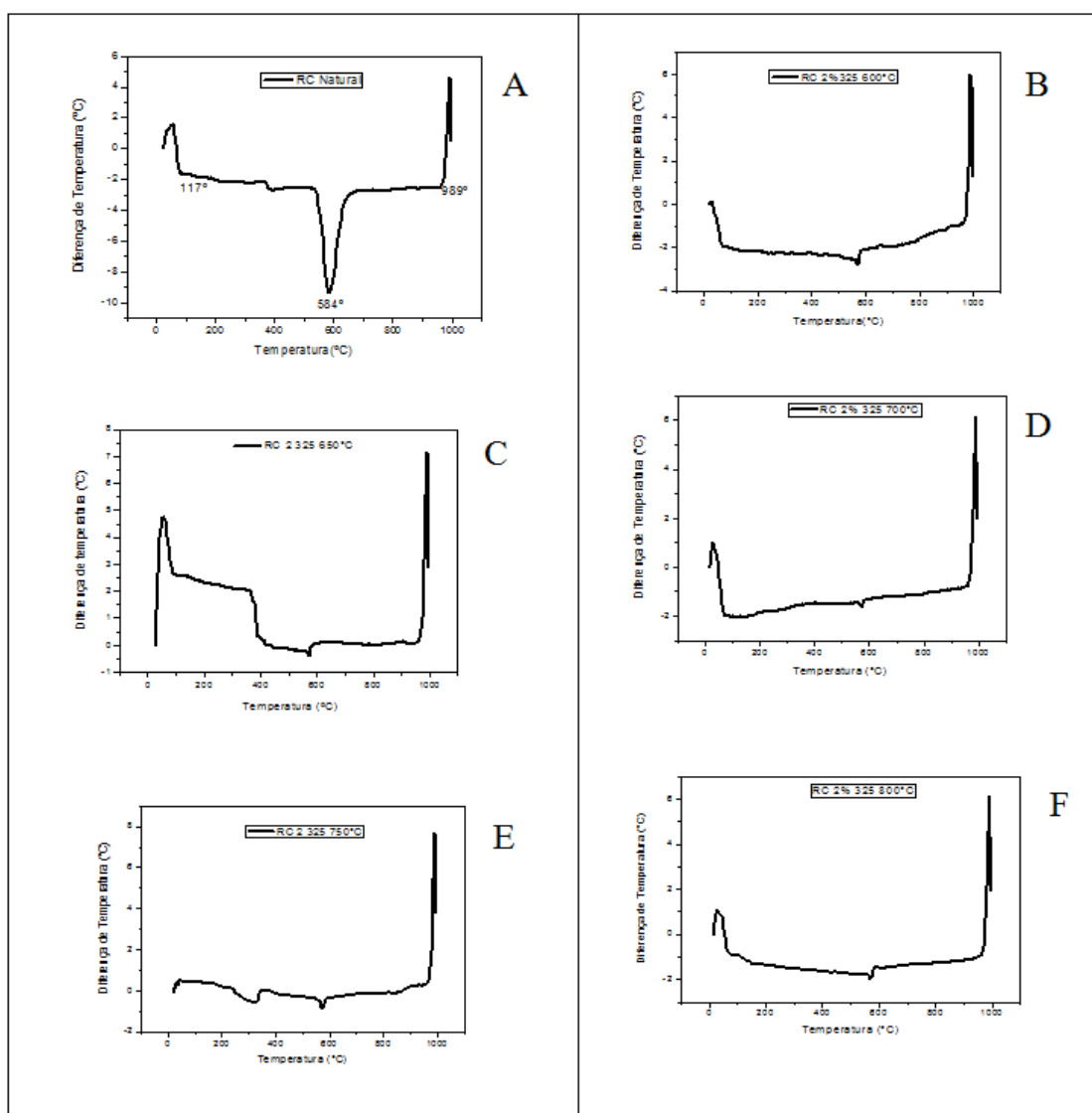
Na Figura 6 estão apresentadas as análises térmicas dos resíduos de caulim natural e calcinado nas temperaturas 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C, para avaliação da melhor temperatura de queima, que visa obtenção da total desidroxilação da caulinita.

Observa-se que na Figura 5 (A) encontra-se o RC natural, sem calcinação. Neste observa-se um pico endotérmico intenso a 600°C característico da caulinita presente no resíduo. As Figuras 5(B), 5(C), 5(D), 5(E) e 5(F) encontram-se os picos referentes a desidroxilação da caulinita, submetida a calcinação nas temperaturas 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C respectivamente.

O desaparecimento do pico endotérmico a 600°C em todas as temperaturas indica que os processos de calcinação, foram suficientes para promover a desidroxilação da caulinita.

De acordo com as curvas das análises térmicas do resíduo de caulim natural e calcinado representados na Figura 5, pode-se observar a 117°C pico referente a presença de umidade e água adsorvida, pico endotérmico a 589°C característico da presença da hidroxila no resíduo de caulim natural.

Após calcinação observa-se o desaparecimento do pico referente a caulinita. A partir de 540 °C inicia-se a reação de desidroxilação completada pelo pico endotérmico, a 600 °C, sendo nestas condições em que se forma a metacaulinita, resultado de um desarranjo da estrutura do argilomineral. A cerca de 980 °C dar-se início a nucleação da mulita (SOUZA SANTOS, 1992).



**Figura 6** - Gráficos das análises térmicas do resíduo de caulim (RC)

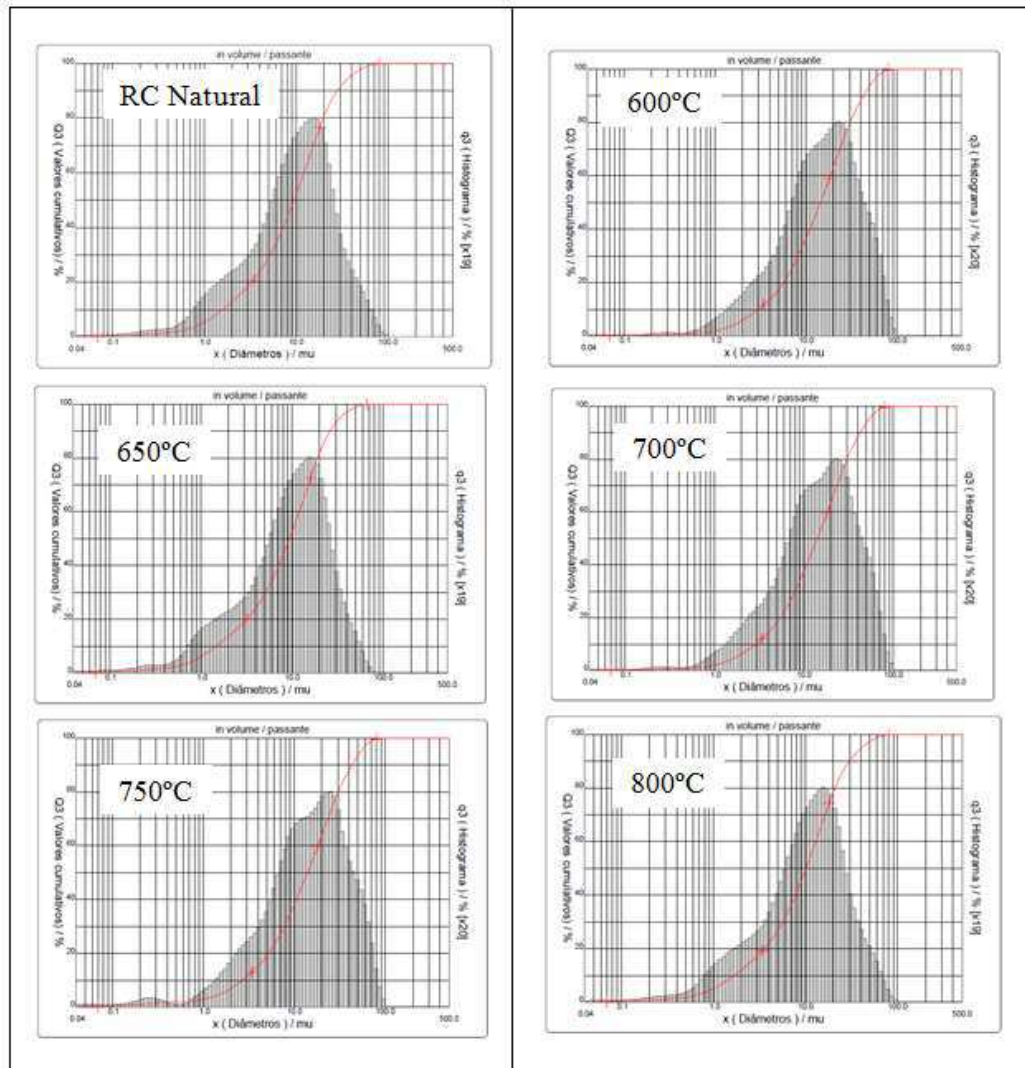
Fonte: Autor 2012

Para todas as amostras observa-se um pequeno pico endotérmico a aproximadamente 573 °C, provavelmente associado a transformação alfa-beta do quartzo, resultados semelhantes também encontrados por Menezes *et al* (2007).

## 6.1.2 Análise granulométrica das partículas

### 6.1.2.1 Resíduo de caulim

A distribuição de tamanho de partículas do resíduo de caulim natural e calcinado nas temperaturas 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C estão representadas na Figura 7.



**Figura 7** - Distribuição do tamanho de partículas do RC natural e calcinado.

Fonte: Autor 2012

Analisando a distribuição granulométrica do resíduo de caulim natural e calcinado a 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C observa-se que todas as curvas apresentaram um comportamento monomodal. Entretanto, observa-se em 600°C, 700°C e 750°C uma distribuição de partículas mais irregular, podendo ser consequência da aglomeração das partículas durante o processo da queima.

No Quadro 2 estão representados os diâmetros das partículas do resíduo de caulim natural e calcinado nas temperaturas de 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C.

**Quadro 2** – Granulometria do resíduo de caulim

Diâmetros ( $\mu\text{m}$ )	Natural	600°C	650°C	700°C	750°C	800°C
$D_{(10)}$	1,4	2,9	1,6	2,8	2,6	1,5
$D_{(50)}$	9,3	14,3	10,1	14,1	13,8	9,4
$D_{(90)}$	25,8	42,7	29,7	42,5	42,8	27,8
$D_{(M)}$	12,1	19,0	13,6	18,8	18,7	12,8

Fonte: Autor 2012

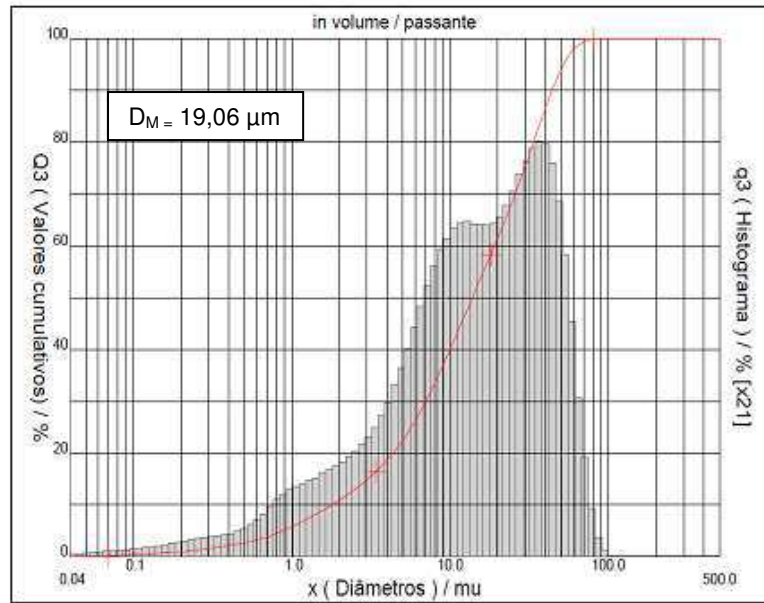
Quando comparados os diâmetros apresentados pela queima do resíduo de caulim nas temperaturas de 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C nota-se uma variação dos tamanhos das partículas através dos seus diâmetros médios ( $D_M$ ). Observa-se que a 800°C obteve-se o menor diâmetro de todas as queimas.

Segundo Helene (2003), a determinação do tamanho de partículas para o resíduo de caulim por este método torna-se não conclusivo, uma vez que se trata de um pó cujas partículas são lamelares e não esféricas. Considerando desta forma o BET como sendo um método mais adequado para a avaliação deste tipo de partículas.



### 6.1.2.2 Cimento

Distribuição granulométrica das partículas do cimento Portland CII F32. A Figura 8 apresenta a distribuição granulométrica do Cimento Portland CII F 32.

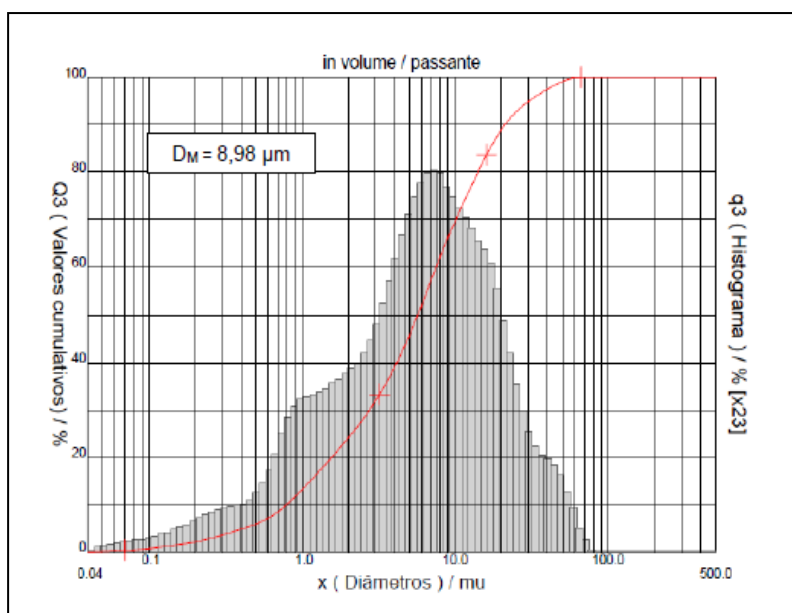


**Figura 8** - Distribuição granulométrica do Cimento Portland CII F 32  
Fonte: Autor 2012

A Figura 7 apresenta uma distribuição granulométrica monomodal com diâmetros  $D_{(10)}$ ,  $D_{(50)}$  e  $D_{(90)}$  de 1,80  $\mu\text{m}$ , 13,81  $\mu\text{m}$  e 43,93  $\mu\text{m}$  respectivamente, e um  $D_{(M)}$  19,06  $\mu\text{m}$ . Quando comparados os  $D_{(M)}$  do resíduo de caulim in natura e calcinado, com  $D_{(M)}$  do cimento observa-se que ambos apresentam-se com valores inferiores ao último.

### 6.1.2.3 Cal

A Figura 9 apresenta a distribuição granulométrica da Cal Carbomil.



**Figura 9** - Distribuição granulométrica da Cal carbomil  
 Fonte: Autor 2012

Observa-se que a curva apresenta comportamento na faixa modal com larga distribuição de tamanho de partículas acumuladas entre 0,04 µm – 90 µm, com diâmetro médio de 8,98 µm com  $D_{(10)}$  de 0,79 µm,  $D_{(50)}$  de 5,66 µm e  $D_{(90)}$  de 21,12 µm. A cal apresentou massa acumulada equivalente a fração argila (< 2 µm) de 24,14%, a fração silte (2 µm < X < 60 µm) de 75,66% e a fração areia (60 µm < X < 2000 µm) de 0,2%.

#### 6.1.2.4 Areia

Os resultados granulométricos da areia utilizada encontram-se apresentados no Quadro 3.

**Quadro 3** - Determinações do agregado miúdo

Determinações	Areia
Módulo de finura (MF)	2,59
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,46
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,60

Analisando os resultados obtidos no Quadro 3, para massa unitária verifica-se que o valor encontrado foi de  $1,46 \text{ g/cm}^3$  sendo este, inferior ao valor encontrado por SOUZA (2008).

O valor encontrado para o módulo de finura foi de 2,59% sendo classificada como areia de granulometria média, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Para massa específica o valor de  $2,6 \text{ g/cm}^3$  também foi encontrado por SOUZA (2008)

### 6.1.3 Análise da superfície específica pelo método BET

A Tabela 2 apresenta o resultado da superfície específica para o resíduo de caulim empregado neste estudo.

**Tabela 2** - Superfície específica do resíduo de caulim natural e calcinado (BET)

Resíduo de caulim (RC)		( $\text{m}^2/\text{g}$ )
RC in natura		29,7341
RC Calcinado	600°C	24,9821
	650°C	23,1827
	700°C	25,0959
	750°C	20,5243
	800°C	<b>25,9472</b>

Fonte: Autor 2012

Segundo Oliveira (2006), constata-se decréscimo das áreas específicas com a calcinação, uma vez que ocorre aglomeração das partículas quando eles são submetidos a altas temperaturas.

Considerando que a superfície específica se refere à área exposta pela unidade de peso de material, significando que, a área exposta pelas partículas será tanto maior quanto menor forem o tamanho destas, observa-se na análise acima que para a temperatura de  $800^\circ\text{C}$  obteve-se a maior área específica de

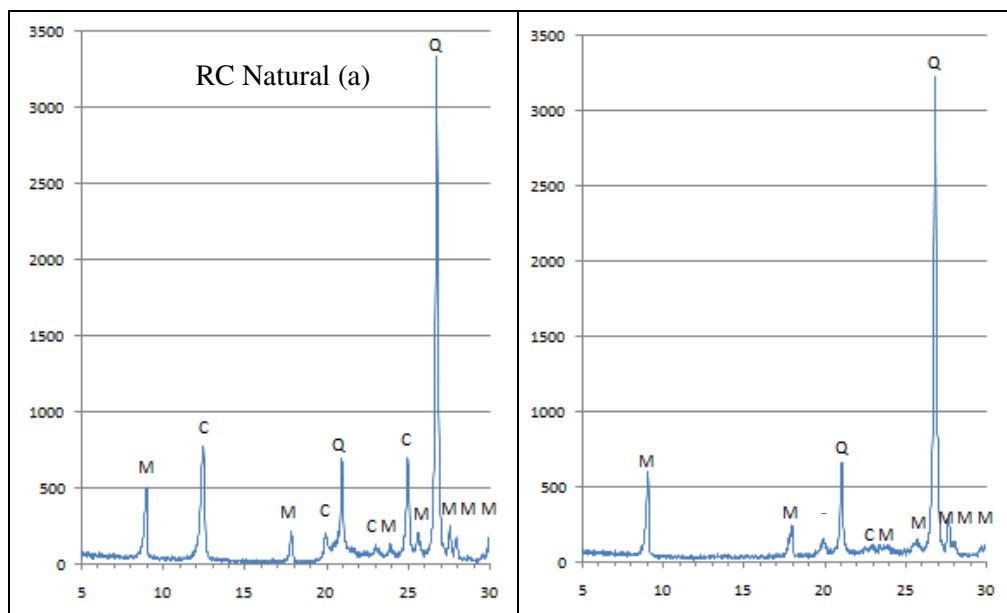
resíduo caulim calcinado, entretanto, como mostra a análise granulométrica do Quadro 3 esta temperatura também apresentou um menor tamanho de partícula.

Dessa forma, a temperatura de 800°C será a melhor temperatura para avaliação da atividade pozolânica em função das suas características físicas já que pelo aumento da superfície específica aumentam grandemente as possibilidades de reação do material, que poderá vir a desempenhar maior potencial pozolânico.

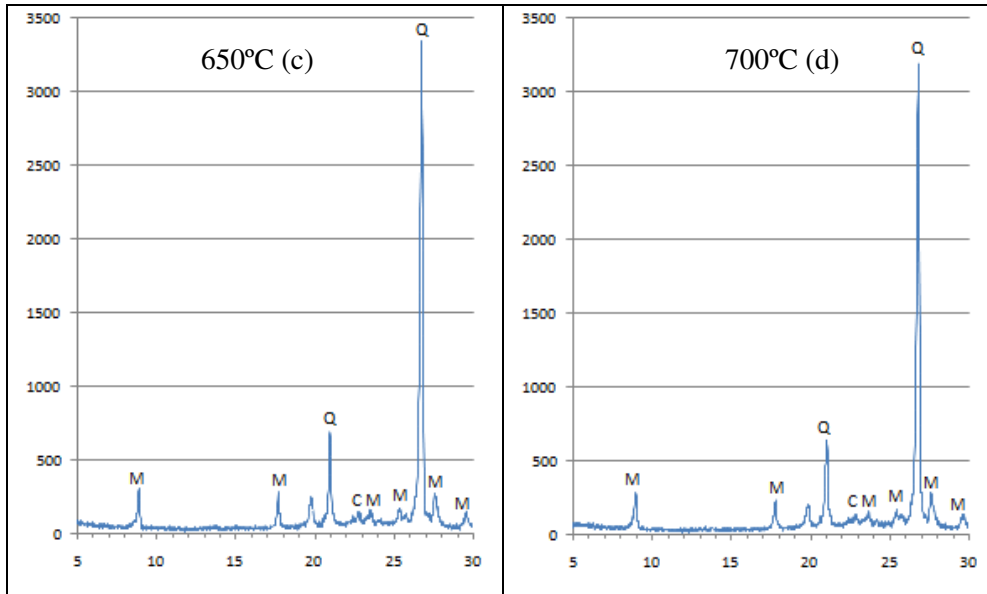
#### 6.1.4 Análise por difratometria de raiosX

Nas Figuras 10, 11 e 12 encontram-se reproduzidos os difratogramas das amostras de caulim in natura e calcinadas a 600°C, 650°C, 700°C, 750°C e 800°C.

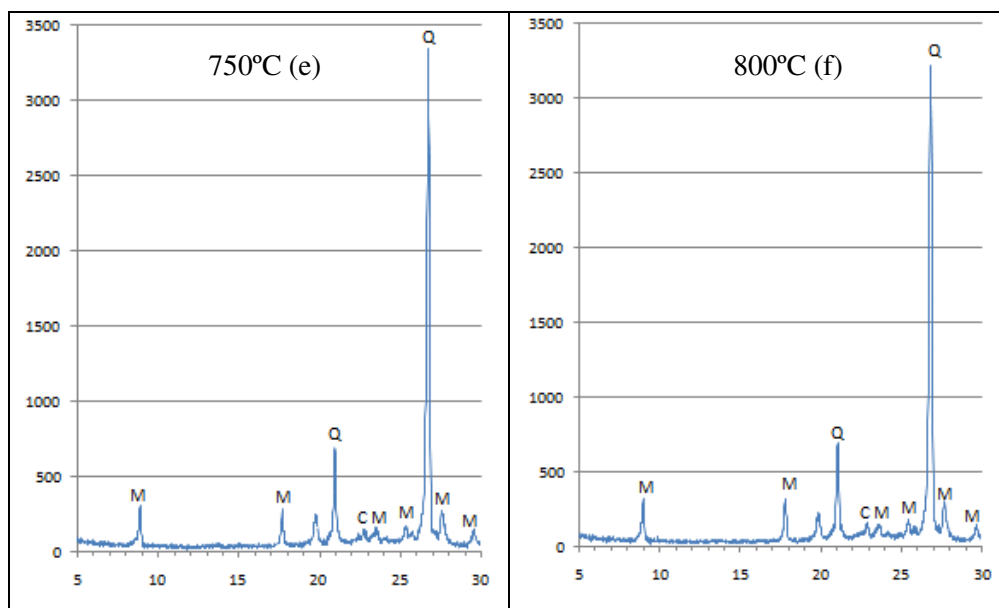
Para o caulim natural o difratograma apresenta picos correspondentes aos seguintes compostos: pico característico da caulinita (7,18, 3,58 e 1,66 Å), quartzo (4,20, 3,35 e 2,56 Å) e mica (9,99 e 5,04 Å)



**Figura 10** - Difratograma do resíduo de caulim natural (a) e calcinado a 600°C (b).  
Legenda: M – mica C - caulinita Q – quartzo



**Figura 11** - Difratoograma do resíduo calcinado a 650°C (c) e a 700°C (d)  
**Legenda:** M - mica C - caulinita Q – quartzo



**Figura 12** - Difratoograma do resíduo calcinado a 750°C (e) e a 800°C (f).  
**Legenda:** M - mica C - caulinita Q – quartzo

Fonte: Autor 2012

Observa-se que, para todas as amostras dos resíduos de caulim calcinadas, os picos de caulinita desaparecem, em consequência da quebra da sua estrutura cristalina, que se torna amorfa. Entretanto os picos referentes ao

quartzo e a mica permanecem, indicando que as temperaturas de queima utilizadas não foram suficientes para a modificação dessas estruturas.

### 6.1.5 Análise química

A análise química do resíduo de caulim assim como, a da cal e do cimento foi realizada no Laboratório de Caracterização dos Materiais – UFCG.

Na Tabela 3 está representada a composição química do resíduo de caulim calcinado, da cal e do cimento.

**Tabela 3** - Composição química do RC, da cal Carbomil e do cimento Portland-CP-F-32.

<i>Composição Química</i>	<i>Resíduo de caulim</i>	<i>Cal</i>	<i>Cimento</i>
CaO	-	72,32	38,0%
MgO	2,2%	1,69	11,5%
SiO <sub>2</sub>	58,8%	1,64	19,6%
K <sub>2</sub> O	1,6%	0,31	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,0%	0,64	10,3%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2%	0,22	1,1%
SrO	-	-	-
SO <sub>3</sub>	-	-	8,3%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	1,4%
Outros óxidos	< 0,5%	< 0,5%	< 5%
PF	0,8%	23,14	9,7%

Fonte: Autor 2012

Como se verifica o resíduo de caulim compõe-se principalmente de sílica, alumina e outros componentes, caracterizando-se como um típico material reativo e de características pozolânicas, atendendo os requisitos necessários para tal classificação. Os teores de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se encontram maiores do que 70%, atendendo às prescrições da ASTM C618 (ASTM, 2005).

A especificação brasileira NBR-7175 estabelece, como critério de qualidade (pureza da cal), um teor mínimo de 88% de óxidos totais, e segundo este critério, pode-se afirmar que a amostra de cal, aqui analisada, é considerada de elevada pureza, com teor de 100,14%. Segundo a norma brasileira NBR-645319, a cal Carbomil pode ser classificada como cal cálcica, por apresentar porcentagem de CaO, em relação ao óxidos totais, maior que 90%.

Analisando os resultados obtidos na Tabela 3 pode-se observar que o cimento apresenta maiores teores de óxido de cálcio e de dióxido de silício correspondendo a 40,0% e 21,6% respectivamente, os demais óxidos apresentam valor inferior a 5%.

De acordo com os resultados da composição química é possível recomendar a utilização deste cimento, por apresentar grande percentual de óxido de cálcio, para produção de argamassas de assentamento e revestimento, concretos simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento, dentre outros (ABCP, 2005)

#### **6.1.6 Determinação da atividade pozolânica**

A determinação da atividade pozolânica do resíduo de caulim calcinado, bem como o índice de atividade pozolânica, foram determinados seguindo as prescrições das normas NBR 5752 (1992) e NBR 15894-1 (2010) respectivamente.

O Quadro 45 apresenta o proporcionamento conforme NBR 5752 (1992) dos componentes da argamassa utilizada inicialmente para a avaliação da atividade pozolânica.

A composição das argamassas utilizadas para a determinação da atividade pozolânica descrita no Quadro 5, foi calculada seguindo as especificações da NBR 5752 (1992).

**Quadro 4** - Composição das argamassas para o ensaio de atividade pozolânica

Material	Massa (g)
Cimento Portland	202,8
Resíduo de caulim calcinado	120,6
Areia	936,0
Espalhamento (225±5mm)	231,0

#### 6.1.6.1 Resistência a compressão simples (RCS)

No Quadro 5 estão apresentados os resultados da resistência a compressão simples (RCS), das argamassas submetidas a determinação da atividade pozolânica.

**Quadro 5** - Resistência a compressão simples das argamassas submetidas ao ensaio de atividade pozolânica.

Argamassa	RCS (Mpa) 7 dias	RCS (Mpa) 14 dias	RCS (Mpa) 28 dias
(A) Ref.	15,9	15,2	17,3
(B) 800°C	13,5	15,6	16,4

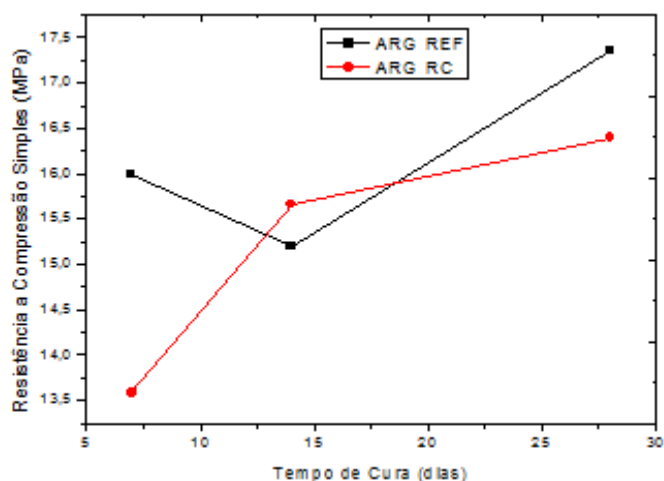
Fonte: Autor 2012

Observa-se que a resistência das argamassas incorporadas com resíduo de caulim evolui dos 7 aos 14 dias, apresentando uma pequena diminuição de 0,73 MPa aos 28 dias de cura. Comparando estes resultados com os da argamassa de referência, observamos que os valores de resistência para 7 e 28 dias de cura é inferior, enquanto que aos 14 dias os valores de resistência apresentam-se iguais para ambas as argamassas.

Os resultados apresentados estão de acordo com os estudos realizados por Barata e Dal Molin (2002), os autores afirmam que, independente do teor de incorporação de metacaulinita, a reação pozolânica alcança o seu pico máximo entre 7 e 14 dias de cura. Os trabalhos de Sabir e Bai (2001) enfatizam que embora a atividade pozolânica continue além dos 28 dias, uma proporção significativa da reação ocorre dentro dos primeiros 14 dias quando a máxima resistência relativa é atingida.



Na Figura 13 pode ser observada a representação gráfica da evolução da resistência a compressão simples (RCS) das argamassas com e sem resíduo de caulim aos 7,14 e 28 dias de cura.



**Figura 13** - Gráfico da RCS das argamassas para o ensaio de atividade pozolânica  
Fonte: Autor 2012

#### 6.1.6.2 Índice de atividade pozolânica

Os resultados encontrados para o ensaio do índice de atividade pozolânica do resíduo de caulim calcinado com o cimento Portland estão apresentados no Quadro 6. É importante ressaltar que o teor de substituição de massa pelo cimento estipulado pela ABNT para este ensaio é de 35%.

**Quadro 6** - Índice de atividade pozolânica do resíduo de caulim calcinado com o cimento aos 7 dias

RCS (MPa)	Média aos 7 dias	NBR 15894 P1(2010)
(A) Ref	15,870	≥105%
(B) 800°C	14,583	

Fonte: Autor 2012

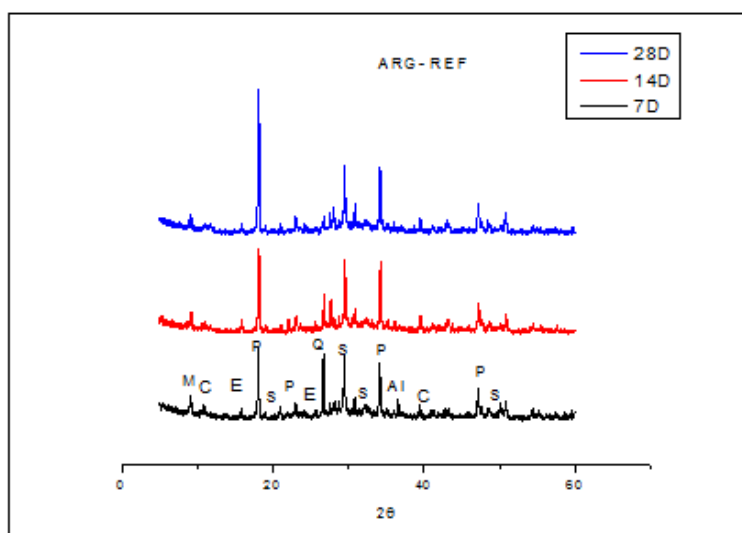
O percentual obtido para este ensaio foi de 91,87%, percentual que se encontra superior quando comparado ao limite inferior para IAP com o cimento aos 28 dias estipulado pela NBR 12653 (ABNT, 1992) que é de 75%. O índice

de desempenho foi determinado pelo quociente das resistências das argamassas de referência e da argamassa com resíduo de caulim calcinado seguindo a NBR 15894-1 (2010).

De acordo com os valores obtidos, verifica-se que o resíduo de caulim apresentou comportamento próximo aos valores considerados para uma pozolana de alta reatividade comparados aos valores apresentados pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010).

#### 6.1.6.2 Difractogramas das argamassas

A Figura 14 apresenta os difratogramas das argamassas aos 7, 14 e 28 dias de cura utilizadas como argamassas de referência para o ensaio da atividade pozolânica.



**Figura 14** - Difractograma das argamassas de referência para o ensaio da atividade pozolânica.

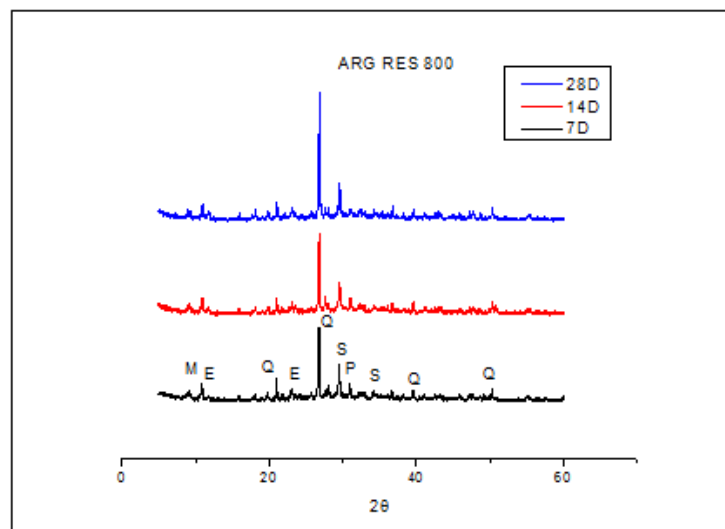
**Legenda:** M-mica P-portlandita Q-quartzo C-caulinita Al-Oxido de alumínio S-silicato de cálcio hidratado E- etringita

Fonte: Autor 2012

Verificou-se em todas as argamassas a presença das seguintes fases cristalinas, etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ) (4,019Å 4,909Å e 3,193Å), potlandita ( $Ca(OH)_2$ ) (4,901Å, 3,118Å, 2,624Å), mica ( $SiO_2$ ) (4,246Å, 3,337Å, 2,454Å), devido a grande presença do agregado miúdo e o silicato de cálcio hidratado (CSH)

(3,652Å e 2,454Å). As fases presentes estão de acordo com a análise química das matérias primas utilizada.

A Figura 15 apresenta o difratograma da argamassa incorporada com resíduo de caulim calcinado a 800°C para a avaliação da atividade pozolânica. Observa-se a presença dos picos característicos dos materiais presentes nas argamassas, a etringita, potlandita e a mica surgem com intensidades relativas. Observa-se a presença CSH, que pode ser justificada pela reação da portlandita com a pozolana resultando em quantidades adicionais CSH.



**Figura 15** - Difratograma das argamassas com RC a 800°C avaliação da atividade pozolânica .

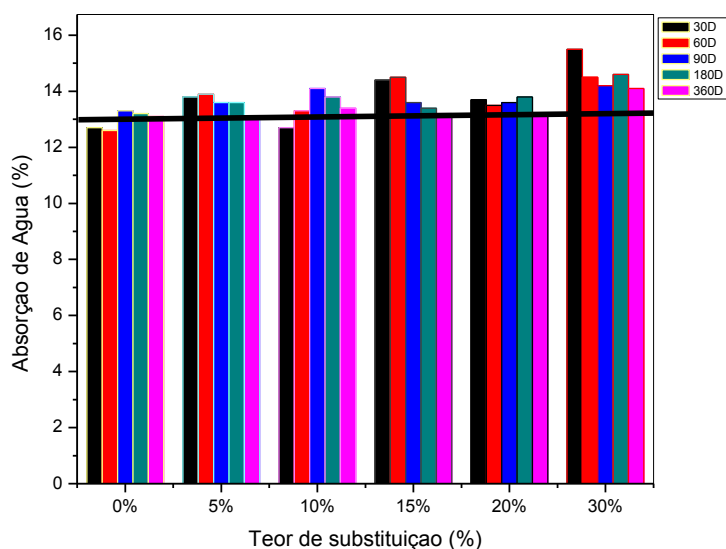
**Legenda:** M-mica P-portlandita Q-quartzo S-silicato de cálcio hidratado E-etringita  
Fonte: Autor 2012

A portlandita observada ainda aos 7 e 14 dias de cura revela que a reação pozolânica é lenta, necessitando de cura por tempo superior para o seu total consumo. O hidróxido de cálcio (potlandita) liberado pela hidratação do cimento, não faz uma significativa contribuição para a resistência e pode ser prejudicial para a durabilidade de argamassas e concretos. Sua redução ou eliminação pela reação com a pozolana pode resultar em muito, maior durabilidade e resistência (SABIR e BAI, 2001).

## 6.2 Avaliação das argamassas com adição do RC para o traço 1:2: 6 sob cura interna

### 6.2.1 Absorção de água

A Figura 16 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção para a argamassa no traço 1:2:6 para os períodos de cura correspondentes a 30,60, 90 ,180 e 360 dias.



**Figura 16** - Representação gráfica do ensaio de absorção de água (AA) para argamassa no traço 1:2:6

Fonte: Autor 2012

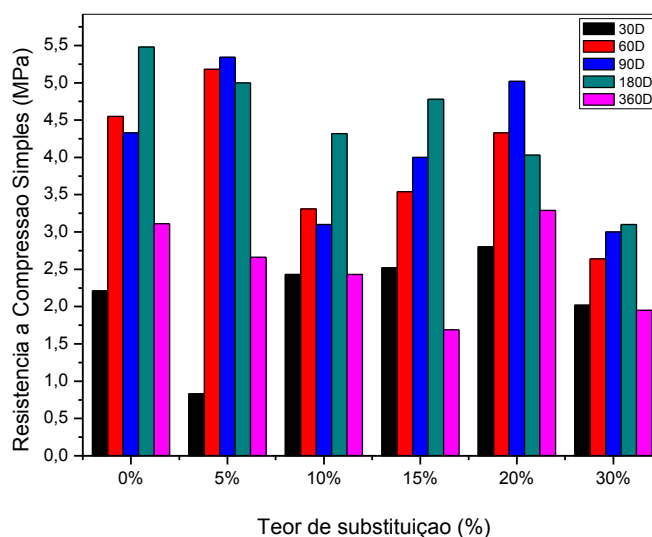
Analisando a Figura 16, observa-se que para o período de cura inicial, aos 30 e 60 dias os teores de substituição de 5%, 15%, 20% e 30% das argamassas com resíduo de caulim, apresentam um aumento do teor de absorção em relação a argamassa de referência. Enquanto que o teor de 10% mantém-se semelhante aos de referência.

Não há uma variação significativa nos teores de absorção das argamassas com incorporação do resíduo de caulim. Os valores apresentados estão em torno de 12% a 15% inferiores aos avaliados por Nóbrega (2007) e Bezerra (2011).

O teor de 30% apresentou resultados de absorção superior aos demais teores de substituição bem como para a argamassa de referência, para todas as idades de cura. Este fato pode está associado ao excesso de resíduo empregado nesta composição dificultando a densificação das partículas.

### 6.2.2 Resistência a compressão simples (RCS)

Na Figura 17 estão apresentados os valores da resistência a compressão simples das argamassas para o traço 1:2:6 com percentuais de substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado para idades de 30, 60, 90, 180 e 360 dias cura em ambiente interno, sendo este no interior do laboratório.



**Figura 17** – Resistência a compressão das argamassas de traço 1:2:6 sob cura interna

Fonte: Autor 2012

De acordo com os resultados apresentados na Figura 16, pode-se observar que os valores de resistência aos 30 dias de cura apresentam-se inferior em relação às idades de 60, 90 e 180 dias. Nestes, apresentam maior ganho os teores de substituição de 5% e 20%. Ainda observa-se que aos 180 dias ocorre um discreto aumento dos valores em relação a 60 e 90 dias podendo estar associado ainda ao desenvolvimento das reações da pozolânicas.

Quanto ao tempo de cura relativo aos 360 dias vê-se que ocorre um decréscimo de resistência considerável quando comparados com as idades anteriores (60, 90 e 180 dias) evidenciando um ganho maior de resistência nas idades iniciais, onde pode haver maior influência da hidratação do ligante. Ainda assim, observa-se que os teores de substituição de 5% e 20% têm suas resistências superiores aos valores observados aos 30 dias de cura.

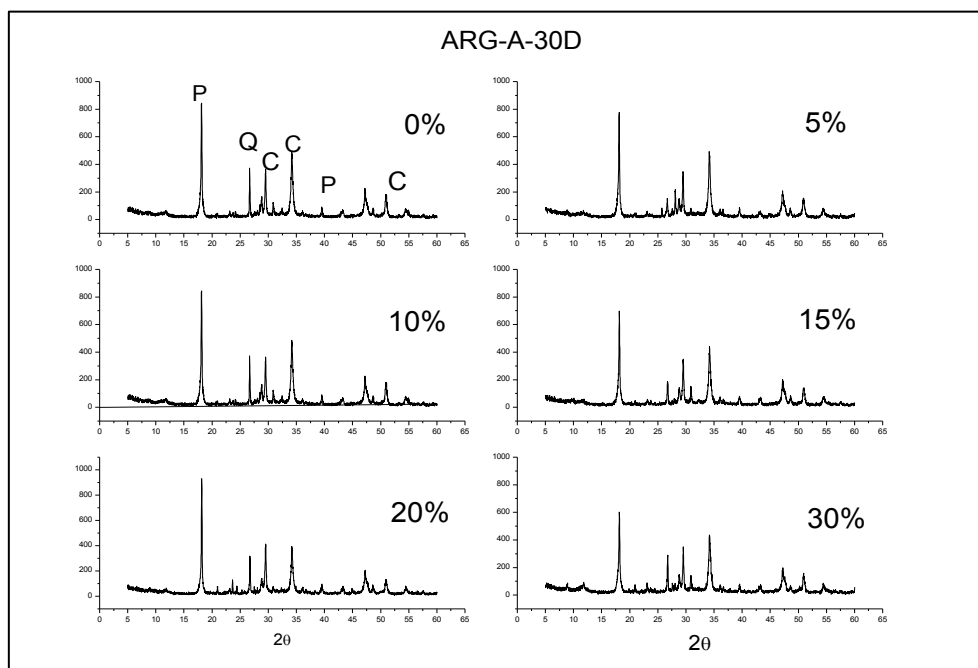
As argamassas com 10%, 15% e 30% de substituição apresentaram valores de resistência inferiores aos de referência, praticamente em todas as idades de cura, porém ainda assim apresentam valores dentro dos especificados pela norma NBR 13281(2001). Os valores de 10% e 20% apresentam valores de resistência de acordo com os requisitos da ASTM C 270/82.

Diante dos valores de resistência apresentados, as argamassas com substituição do cimento pelo resíduo calcinado, podem ser classificadas de acordo com a NBR 13281 (2001) como sendo do Tipo I com valores de resistência mecânica  $\geq 0,1$  e  $\leq 4,0$  (MPa) e Tipo II com  $\geq 4,0$  e  $\leq 8,0$  (MPa) para assentamento e revestimento de paredes e tetos.

### **6.2.3 Análise mineralógica**

A Figura 18 apresenta os difratogramas da argamassa aos 30 dias de cura, nas proporções de 0%, 5%,10%, 15%, 20% e 30% para o traço de argamassa referente a 1:2:6.

De acordo com o difratograma apresentado na Figura 17 é possível observar a presença das seguintes fases mineralógicas para as composição das argamassas: portlandita (P) ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,901Å, 3,118Å, 2,627Å e 1,815Å, a calcita (C) (caracterizada pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å), o quartzo (Q), (caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å).



**Figura 18** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 30 dias de cura

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita . ARG-A - argamassa de traço 1:2:6 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

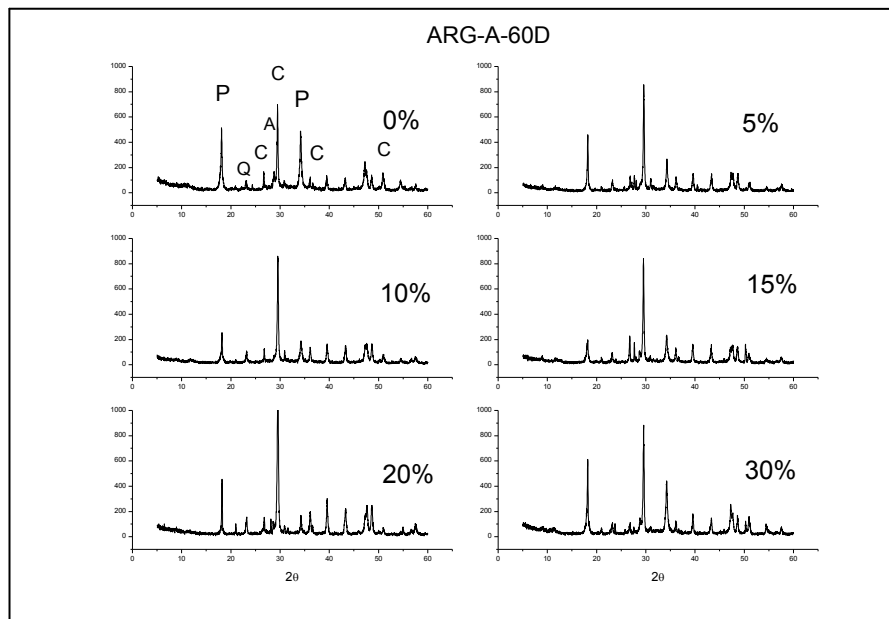
Fonte: Autor 2012

Analisando os difratogramas das argamassas alternativas em função do teor de substituição do aglomerante pelo resíduo de caulim, para o período de cura de 60 dias, observou-se a presença da portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) em todos os teores, porém com significativa redução da intensidade dos picos, confirmando parte do consumo deste componente pela reação da adição mineral.

Em função da presença intensa das fases mineralógicas tanto da portlandita como da calcita nesta idade, a resistência mecânica das argamassas com substituição do cimento pelo resíduo de caulim apresentou valores mais baixos. Este fato pode estar relacionado ao efeito químico da carbonatação, além das reações pozolânicas desenvolverem-se de forma lenta, não tendo ainda um consumo significativo do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pela pozolana.

A Figura 19 apresenta os difratogramas das argamassas com os teores de substituição de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 30% com substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado (metacaulinita). Na Figura observa-se a

presença das seguintes fases mineralógicas, a portlandita (P), a calcita (C) e o quartzo.



**Figura 19** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 60 dias de cura

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita A – albita. ARG-A - argamassa de traço 1:2:6 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Para os teores de substituição de 5%, 10%, 15%, 20% e 30% pode-se observar difratogramas com picos com intensidades reduzidas em relação ao de referência, entretanto, os picos característicos da calcita e os de intensidades menores referentes a portlandita mostram-se presentes.

Para a composição com teor de substituição de 30%, observa-se pico intenso da portlandita, o que pode estar relacionado a taxa reduzida da reação pozolânica para a argamassa com este teor.

Nos estudos realizados por Farias Filho (2000) e Coimbra (2002) observaram melhoras na resistência a compressão simples de argamassas quando da utilização de pozolanas em substituição parcial do cimento, sendo possível substituir o cimento em teores de até 40%.

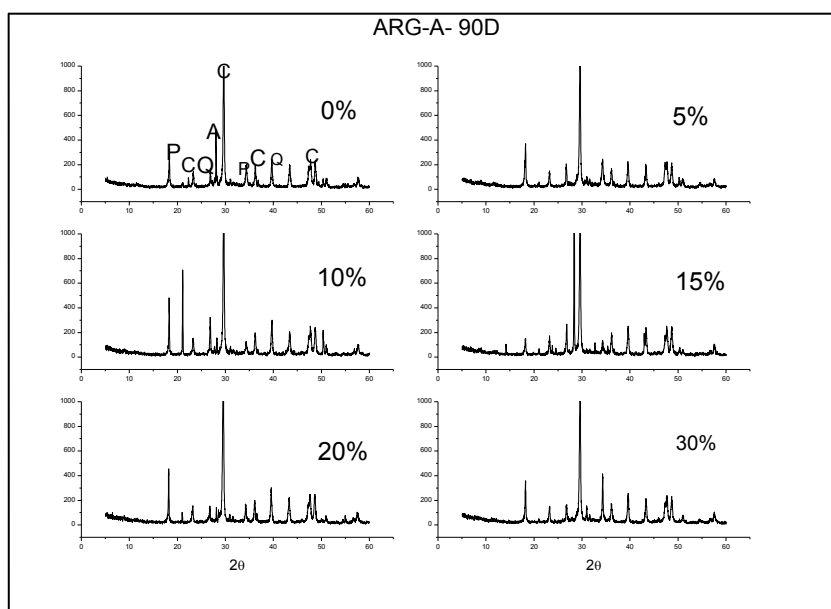
A incorporação do resíduo de caulim na proporção de 30% em substituição ao cimento não conduz a melhoras na resistência mecânica como verificado pelos autores citados. Porém as classificam como sendo



argamassas do tipo 1 para assentamento e revestimento, segundo a NBR 13281 (2001) .

A Figura 20 apresenta os difratogramas das argamassas com 90 dias de cura. Analisando as argamassas alternativas em função do teor de substituição de parte do aglomerante pelo resíduo de caulim (RC) calcinado, observa-se para todas as composições picos intensos referentes a calcita, ou seja, ao carbonato de cálcio em virtude da carbonatação. Ainda observa-se a presença da portlandita (P), da albita (A) e do quartzo (Q).

Para a cura aos 90 dias, a presença intensa dos picos relativos a calcita para os teores de 10%, 15% e 30% de substituição justifica o baixo desempenho mecânico nesta idade, enfatizando o efeito da carbonatação para esses teores.



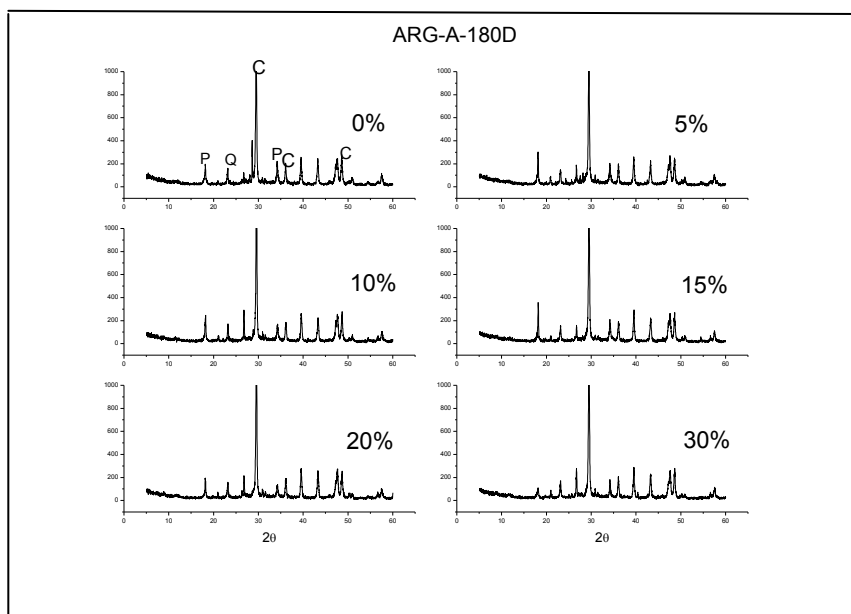
**Figura 20** - Difratograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 90 dias de cura

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C - calcita A - albita ARG-A - argamassa de traço 1:2:6 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Na Figura 21 estão representados os difratogramas das argamassas com 180 dias de cura. Nesta Figura é possível observar além das fases presentes como portlandita (P), a calcita (C), a albita (A) e o quartzo (Q) a diminuição do pico referente a portlandita, e surgimento da calcita como fase

decorrente das reações da cal com  $\text{CO}_2$  do ambiente, favorecendo a carbonatação. Acredita-se que com o avanço da cura a intensidade dos picos referentes a portlandita venha a diminuir ainda mais, em decorrência da reação pozolânica e da reação com o  $\text{CO}_2$ .



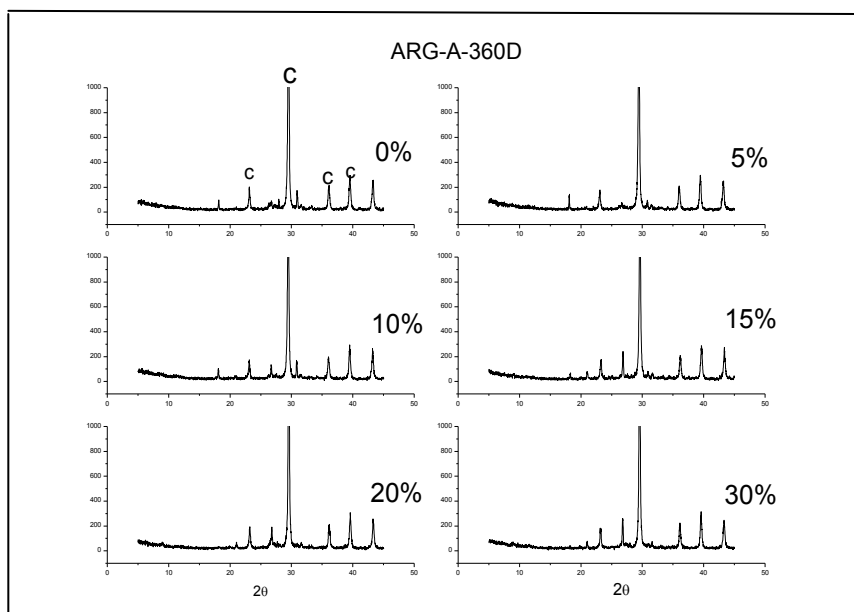
**Figura 21** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 180 dias de cura

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C - calcita. ARG-A - argamassa de traço 1:2:6 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Na Figura 22 estão representados os difratogramas das argamassas com 360 dias de cura. Avaliando os picos é possível observar nesta idade apenas os picos referentes a fase mineralógica correspondente a calcita (C), como era de se esperar todo o hidróxido de cálcio presente foi consumido ao longo do tempo de cura. Surgindo a calcita, resultado da carbonatação em função da presença do  $\text{CO}_2$  e pela reação pozolânica.

A resistência mecânica das argamassas para esta idade apresentaram-se com valores inferiores em relação as idades anteriores (60, 90 e 180 dias) em virtude do aumento do carbonato de cálcio, ou seja, as reações de carbonatação são indesejáveis para o potencial mecânico das argamassas, conforme observado na Figura 17.



**Figura 22** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 360 dias de cura

**Legenda:** C – calcita. ARG-A - argamassa de traço 1:2:6 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Analisando o difratograma da Figura 21, pode-se observar que há uma redução significativa dos picos que correspondem a portlandita (P) e em consequência a intensificação dos picos referentes a calcita (C) cujas distâncias interplanares já foram citadas anteriormente.

#### 6.2.4 Análises térmicas das argamassas com incorporação do RC calcinado

As análises térmicas complementares (DTA e ATG) foram realizadas para verificar as fases em que ocorrem as transformações endotérmicas e exotérmicas das argamassas convencionais e com percentuais de resíduo de caulim, curadas por períodos de 30, 60, 90, 180 e 360 dias, conforme mostram as Figuras A, B, C, D e E para o traço 1:2:6 que se encontram no Apêndice A.

Analisando as curvas das Figuras 22 (A, B, C, D e E) referentes a análise térmica diferencial, para o traço,1:2:6, observou-se que todas as argamassas com e sem incorporação do resíduo de caulim calcinado, apresentaram picos endotérmicos a uma faixa de temperatura de 120°C a 171°C, referente à presença de água livre, água adsorvida e/ou água coordenada aos cátions, em todos os períodos de cura.

Observou-se para todas as idades de cura picos endotérmicos variando de 459°C a 471°C referente à decomposição do hidróxido de cálcio, picos a 820°C, relacionado a presença do carbonato de cálcio, análise também observada na difração de raios X.

A Tabela 4 apresenta as perdas de massas das argamassas com e sem substituição do resíduo de caulim pelo cimento, curadas a 30, 60, 90, 180 e 360 dias. Os gráficos referentes a esta análise estão apresentados no Apêndice A.

**Tabela 4** - Perda de massa (%) das argamassas com e sem substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado

<i>Teor de substituição</i>	<i>30 dias</i>	<i>60 dias</i>	<i>90 dias</i>	<i>180 dias</i>	<i>360 dias</i>
0%	29,9	28,8	33,0	34,1	39,7
5%	25,1	26,2	29,9	33,0	38,2
10%	25,4	26,3	29,6	34,1	38,0
15%	25,5	28,2	34,1	33,2	37,6
20%	25,4	32,3	31,0	33,4	37,8
30%	25,3	29,5	31,8	33,6	37,3

Fonte Autor 2012

As perdas observadas na Tabela 6 referem-se a decomposição do hidróxido de cálcio, por volta de 471°C e carbonato de cálcio, por volta de 760°C além das águas adsorvidas e combinadas nas temperaturas acima de 100°C.

Observa-se ainda que ao longo do tempo de cura a intensidade dos picos referentes a potlandita apresenta uma tendência decrescente, enquanto

que os picos referentes ao carbonato de cálcio na faixa de temperatura entre 700°C e 800°C sofre proporcional aumento, este fato pode estar relacionado a dois fatores: a exposição das argamassas ao ar do ambiente havendo a carbonatação das mesmas pela reação com o CO<sub>2</sub> e também pode estar ocorrendo o consumo da portlandita pela reação pozolânica.

### 6.2.5 Resistência a tração por compressão diametral (RTCD)

A resistência tração por compressão diametral foi avaliada para as idades de 30, 60, 90, 180 e 360 dias e calculada de acordo com a NBR 7222 (2010).

A Tabela 5 apresenta os resultados relativos à resistência a tração por compressão diametral das argamassas de traço 1:2:6.

**Tabela 5** - Resistência a tração por compressão diametral (MPa) para o traço de argamassa 1:2:6

<i>Composição Traço 1:2:6</i>	<i>30 dias</i>	<i>60 dias</i>	<i>90 dias</i>	<i>180 dias</i>	<i>360 dias</i>
0%	0,29	0,45	0,45	0,45	0,81
5%	0,40	0,46	0,64	0,54	0,67
10%	0,27	0,38	0,35	0,38	0,61
15%	0,34	0,42	0,44	0,43	0,46
20%	0,40	0,47	0,50	0,50	0,80
30%	0,23	0,28	0,28	0,28	0,51

Fonte Autor 2012

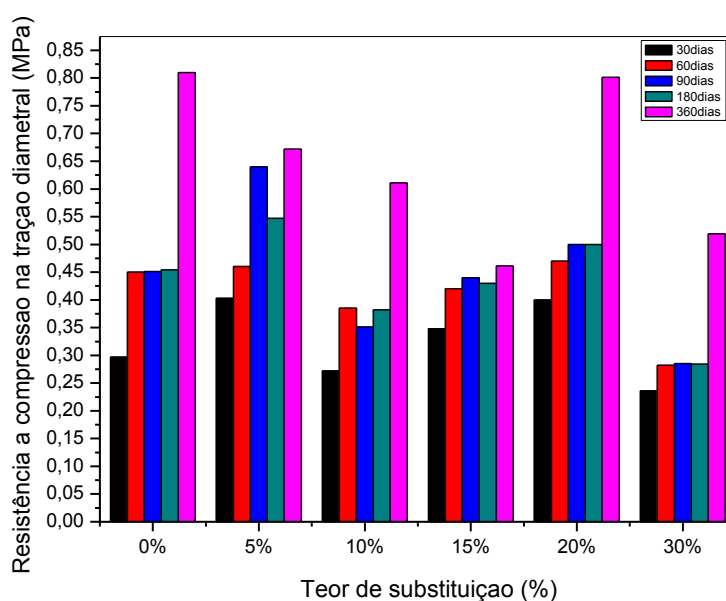
De acordo com a Tabela 5 e a Figura 22 estão representados os resultados obtidos no ensaio de resistência a tração por compressão diametral, verifica-se um aumento mais significativo da resistência para as composições com teores de substituição de 5% e 20%, resultados também observados para a resistência a compressão simples.

Os resultados das composições 10%, 15% e 30% apresentam-se discrepantes, com relação aos valores de referência, porém nota-se que há um aumento da resistência a medida que o tempo de cura avança.

Ambos os resultados de resistência a compressão simples e da compressão na tração diametral evidenciam que para o teor de substituição de 30% os valores de resistência tendem a diminuir em relação aos valores de referência.

Esta ocorrência pode estar relacionada a quantidade excedente de resíduo na argamassa, já que este percentual em todas as idades de cura apresentou-se com uma maior fragilidade na ruptura, resultando em valores indesejáveis de resistência. Estes resultados encontram-se inferiores avaliados por Farias Filho (2010).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5 foram elaborados os gráficos de resistência a tração por compressão diametral conforme mostra a Figura 23.



**Figura 23** – Resistência a tração por compressão diametral das argamassas de traço 1:2:6

Fonte: Autor 2012

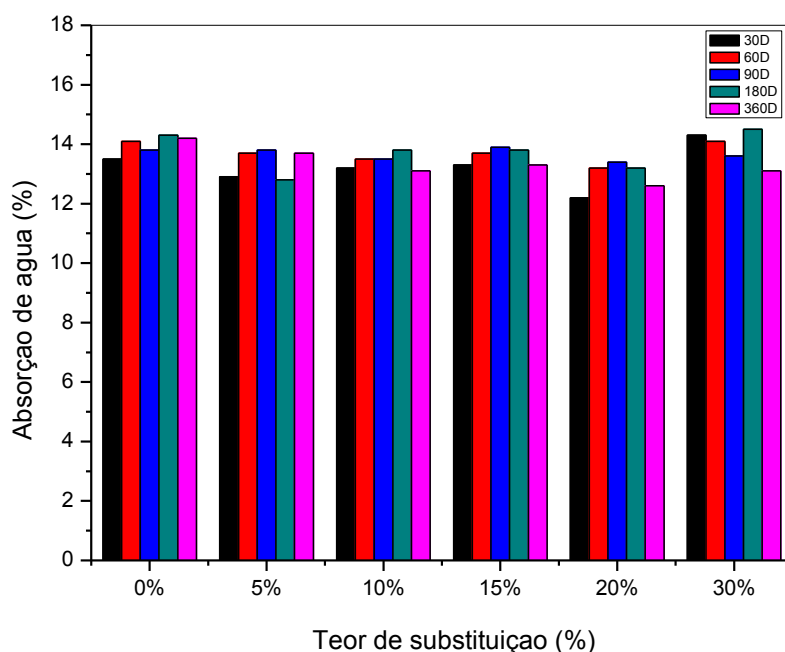
Na Figura 23 pode-se observar o desenvolvimento da resistência a tração na compressão diametral das argamassas para o traço 1:2:6, ao longo das idades de cura. Analisando as curvas apresentadas pode-se constatar a evolução da resistência com o avançar do tempo de cura, sendo esta, mais

pronunciada para as composições de 5% e 20%. Enquanto que para o teor de 30% para todas as idades, a resistência foi a menor encontrada. De acordo com Barbosa e Hanai (2006), a resistência a tração por compressão diametral (tração indireta) corresponde em torno de 10% da resistência a compressão. Estes resultados podem ser observados para os valores de resistência apresentados pelas argamassas convencionais e alternativas.

### 6.3 Avaliação das argamassas com adição do RC para o traço 1:2:8 para cura interna

#### 6.3.1 Absorção de água (AA)

A Figura 24 mostra o comportamento frente à absorção por imersão das argamassas com substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado sob cura interna para o traço 1:2:8.



**Figura 24** - Comportamento das argamassas no ensaio de absorção

Fonte: Autor 2012

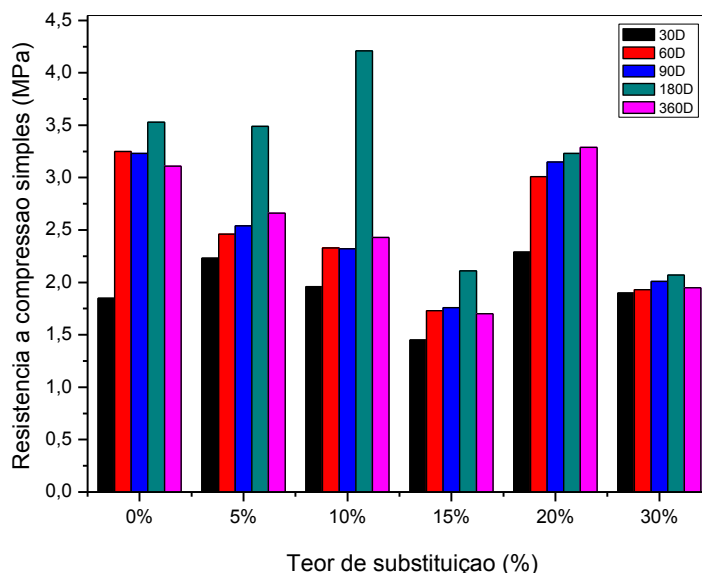
De acordo com os resultados da Figura 23 pode-se observar que em relação a argamassa de referência os teores de substituição de 5%,10%,15% e

20% apresentaram-se com valores inferiores para todas as idades de cura o que pode estar associado ao efeito da densificação das partículas finas tornando as argamassas menos porosas.

No entanto, comparando a absorção do traço 1:2:6 com a do traço 1:2:8 verifica-se que este último apresenta valores sutilmente mais elevados, que podem ser justificados pela quantidade maior de agregado graúdo presente, acarretando em maiores quantidades de vazios. Fato este, refletido no ensaio de resistência a compressão onde estas argamassas, apresentaram-se frágeis no momento da sua ruptura. Observa – se ainda valores de absorção mais elevados para o teor de 30% de substituição. Comportamento semelhante foi encontrado por Sousa (2008).

### 6.3.2 Resistência a compressão simples (RCS)

Na Figura 25 estão representados os valores de resistência a compressão das argamassas com substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado, sob os teores de 5%, 10%, 20% e 30% além do valor de referência onde não há substituição 0%, para o traço 1:2:8 sob cura interna.



**Figura 25** - Resistência a compressão das argamassas de traço 1:2:8

Fonte: Autor 2012



De acordo com a representação gráfica da resistência a compressão na Figura 24, pode – se observar que os teores de substituição de 5% e 10% mantêm-se com valores de resistência mecânica semelhante, praticamente para todas as idades.

Para o teor de 5% aos 30 dias os valores obtidos foram superiores aos de referência, já para a idade de 180 dias esses valores foram similares. Para o teor de substituição de 10% observa-se para este traço um valor de resistência mecânica inferior ao encontrado para o traço 1:2:6 e semelhante para os encontrados por Souza (2008) quando avaliados nas idades iniciais.

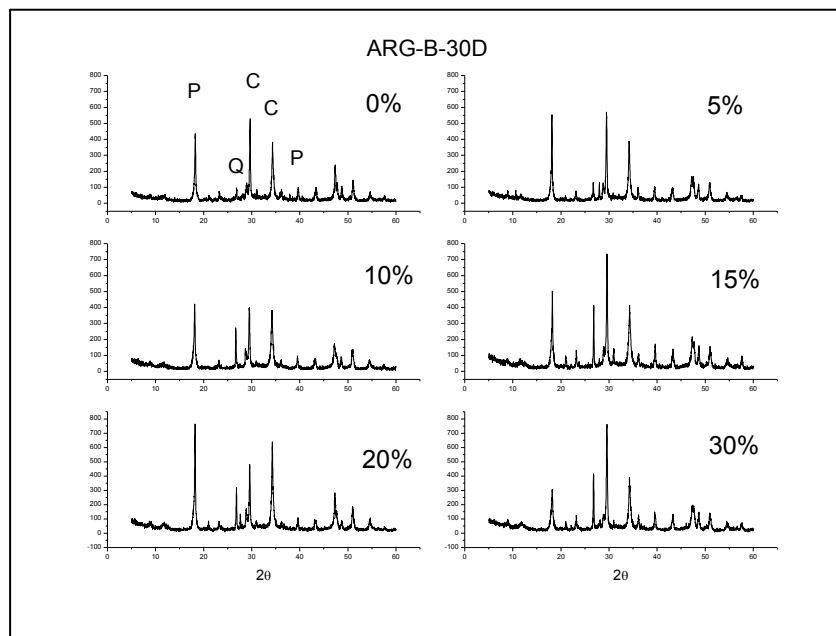
Apresenta-se ainda uma diminuição significativa dos valores de resistência em comparação ao de referência para o teor de 15% em todas as idades. Fato este, também observado para o teor de 30% o que pode estar associado a adição de teores de resíduo insuficiente e/ou excessivos para o caso de 30%. O que vai de encontro aos resultados avaliados por Menezes (2009).

Ao analisar o teor de 20% nota-se uma elevação da sua resistência para todas as idades em relação as demais o que pode estar associado a quantidade de substituto mais significativa para esta composição, teores acima desta quantidade apresentam-se ineficientes tanto para este traço como para o traço 1:2:6. Entretanto estudos feitos por Farias Filho (2000) observaram melhoras na resistência a compressão simples de argamassas quando da utilização de pozolanas em substituição parcial do cimento, sendo possível substituir o cimento em teores de até 40%.

Comparando de forma geral o traço 1:2:8 com o traço 1:2:6 o primeiro se mostrou durante a ruptura e até mesmo no seu aspecto físico como um traço de pouca resistência, fato este que pode estar relacionado a maior quantidade de agregado graúdo, que possibilita um maior índice de vazios, esta observação também foi feita por Souza (2008).

### 6.3.3 Análise mineralógica

A Figura 26 apresenta os difratogramas das argamassas para o traço 1:2:8, submetidas a cura interna.



**Figura 26** – Difratograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 30 dias de cura

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-B - argamassa de traço 1:2:8 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

De acordo com a Figura 25, como era de se esperar os picos aparecem bem definidos e muito intensos em função do período de cura ser pequeno para que ocorram as reações benéficas em função da adição do resíduo.

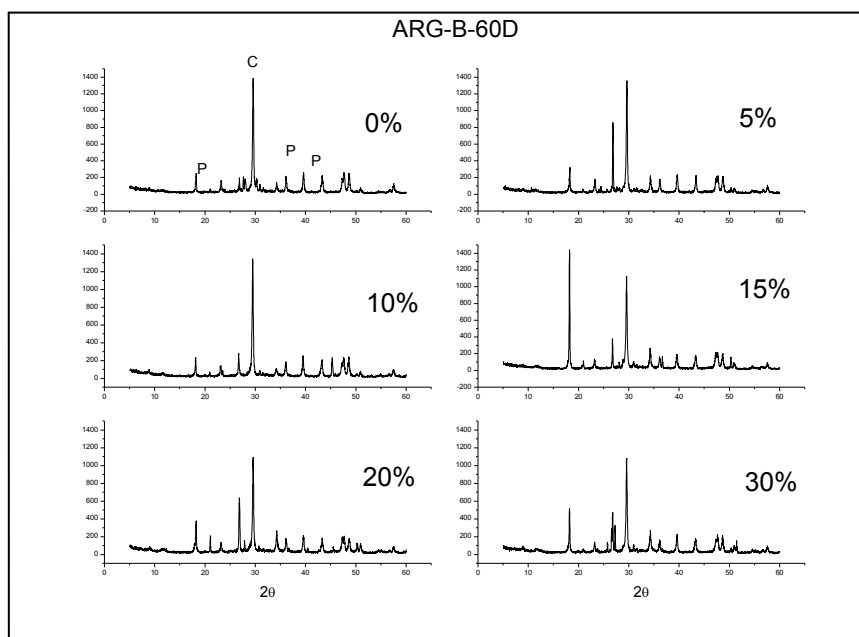
As fases mineralógicas presentes para esta argamassas, aos 30 dias de cura, são a portlandita (P) ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) caracterizadas pelas distâncias interplanares de 4,901Å, 3,118Å, 2,627Å e 1,815Å, a calcita (C) (caracterizada pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å e o quartzo (Q), (caracterizado pela distância interplanar de 3,34 Å).

Os picos relativos aos C-S-H não foram observados em função da sua baixa cristalinidade, entretanto também está presente devido as reações de hidratação do cimento e da cal presentes na argamassa esta observação

também foi feita por Menezes (2009). De acordo com Taylor (1997) apud Rocha (2013) os produtos da hidratação formados nas reações pozolânicas são os silicatos de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado e o sílico-aluminato de cálcio hidratado.

A Figura 27 apresenta os difratogramas das argamassas submetidas a cura de 60 dias.

A diminuição das intensidades dos picos referentes a portlandita, para esta idade é evidente para os teores de 5%, 10% e 20%. Com exceção de 15% e 30% que ainda apresenta pico intenso referente ao  $\text{Ca(OH)}_2$ . Neste caso, as reações se processaram mais lentamente em comparação com os demais teores.

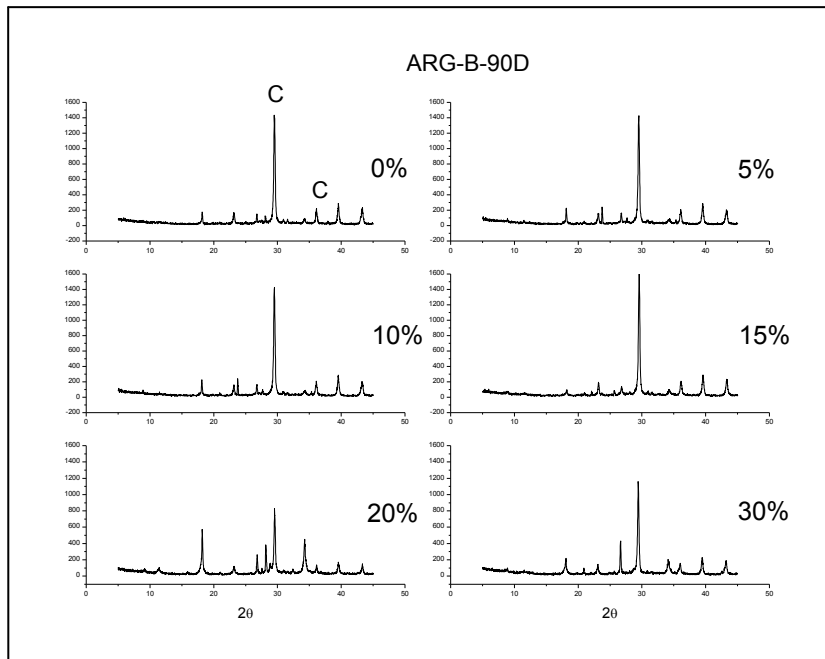


**Figura 27** – Difratograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 60 dias de cura

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-B - argamassa de traço 1:2:8 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Na Figura 28 estão representados os difratogramas das argamassas submetidas ao tempo de cura de 90 dias.



**Figura 28** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 90 dias de cura

**Legenda:** C – calcita. ARG-B - argamassa de traço 1:2:8 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

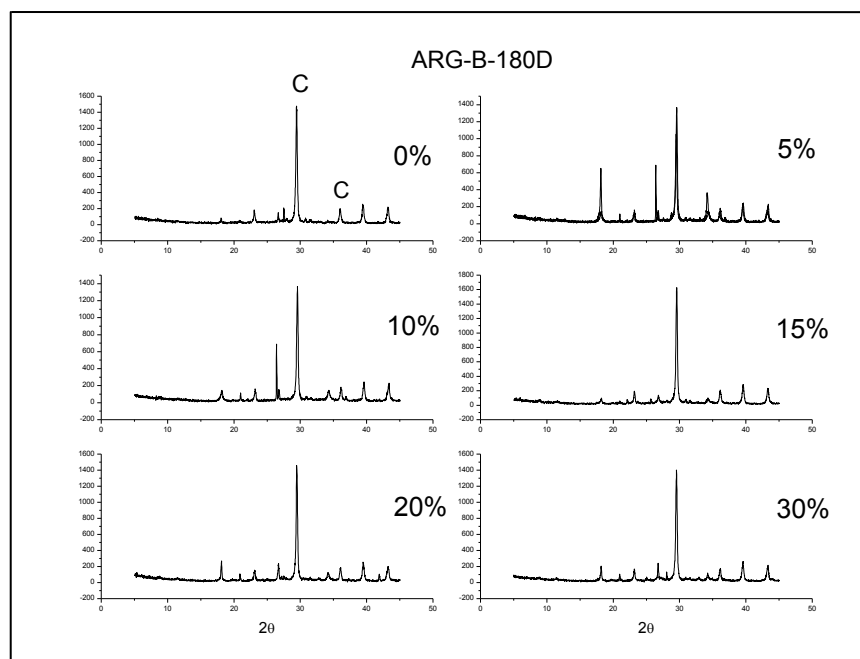
Fonte: Autor 2012

Na Figura 28 podemos observar praticamente para todos os teores de substituição a diminuição significativa dos picos referentes a portlandita (caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,901Å, 3,118Å, 2,627Å) e apenas a permanência e intensificação dos picos referentes a calcita (C) (caracterizada pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å).

A medida que o tempo de cura avança a tendência é o surgimento da fase mineralógica da calcita em virtude das reações de carbonatação devido a presença do dióxido de carbono do ambiente.

Apenas para a composição com 20% de substituição é observada a presença de pico intenso referente a portlandita e demais fases. Este poderá justificar o seu melhor desempenho mecânico para esta idade, já que o teor de carbonatos para esta composição não afeta de forma significativa, apresentando valores de resistência semelhantes aos da argamassa de referência.

A Figura 29 apresenta os difratogramas das argamassas avaliadas aos 180 dias de cura.



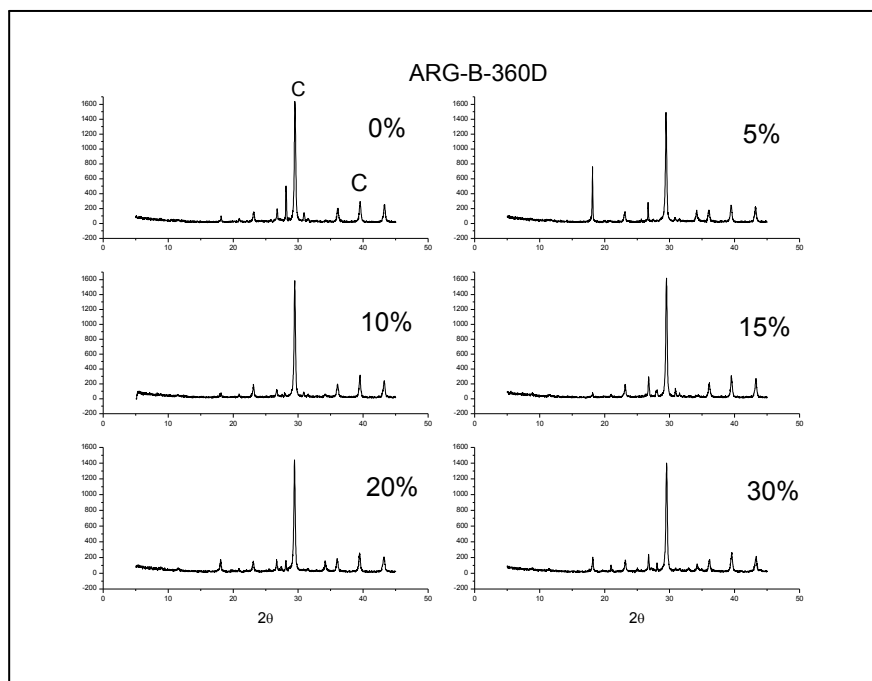
**Figura 29** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 180 dias de cura

**Legenda:** C – calcita. ARG-B - argamassa de traço 1:2:8 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado

Fonte: Autor 2012

Os difratogramas apresentados na Figura 28 evidenciam em função do tempo de cura a diminuição das intensidades dos picos referentes a potlandita e apresentam picos referentes a presença predominante da calcita para os teores de 10%, 15%, 20% e 30%, fase esta, que surge em detrimento das reações de carbonatação e que podem interferir nas resistências mecânicas das argamassas.

A Figura 30 apresenta os difratogramas das argamassas referentes a 360 dias de cura.



**Figura 30** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:8 aos 360 dias de cura

**Legenda:** C – calcita. **ARG-B** - argamassa de traço 1:2:8 - 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado

Fonte: Autor 2012

Avaliando a Figura 30 percebe-se que para esta idade os picos característicos da portlandita só aparecem para o teor de 5%, indicando a presença da cal livre para reagir tanto com o dióxido de carbono tanto quanto com a pozolana adicionada nas argamassas.

Acredita-se que as reações que envolvem a pozolana nesta idade já tenham ocorrido em função do teor de substituição, porém segundo Siddique e Klaus (2009), as reações pozolânicas podem se prolongar por idades posteriores a 360 dias. Entretanto as reações que sucedem para esta a partir desta idade possivelmente estarão relacionadas ao hidróxido de cálcio livre, que conseqüentemente exposto ao  $\text{CO}_2$  irão apresentar compostos carbonatados.

Nos demais teores de substituição apenas os picos referentes a calcita se sobressaem indicando que o hidróxido de cálcio reagiu com a pozolana. É importante ressaltar, que em função da quantidade de cal contida no traço, essa proporção, além de proporcionar a reação pozolânica, favoreceu por meio

do hidróxido de cálcio livre a carbonatação, reação esta, que desfavorece o ganho de resistência.

#### **6.3.4 Análise térmica das argamassas com incorporação do RC calcinado para o traço 1:2:8**

As Figuras A, B, C, D e E apresentadas no apêndice **B** referem-se as análises térmicas diferencial e gravimétrica para o traço 1:2:8 nas idades de 30, 60, 90, 180 e 360 dias de cura.

Nas Figuras A, B, C, D e E observou-se que todos os corpos-de-prova das argamassas com e sem incorporação do resíduo de caulim calcinado apresentaram picos endotérmicos na temperatura de 120°C, aproximadamente. Estes foram referentes à presença de água livre, isto é, a água que está como fase líquida preenchendo os capilares da argamassa. Segundo Souza Santos (1989) este pico endotérmico é tanto mais intenso quanto mais água houver e ocorre, geralmente, a uma temperatura máxima de 140°C.

Observou-se pico um endotérmico na temperatura de aproximadamente 525°C, relacionado à presença do hidróxido de cálcio, em todos os corpos-de-prova das argamassas convencionais e alternativas estudadas e nos diferentes tempos de cura.

Observa-se a uma temperatura de 780°C, pico endotérmico relacionado a presença do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), este tem suas intensidades variadas em função do tempo de cura e exposição ao  $\text{CO}_2$ .

Quanto as curvas referentes a perda de massa, verificou-se que houve uma variação de massa para todos os tempos de cura, estas podem ser melhor observadas na Tabela 6.

A Tabela 6 apresenta as perdas de massas das argamassas com e sem substituição do resíduo de caulim pelo cimento, curadas a 30, 60, 90, 180 e 360 dias. Os gráficos referentes a esta análise estão apresentados no Apêndice B.

**Tabela 6** - Perda de massa (%) das argamassas com e sem substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado

<i>Teor de substituição</i>	<i>30 dias</i>	<i>60 dias</i>	<i>90 dias</i>	<i>180 dias</i>	<i>360 dias</i>
0%	32,3	32,6	35,5	35,4	35,6
5%	36,2	30,9	35,0	34,0	33,9
10%	29,9	30,6	35,1	34,9	34,5
15%	28,6	30,6	35,2	35,4	35,1
20%	27,1	29,7	33,5	34,9	34,9
30%	29,7	28,7	31,4	31,2	31,2

Fonte Autor 2012

As perdas observadas são referentes a decomposição do hidróxido de cálcio, por volta de 459°C e carbonato de cálcio, por volta de 756°C além das águas adsorvidas e combinadas nas temperaturas acima de 100°C.

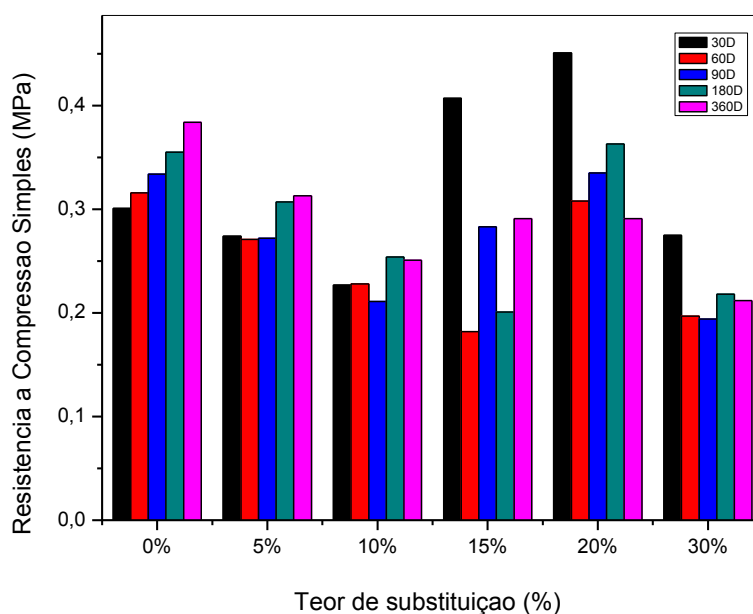
### **6.3.5 Resistência a tração por compressão diametral (RTCD)**

A Figura 31 apresenta os valores de resistência a tração por compressão diametral para as argamassas no traço 1:2:8 sob cura em ambiente interno por 30, 60, 90, 180 e 360 dias.

De acordo com os valores de resistência apresentados na Figura 30 pode-se observar que há um decréscimo da resistência para os teores de 5%, 10%, 15% e 30% em relação a argamassa de referência (a sem substituição do cimento pelo resíduo (0%)), praticamente para todas as idades de cura.

Em contrapartida, o teor de 20% de substituição se sobressai em relação às demais composições, apresentando valores de resistência superiores. Fato este, também observado para a resistência a compressão simples, o que demonstra que este teor de substituição poderá ser adequado para a utilização em argamassas nas proporções que este traço apresenta.





**Figura 31** – Resistência a tração por compressão diametral das argamassas de traço 1:2:8

Fonte: Autor 2012

Comparando com os valores de resistência a tração por compressão diametral obtidos com os do traço 1:2:6, podemos observar que este, demonstra comportamento mecânico superior aos das argamassas de traço 1:2:8.

## 7. Envelhecimento Acelerado

### 7.1 Resistência a compressão das argamassas submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado para o traço 1:2:6

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos para o ensaio de resistência a compressão simples das argamassas submetidas aos ciclos de molhagem e secagem, referentes ao envelhecimento acelerado das argamassas de composição 1:2:6.

**Tabela 7** - RCS (MPa) das argamassas de traço 1:2:6 submetidas ao ensaio de envelhecimento

<i>Teor de substituição</i>	<i>10 ciclos</i>	<i>20 ciclos</i>	<i>30 ciclos</i>	<i>40 ciclos</i>	<i>50 ciclos</i>	<i>D.P</i>	<i>C.V</i>
0%	3,5	5,5	5,5	5,7	5,7	0,84	16,2%
5%	5,6	5,5	5,3	5,5	5,5	0,09	1,6%
10%	5,0	5,4	5,4	5,4	5,2	0,16	3,0%
15%	4,4	4,8	4,6	4,7	4,1	0,24	4,4%
20%	4,3	4,4	4,5	4,8	4,6	0,17	3,7%
30%	3,3	4,0	4,2	4,5	3,7	0,41	10,4%

Fonte: Autor 2012

Diante dos resultados observados, pode-se avaliar que aos 10 ciclos as resistências apresentaram-se superiores aos da argamassa de referência com exceção da composição a 30%, onde houve uma pequena diminuição. Esse aumento de resistência pode ser atribuído as reações de hidratação do cimento bem como da cal na formação dos compostos a base de silicatos que são formados nas idades iniciais.

Para a ciclagem das argamassas aos 20 e 30 ciclos observa-se que para todos os teores de substituição de ambos os ciclos, a resistência mecânica diminui em relação ao valor de referência. Apenas para o teor de 5% para 20 ciclos é que atinge valor igual ao de referencia.

Aos 40 e 50 ciclo observa-se para as composições de 5% e 10% pequenas alterações decrescentes de resistência em relação aos valores de referência, enquanto que aos 30 ciclos para as mesmas composições observa-se que apresentam valores superiores aos de referência.

Para todos os teores de substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado o desvio padrão (D.P) calculado apresenta-se inferior ao de referência, apresentando desta forma, uma homogeneidade das amostras.

Tendo como parâmetro avaliativo do desvio padrão, o coeficiente de variação (C.V), os valores apresentados para todas as argamassas encontram-se inferior a 20%. Estatisticamente, coeficientes de variação abaixo de 20% determinam o grau de homogeneidade das análises. Portanto a medida de

dispersão relativa (coeficiente de variação) prevalece sobre a medida de dispersão absoluta (desvio padrão).

Com o processo de aceleração do envelhecimento, pode-se perceber que a presença do resíduo de caulim calcinado na composição do traço de argamassa 1:2:6 proporcionou valores de resistência inferiores aos de referência, ainda assim, estes resultados mecânicos atendem as especificações para argamassas de acordo com a NBR 13281.

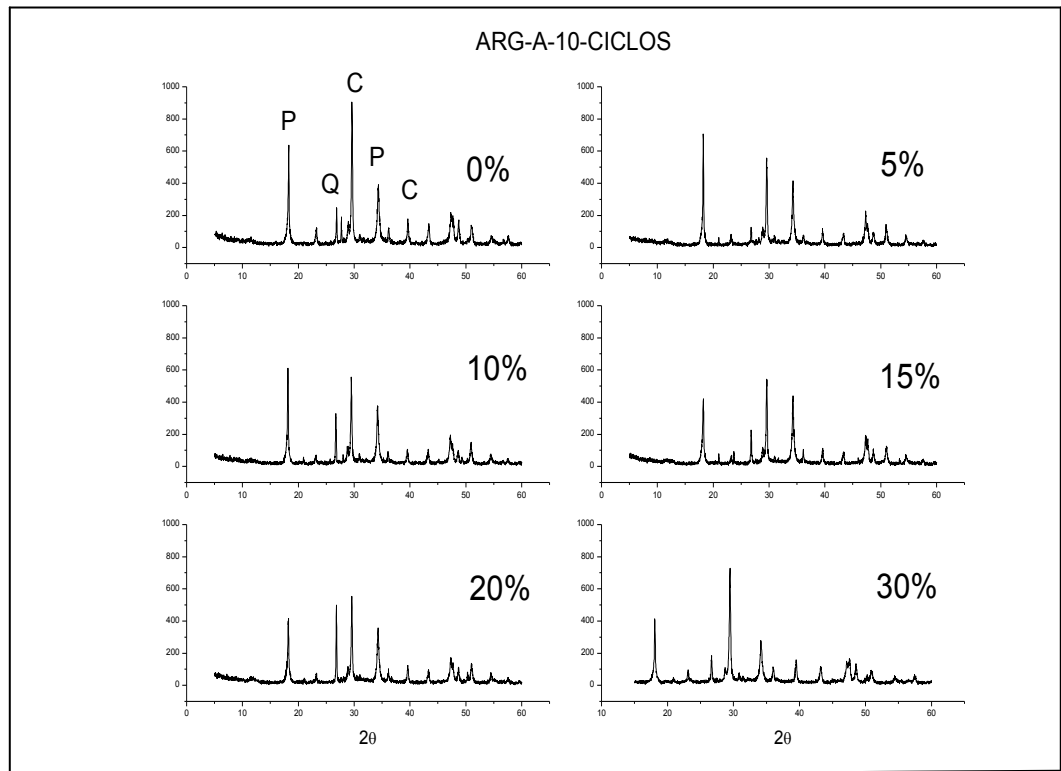
O processo de ciclagem (molhagem e secagem) com temperatura controlada em sistemas pozolânicos tende a produzir neossilicatos mais estáveis, enquanto nos sistemas com cura natural os neossilicatos apresentam certa instabilidade, essa observação foi realizada em estudos feitos por Kapel, Neves e Ferreira (1989). Dessa forma, pode-se explicar o comportamento mecânico das argamassas com e sem substituição do cimento pela pozolana.

#### **7.1.1 Difração de raios X das argamassas submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado para o Traço 1:2:6**

A Figura 32 apresenta os difratogramas das argamassas após 10 ciclos de molhagem e secagem aos 30 dias de cura submersa.

O silicato de cálcio hidratado C-S-H não pode ser observado em função da sua baixa cristalinidade normalmente poderia ser encontrado nas distâncias interplanares correspondentes a 3,238Å e 2,453Å. A fase da calcita (C) pode também ser observada.

Como as reações do envelhecimento ocorreram sob temperatura controlada, é natural que essas reações sejam conduzidas de maneira aceleradas, o que pode ser observado nos difratogramas picos ainda intensos referentes aos compostos anteriormente mencionados, indicando que os valores de resistências mais elevados neste ciclo podem ser consequência da formação de compostos com propriedades quimicamente aglutinantes.



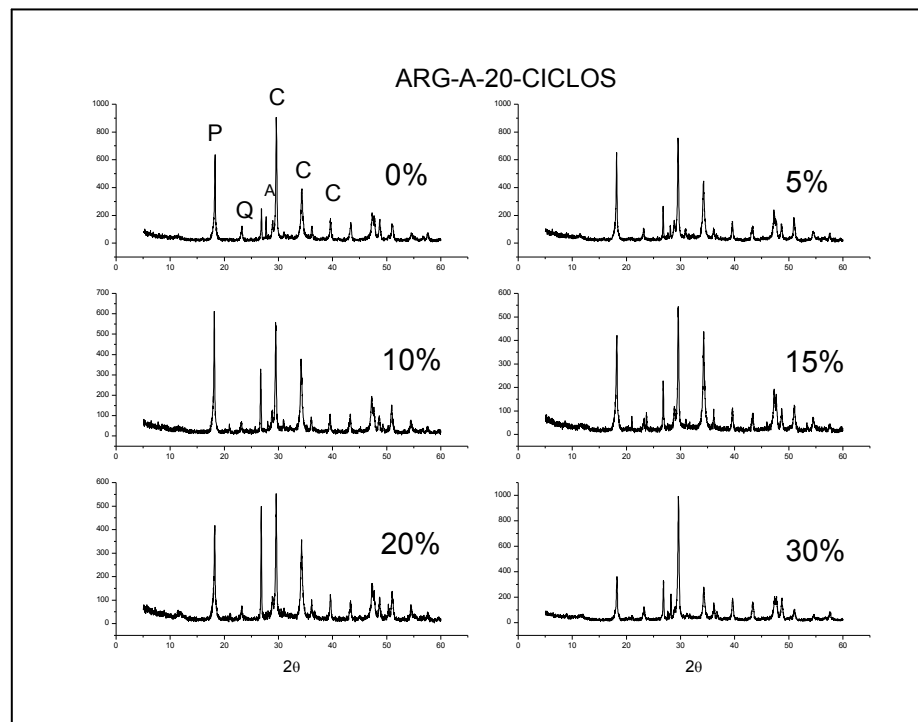
**Figura 32 - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 10 ciclos**

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-A - argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Na Figura 32 estão representados os difratogramas das argamassas com resíduo de caulim calcinado (RC) submetido a 20 ciclos de molhagem e secagem com 60 dias de cura submersa.

Ao avaliar o difratograma das argamassas submetidas a 20 ciclos de molhagem e secagem na Figura 33, pode-se observar a presença do quartzo (Q), da potlandita (P) que ainda se faz presente com picos de intensidades variáveis para todas as composições, além da calcita (C) que faz parte das reações benéficas promovidas pelo CO<sub>2</sub> para o endurecimento da argamassa.



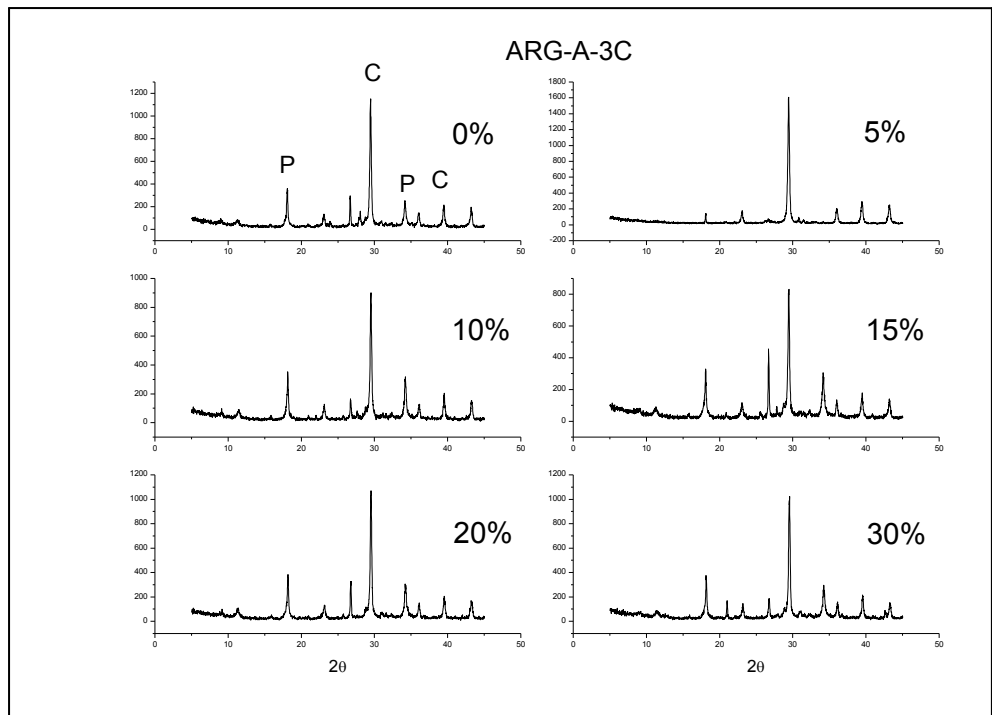
**Figura 33** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 20 ciclos

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-A - argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

A Figura 34 apresenta os difratogramas das argamassas submetidas aos 30 ciclos de molhagem e secagem aos 90 dias de cura submersa.

Na Figura 34 podemos observar para todas as composições que os picos referentes a portlandita (P) diminui de intensidade sendo mais significativo para o teor de 5%, essa diminuição poderá estar associada ao consumo da pozolâna bem como ao processo de carbonatação do hidróxido de cálcio nesta fase.



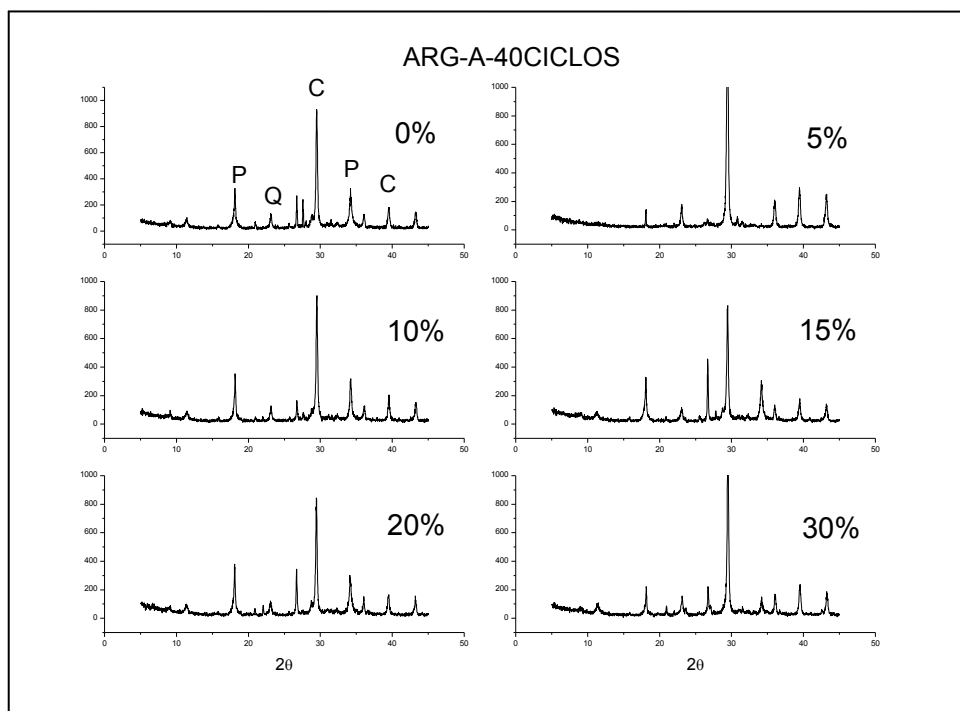
**Figura 34** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 30 ciclos

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-A - argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

De acordo com Farias Filho (2007) a carbonatação é uma reação química entre os hidróxidos de sódio, potássio e cálcio com gás carbônico, tendo como produto final um carbonato e a conseqüente redução do pH da solução nos poros do cimento. Embora a carbonatação por si só não constitua uma forma de degradação do concreto/argamassas nem de sua deterioração, ela pode reduzir a vida útil da estrutura e, conseqüentemente, sua durabilidade.

A Figura 35 apresenta os difratogramas das argamassas submetidas a 40 ciclos de molhagem e secagem aos 120 dias de cura submersa.



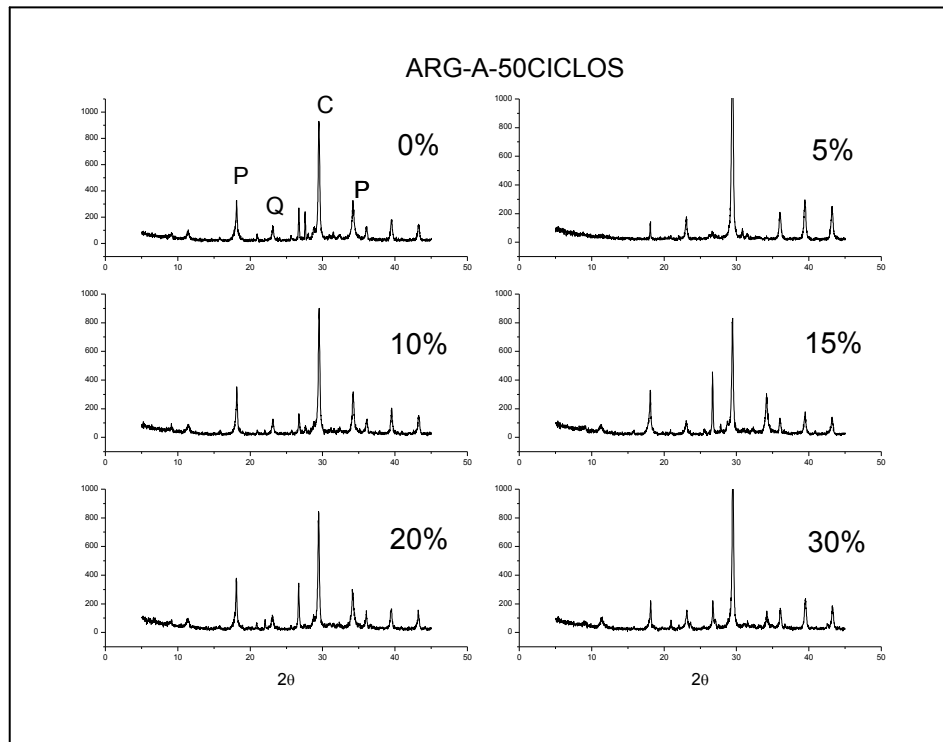
**Figura 35** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 40 ciclos

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-A - argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

De acordo com os difratogramas apresentados na Figura 34, podemos observar que os teores de substituição 10%, 15% e 20% ainda apresentam-se com fases marcantes da portlandita, indicando que o hidróxido de cálcio não foi consumido por total para esta fase. O que pode ocorrer em fases posteriores é a diminuição da intensidade dos picos referentes a portlandita e aumento para a calcita, evidenciando as reações da portlandita com o  $\text{CO}_2$ .

Na Figura 36 são apresentados os difratogramas das argamassas submetidas a 50 ciclos de molhagem e secagem a 360 dias de cura submersa.



**Figura 36** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 aos 50 ciclos

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-A - argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Diante dos resultados obtidos das RCS das argamassas submetidas aos 10, 20 e 30 ciclos de molhagem e secagem, para o ensaio de envelhecimento, acredita-se que as fases apresentadas da portlandita nos difratogramas iniciais correspondentes a este ensaio, poderão diminuir e intensificar com o avançar dos ciclos os picos referentes a calcita, em função da carbonatação.

Analisando o envelhecimento, verificou-se que há uma diminuição da fase portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), devido a reação pozolânica e surgimento da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), em virtude da carbonatação das argamassas, principalmente aos 180 e 360 dias de cura, o que poderá diminuir a resistência à compressão simples, caracterizando o início do envelhecimento. Mudanças de fase semelhantes foram observadas por Katz (2003) e Farias Filho (2007).

Verificou-se nas argamassas incorporadas com 30% do resíduo de caulim, comportamento mecânico inferior ao da argamassa convencional em todas as idades avaliadas, entretanto, os resultados obtidos para as



argamassas alternativas não apresentaram nenhuma evidência do envelhecimento do material, resultados semelhantes foram encontrados por Farias Filho (2007).

### 7.1.2 Análise térmica das argamassas submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado.

As análises térmicas das argamassas submetidas ao processo de envelhecimento acelerado para o traço 1:2:6 estão expostas no Apêndice C.

Nas Figuras A, B, C, D e E apresentadas no Apêndice C, estão representadas as curvas de DTA e DTG para as argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduo de caulim submetidas ao processo de envelhecimento acelerado para os traços 1:2:6.

As perdas de massas das argamassas alternativas e com substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado submetidas aos ciclos de molhagem e secagem podem ser observadas na Tabela 8.

**Tabela 8** – Perdas de massa (%) das argamassas de traço 1:2:6 submetidas aos ciclos de molhagem e secagem

<i>Teor de substituição</i>	<i>10 Ciclo</i>	<i>20 Ciclo</i>	<i>30 Ciclo</i>	<i>40 Ciclo</i>	<i>50 Ciclo</i>
0%	28,6	30,2	32,1	33,5	32,0
5%	28,3	30,4	32,0	32,0	29,5
10%	28,4	28,3	31,6	26,6	26,7
15%	28,5	30,0	29,9	30,2	30,2
20%	29,1	30,1	32,1	30,7	31,0
30%	31,4	32,0	30,8	31,2	30,9

Fonte: Autor 2012

As perdas de massa observadas para as argamassas convencionais submetidas aos ciclos de molhagem e secagem referem-se as reações de desidratação, como a perda de água livre em 120°C, seguido de outro pico endotérmico por volta de 150°C referente, provavelmente, à perda de água adsorvida na superfície externa das partículas e/ou água coordenada aos cátions.

Picos endotérmicos em 525°C referente à presença do hidróxido de cálcio e picos em torno de 736°C indicando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) também podem ser observados.

Para as argamassas aos 10 e 20 ciclos, pode-se observar perdas de massa referente as reações de desidratação (água livre e água adsorvida) a uma temperatura de aproximadamente 168°C, além da presença de picos referentes ao hidróxido de cálcio (potlandita) em torno de 530°C e carbonatos de cálcio em torno de 740°C.

O mesmo ocorre para as argamassas com 30, 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem.

Para algumas composições, na temperatura de 575°C, verificou-se pico endotérmico referente à inversão cristalográfica do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ . Também se observou pico endotérmico em 820°C, relacionado, provavelmente, ao carbonato de cálcio.

Além desses picos mais evidentes, pode-se observar para todas as argamassas avaliadas sob a ótica do envelhecimento acelerado, um pico discreto a aproximadamente 138°C referente aos silicatos formados nas reações de hidratação.

Segundo Rocha (2013) e Chaipanich (2010) os picos típicos das curvas DTG e DTA em uma matriz de cimento são: etringita de 76 a 84°C; silicato de cálcio hidratado de 104 a 140°C; silico-aluminato de cálcio hidratado de 157 a 163°C, aluminato de cálcio hidratado de 230 a 240°C a portlandita de 460 a 465°C e a calcita de 620 a 645°C. Comprovando dessa forma a presença dos silicatos. Esses, não puderam ser observados nos difratogramas, entretanto puderam ser comprovados através do desempenho mecânico encontrado para as argamassas avaliadas.

Para Kapel et al (1989) alguns neossilicatos são evidenciados quando o processo de cura é acelerado, fato este que está de acordo com os resultados encontrados para as argamassas com substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado.

### 7.1.3 Resistência a compressão das argamassas submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado para o traço 1:2:8

A Tabela 9 apresenta os valores de resistência referente às argamassas submetidas aos ciclos de molhagem e secagem para o Traço 1:2:8.

**Tabela 9** - Resistência a compressão das argamassas submetidas ao ensaio de envelhecimento

<i>Teor de substituição</i>	<i>10 Ciclo</i>	<i>20 Ciclo</i>	<i>30 Ciclo</i>	<i>40 Ciclo</i>	<i>50 Ciclo</i>	<i>D.P</i>	<i>C.V</i>
0%	4,2	3,9	3,3	2,6	3,0	0,58	17,0%
5%	3,8	3,4	3,1	2,5	2,5	0,50	16,3%
10%	3,9	3,6	3,0	2,9	3,0	0,39	11,8%
15%	2,9	3,0	2,2	2,3	2,7	0,31	11,8%
20%	3,4	3,3	2,8	2,1	2,8	0,46	15,8%
30%	2,7	2,4	2,0	2,0	2,3	0,26	11,4%

Fonte: Autor 2012

Quando comparamos os ciclos entre si, observamos que para os 10, 20 e 30 ciclos os teores de 10% e 20% apresentam-se com valores de resistência mais elevados, porém inferiores aos valores de referência. Já aos 40 e 50 ciclos apenas o teor de 10% apresenta-se com valor superior/igual aos de referência.

Os teores de 15% e 30% apresentaram-se com os menores valores de resistência em todos os ciclos, fato este que pode estar associado a quantidade de resíduo incorporado que foi insuficiente e/ou excedente não contribuindo para a evolução da resistência dessa argamassa.

De acordo com Sousa (2008), com os ciclos de molhagem e secagem, possivelmente, a estrutura do gel do C-S-H se altera danificando a estrutura da matriz cimentícia, conseqüentemente ocasionando redução nos valores de RCS. Além disso, os ciclos de envelhecimento afetam o processo de cristalização do C-S-H, não formando as fases cristalinas que melhorariam o comportamento mecânico do sistema. Fato este que pôde ser observado no

aspecto físico degradado dos corpos de prova das argamassas as quais foram submetidas aos ciclos de molhagem e secagem.

Com os resultados mecânicos médios apresentados pelas argamassas com substituição do cimento, até completos todos os ciclos percebe-se que os valores de resistência se encontram superiores aos valores prescritos pela NBR 13278.

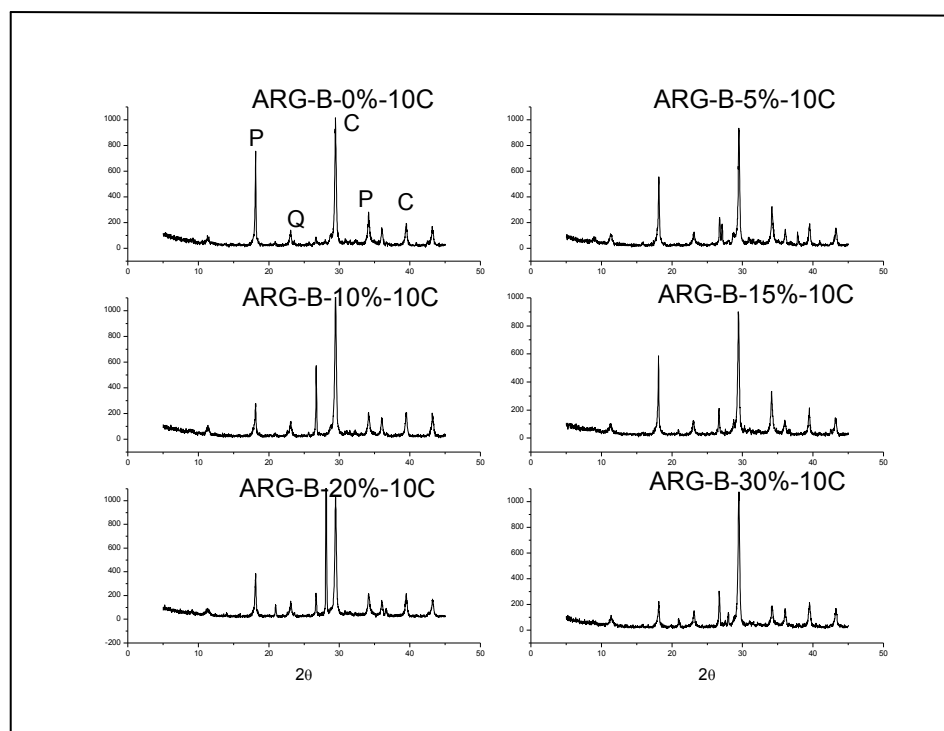
Os valores apresentados do desvio padrão (D.P) encontram-se abaixo de 1, demonstrando que a amostragem das argamassas avaliadas apresentam-se de forma homogênea. Entendendo que o coeficiente de variação (C.V) prevalece o desvio padrão, e é uma forma direta de medir a dispersão dos valores do conjunto de dados, quanto menor o valor do coeficiente de variação, mais homogêneo é o conjunto. Temos que este, apresenta-se mais elevado em relação aos da argamassa de traço 1:2:6, mais ainda assim, mantém-se abaixo de 20 considerando-se homogênea toda a amostragem.

Quando comparados mecanicamente ambos os traços, observa-se que o traço 1:2:6 apresenta melhor desempenho mecânico em relação ao traço 1:2:8, acredita-se que este último por apresentar uma maior quantidade de agregados, favorece o espaçamento entre os grãos que desta maneira fragiliza as argamassas.

#### **7.1.4 Difração de raio X das argamassas submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado**

A Figura 37 apresenta os difratogramas das argamassas submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado.

Observamos que ao início dos ciclos as fases mineralógicas presentes pouco foram alteradas, permanecendo a presença das seguintes fases: portlandita ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,901Å, 3,177Å, 2,627Å.



**Figura 37** - Difratoformas das argamassas de traço 1:2:8 aos 10 Ciclos

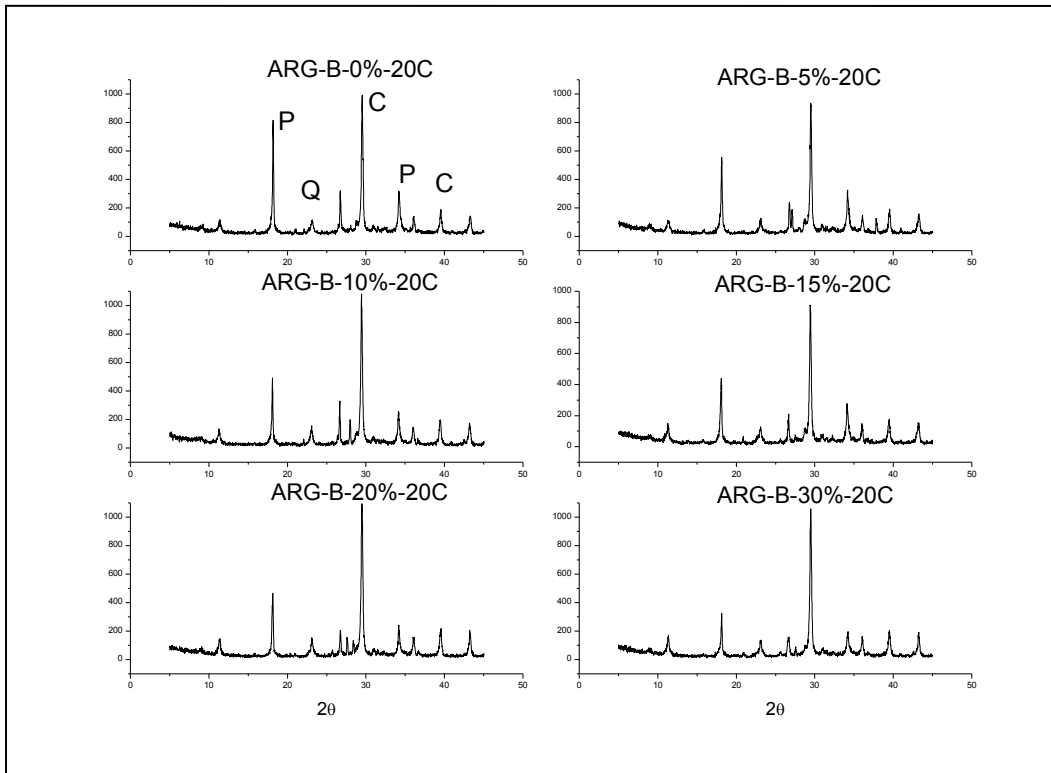
**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-B - argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Verificou-se também fases relacionadas ao quartzo (Q), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,243Å, 2,452Å e 3,336Å. A presença destas fases caracterizadas pela intensidade dos picos justifica o comportamento mecânico apresentado para este ciclo, apresentam-se desta forma devido a temperatura controlada ( $60^{\circ}\text{C}\pm 5$ ) a qual foram submetidas favorecendo o desenvolvimento das reações químicas dos componentes quimicamente ativos.

A Figura 38 apresenta os difratogramas das argamassas submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado, aos 20 ciclos de molhagem e secagem.

P



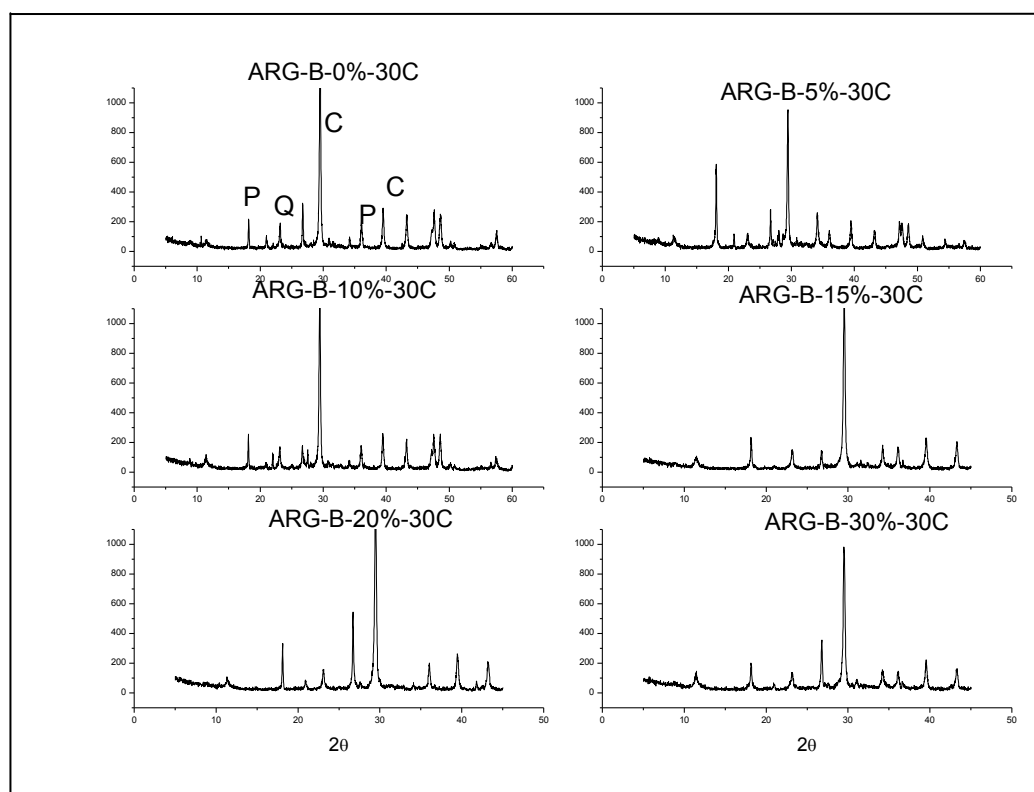
**Figura 38** – Difratoqramas das argamassas de traço 1:2:8 aos 20 Ciclos

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-B - argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Ao analisarmos os difratogramas apresentados na Figura 41, podemos observar a presença de picos intensos relativos a presença da portlandita e calcita. Em se tratando do início praticamente do ensaio de envelhecimento, já era de se esperar o comportamento desses picos, o que pode vir a apresentar intensidades inferiores no decorrer do processo de envelhecimento acelerado.

A Figura 39 apresenta os difratogramas das argamassas incorporadas com resíduo de caulim calcinado, para o ensaio de durabilidade aos 30 ciclos de molhagem e secagem.



**Figura 39** – Difratomogramas das argamassas de traço 1:2:8 aos 30 Ciclos

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-B - argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Observa-se nesta fase Figura 38, que os picos referentes a potlandita apresentam-se menos intensos para os teores de 10%, 15%, 20% e 30% , em contrapartida os picos referentes ao carbonato de cálcio apresentam-se com elevada intensidade, conseqüentemente devido presença das reações de carbonatação, que por sua vez tende a fragilizar mecanicamente as argamassas como já citado anteriormente e confirmado por Farias filho (2007).

A Figura 40 apresenta os difratogramas referentes aos 40 e 50 ciclos de molhagem e secagem das argamassas convencionais e alternativas, com incorporação do resíduo de caulim calcinado.

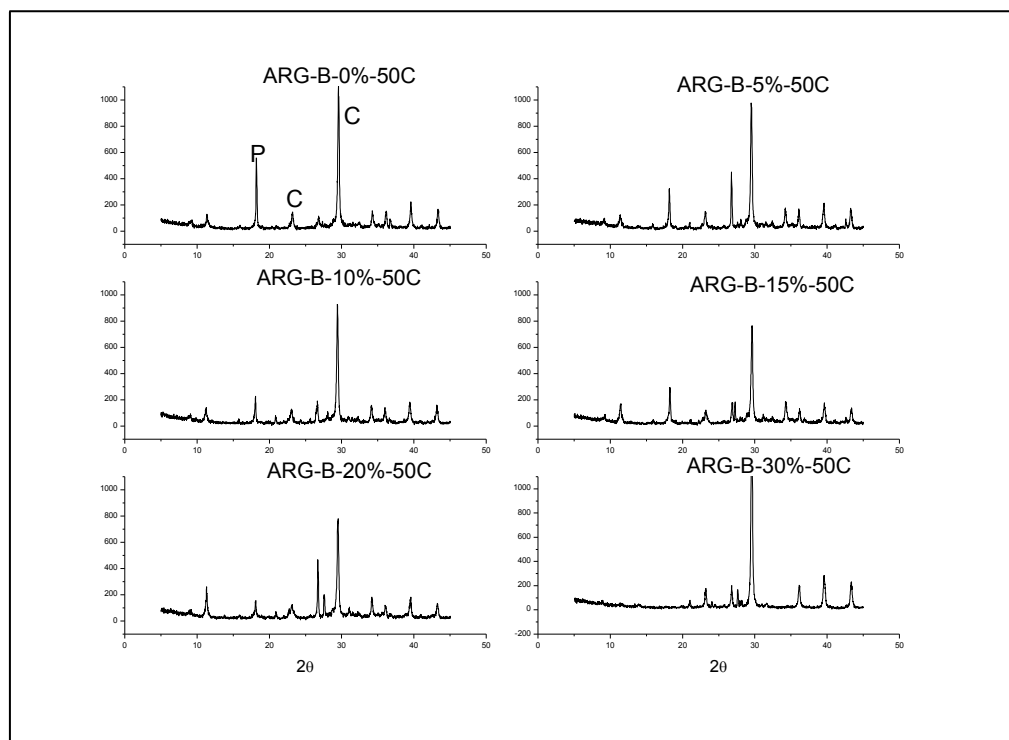
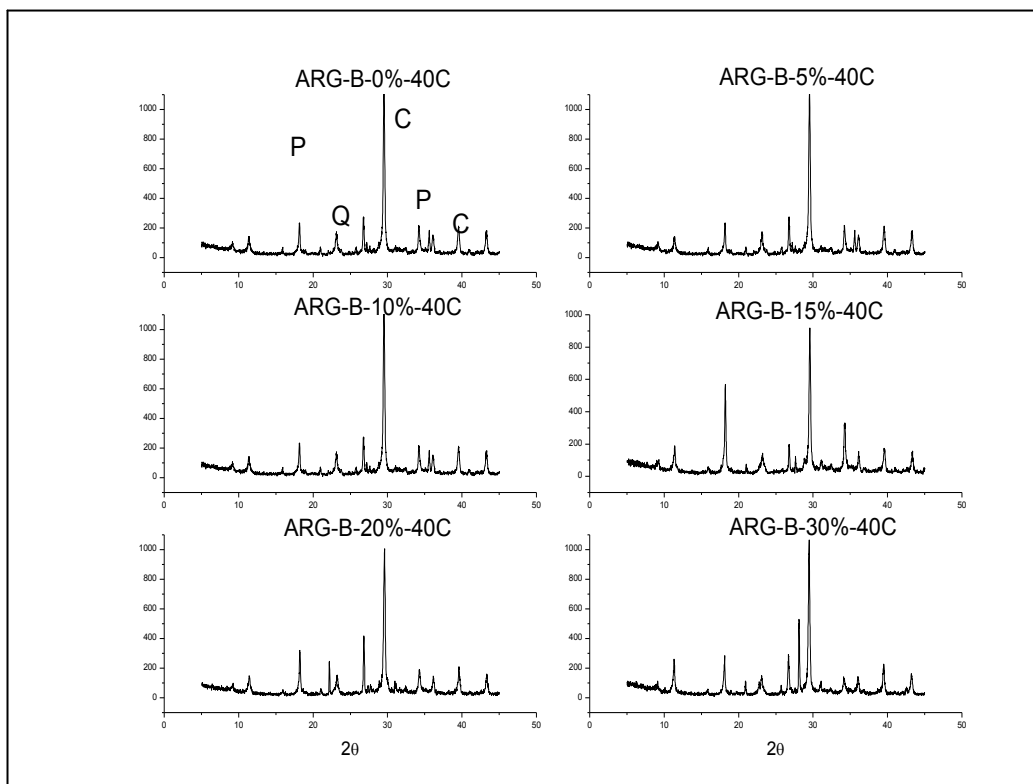


Figura 40 - Difratomogramas das argamassas de traço 1:2:8 aos 40 e 50 Ciclos



**Legenda:**P - portlandita Q - quartzo C – calcita. **ARG-B** - argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado

Fonte: Autor 2012

Analisando o envelhecimento, verificou-se que há uma diminuição da fase portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), ao longo do processo de cura, fato este que poderá estar relacionado as reações da pozolana com o resíduo de caulim calcinado (metacaulinita). Pode-se ainda observar o surgimento da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), em virtude da carbonatação das argamassas, principalmente para as composições de 10% em ambas as Figuras podendo isto, diminuir a resistência mecânica, caracterizando desta forma, o início do processo de envelhecimento.

O envelhecimento aqui avaliado, só poderá ter resultados mais significativos de degradação (durabilidade), com o aumento do tempo de cura sob influência dos ciclos de molhagem e secagem. Observações semelhantes foram também encontradas por Katz (2003) e Farias Filho (2007).

#### **7.1.5 Análise térmica das argamassas submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado**

Nos Apêndices D estão representados as curvas de análise térmica diferencial e gravimétrica para o traço 1:2:8, para o ensaio de durabilidade através do ensaio de envelhecimento acelerado aos 10, 20, 30, 40 e 50 ciclos.

Nas Figuras A, B, C, D e E do Apêndice D estão apresentadas as curvas de análise térmica diferencial e termogravimétrica para as argamassas convencionais e alternativas incorporadas com resíduo de caulim calcinado, submetidas aos ensaios de durabilidade. Estas análises complementares foram realizadas para verificar as fases em que ocorreram as transformações endotérmicas e exotérmicas dos corpos-de-prova das argamassas.

Para todas as composições convencionais é possível observar a presença dos picos a 84°C referente a etringita, o silico-aluminato de cálcio hidratado entre 157 e 163°C, o aluminato de cálcio hidratado entre 230 a 240°C a portlandita de 460 a 465°C e a calcita de 620 a 645°C, avaliação esta realizada também por Rocha (2013).

Os picos referentes aos neossilicatos tornam-se mais evidentes a partir do terceiro ciclo para todas as composições de argamassas, segundo Kapel et

al (1989) alguns neossilicatos são evidenciados quando o processo de cura é acelerado.

Para as composições referentes aos 40 e 50 ciclos, na temperatura de 401°C, verificou-se pico endotérmico referente à inversão cristalográfica do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ . Observou-se também pico endotérmico em 778°C, relacionado, provavelmente, ao carbonato de cálcio.

As perdas de massa para as argamassas submetidas aos ciclos de molhagem e secagem se encontram na Tabela 10.

**Tabela 10** - Perda de massa (%) das argamassas de traço 1:2:8 submetidas aos ciclos de molhagem e secagem

Teor de substituição	10 Ciclo	20 Ciclo	30 Ciclo	40 Ciclo	50 Ciclo
0%	32,0	31,2	32,0	33,2	32,8
5%	29,5	31,8	32,0	33,7	34,1
10%	26,3	32,0	31,6	33,8	33,1
15%	30,1	32,4	30,0	33,5	32,0
20%	30,7	34,0	32,2	32,0	31,2
30%	31,0	33,6	30,8	33,6	31,2

Fonte: Autor 2012

As perdas de massas citadas na Tabela 11 correspondem a perda de água livre em torno de 70°C, desidratação dos silicatos (C-S-H) a partir de 130°C, observando ainda, a uma temperatura de 780°C, pico endotérmico relacionado a decomposição do hidróxido cálcio e formação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), este tem suas intensidades variadas em função do tempo de cura e exposição ao  $\text{CO}_2$  para as composições das argamassas.

## **8. Avaliação da degradação das argamassas com adição de RC calcinado submetidas a cura externa**

Entendendo que, quanto mais tempo as argamassas são expostas as intempéries maior será o desenvolvimento da degradação, para isso, a resistência a compressão simples foi utilizada como parâmetro avaliador e determinada no decorrer do avanço do tempo de cura, sendo estes, 90, 210, 360 e 512 dias, além da avaliação pelas análises complementares de difração de raios X e análises térmicas.

### **8.1 Traço 1:2:6**

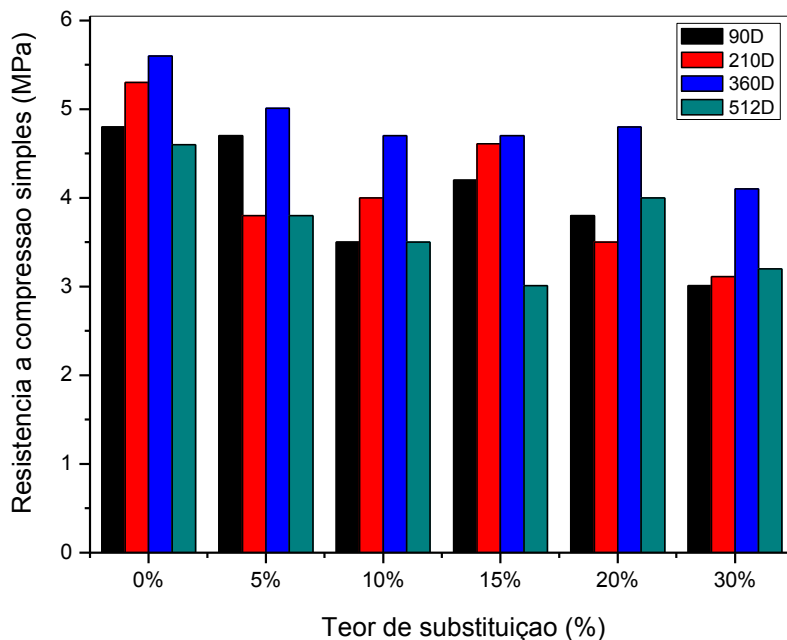
#### **8.1.1 Resistência a compressão das argamassas submetidas a cura externa**

A Figura 41 apresenta os valores de resistência a compressão simples das argamassas de traço 1:2:6 submetidas a cura em ambiente externo, expostas as condições climáticas naturais durante 90, 210, 360 e 512 dias.

As argamassas com teores de substituição de resíduo de caulim não apresentaram valores de resistência acima dos valores de referência. Entretanto, quando comparadas as resistências dos teores de substituição entre si (5%, 10%, 15% e 20%) ao longo do tempo de cura de 90, 210 e 360, obtém-se pequenas elevações das resistências, mais quando os teores de substituição são avaliados aos 512 dias observa-se um decréscimo significativo para todas as composições fato que pode estar relacionado ao processo de carbonatação das argamassas.

O teor de substituição de 30% mais uma vez apresenta valores de resistências inferiores em comparação com os demais. Resultados estes, que não estão de acordo com os encontrados por Farias Filho (2007) ao avaliar pozolanas artificiais em substituição ao cimento.

Entretanto em relação às normas da ABNT, todas as argamassas estudadas apresentam resultados dentro das especificações para uso na construção civil.



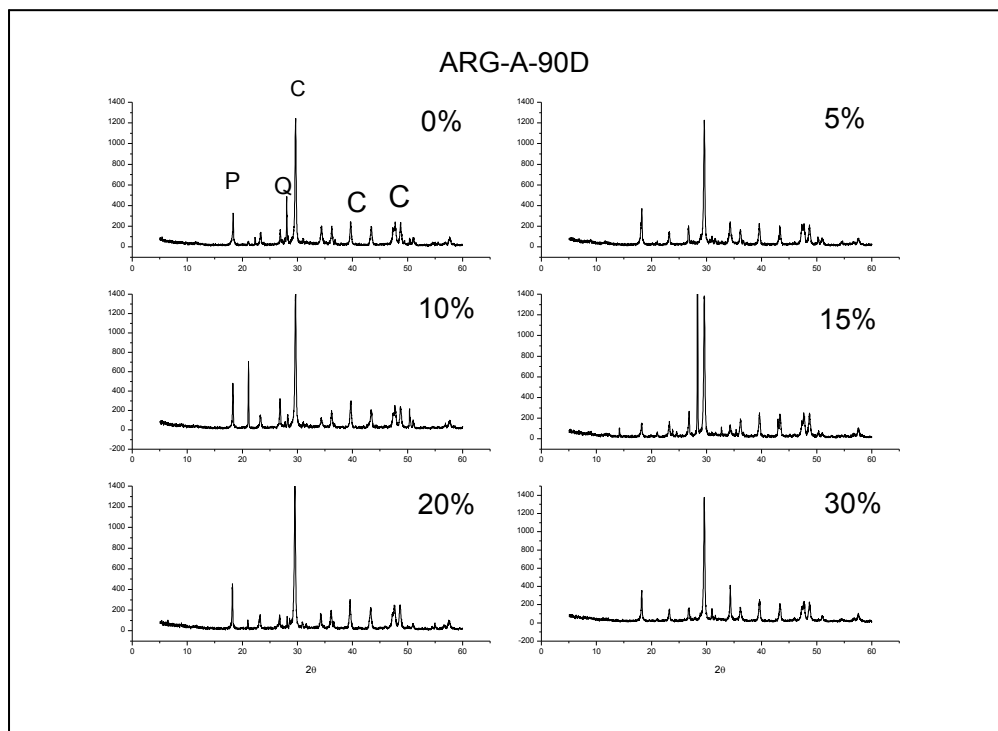
**Figura 41** – Resistência a compressão das argamassas de traço 1:2:6 submetidas a cura externa.

Fonte: Autor 2012

### 8.1.2 Difração de raios-X das argamassas submetidas ao processo de cura externa

A Figura 42 apresenta os difratogramas das argamassas de traço 1:2:6, também denominadas argamassas A para um período de cura de 90 dias em ambiente externo, submetidas as condições naturais do tempo.

Analisando os difratogramas da Figura 41 pode-se observar a presença das fases mineralógicas portlandita ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), caracterizada pelas distâncias interplanares de 4,901Å, 3,177Å, 2,627Å; quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizado pelas distâncias interplanares de 4,243Å, 2,452Å e 3,336Å, a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) como principal constituinte cristalino, em virtude da grande intensidade relativa do seu pico, em relação aos picos dos demais constituintes.



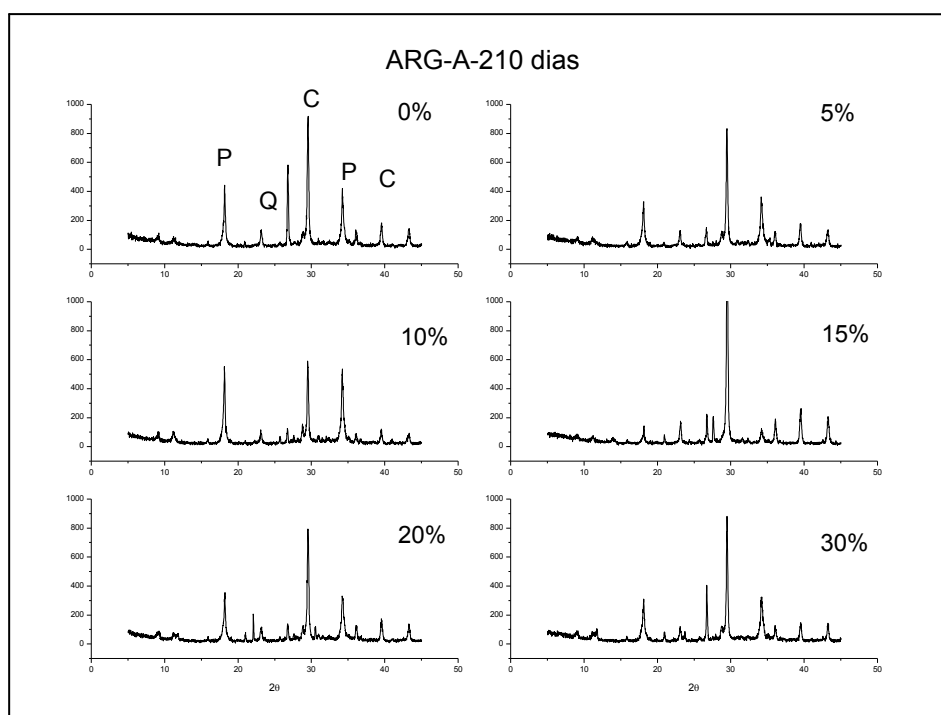
**Figura 42** – Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 submetidas a cura externa por 90 dias.

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-A- argamassa de traço 1:2:6 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

A presença intensa das fases observadas acima condiz com o desempenho mecânico encontrado para esta idade de cura, pois as fases relacionadas a presença da calcita, evidencia a formação dos carbonatos submetendo às argamassas alternativas a um decréscimo de resistência quando comparadas com as argamassas de referência.

A Figura 43 apresenta os difratogramas das argamassas submetidas a cura em ambiente externo por 210 dias.



**Figura 43** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 submetidas a cura externa por 210 dias

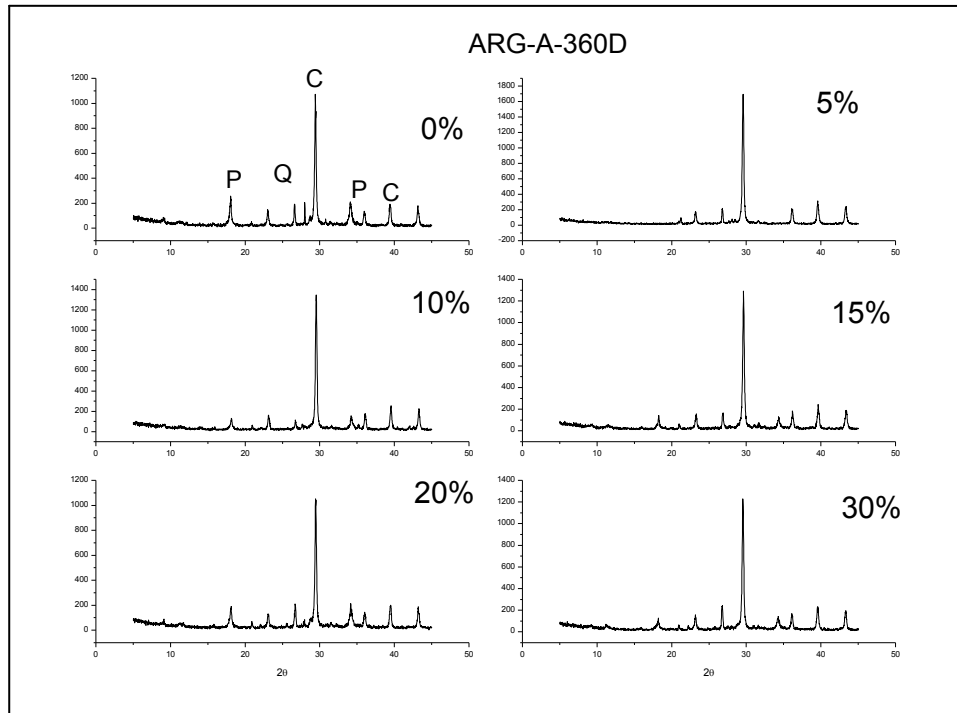
**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-A- argamassa de traço 1:2:6 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

De acordo com a Figura 43, podemos observar que aos 210 dias de cura, os picos referentes a potlandita (P) e calcita (C) mantêm-se intensos, o que para esta idade ainda ocorrerá reações que venham a favorecer um melhor comportamento mecânico.

A NBR 13279 (2001) classifica as argamassas como padrão I, àquelas que apresentam valores de resistência à compressão simples variando entre  $0,1 \text{ MPa} \leq \text{RCS} < 4,0 \text{ Mpa}$ . As argamassas alternativas em estudo, para o traço 1:2:6 apresentam valores de RCS em todos os teores , acima dos classificados pela ABNT.

A Figura 44 apresenta os difratogramas para a argamassa aos 360 dias de cura.



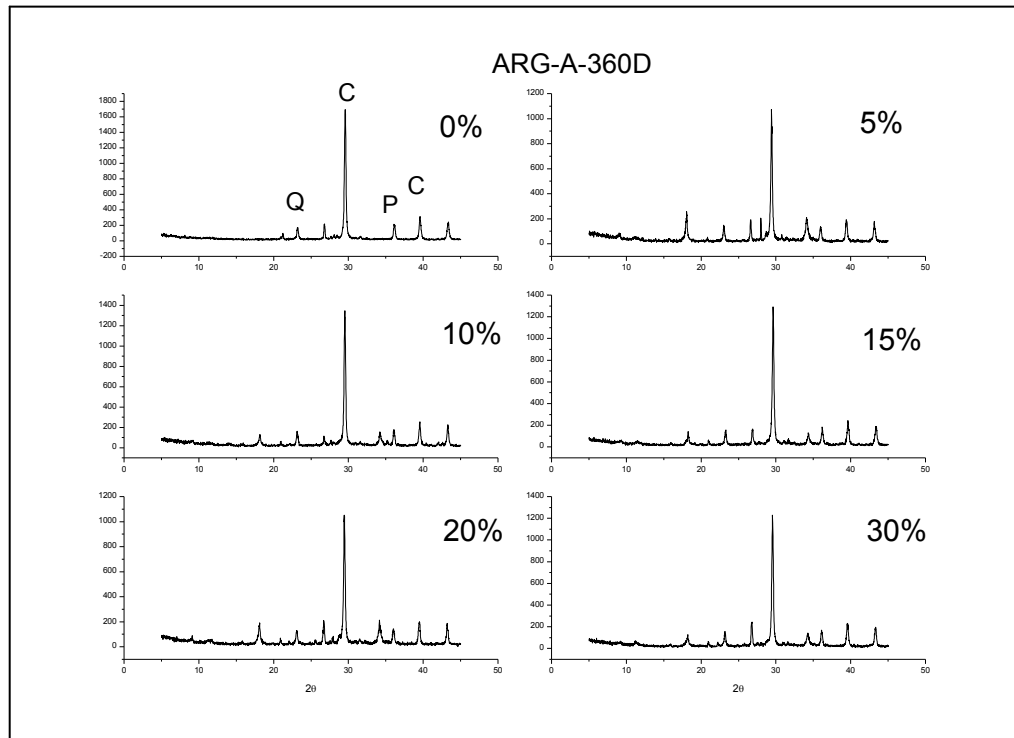
**Figura 44** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 submetidas a cura externa por 360 dias

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-A- argamassa de traço 1:2:6 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Analisando os difratogramas da Figura 43, observa-se uma redução da intensidade do pico referente a portlandita (P), em contrapartida, o pico referente ao carbonato de cálcio, apresentam-se mais intensos. Resultado da reação sofrida pela exposição ao CO<sub>2</sub> do ambiente externo. Ainda é possível encontrar para esta idade para todas as argamassas teores de portlandita, sendo esta observação feita nas análises térmicas dessas argamassas. Este fato pode estar relacionado a quantidade em excesso de cal utilizada para a composição dos traços, que proporcionalmente não reagiu por completo com a pozolana.

A Figura 45 apresenta o difratograma das argamassas curadas aos 512 dias.



**Figura 45** - Difratoograma das argamassas de traço 1:2:6 submetidas a cura externa por 512 dias

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-A- argamassa de traço 1:2:6 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Avaliando o processo de cura externa por meio dos difratogramas da Figura 45 percebe-se que há uma diminuição da intensidade dos picos referentes a potlandita, no entanto os picos característicos da calcita, permanecem intensos. Constatando que o processo de carbonatação nesta idade foi bem efetivo, fato comprovado, a partir dos valores de resistência mecânica reduzida em relação ao valor de referência.

É importante salientar que para todas as idades de cura nas quais as argamassas foram expostas em ambiente externo, que os picos relativos a calcita foram praticamente predominante, em função da carbonatação. Justificado pelo fato do fenômeno da carbonatação ser diretamente dependente da concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente, do percentual de umidade do ar, da temperatura a qual as argamassas estão submetidas e dos



condicionantes internos das argamassas, como o tipo de cimento, as adições, os agregados e a cura que definem segundo Castellote et al (2009), a composição da mistura e sua estrutura de poros.

De acordo com Werle *et al.* (2011) há evidências de que as reações de carbonatação não ocorrem somente entre o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{Ca(OH)}_2$ , mais sim com todos os demais compostos hidratados do cimento.

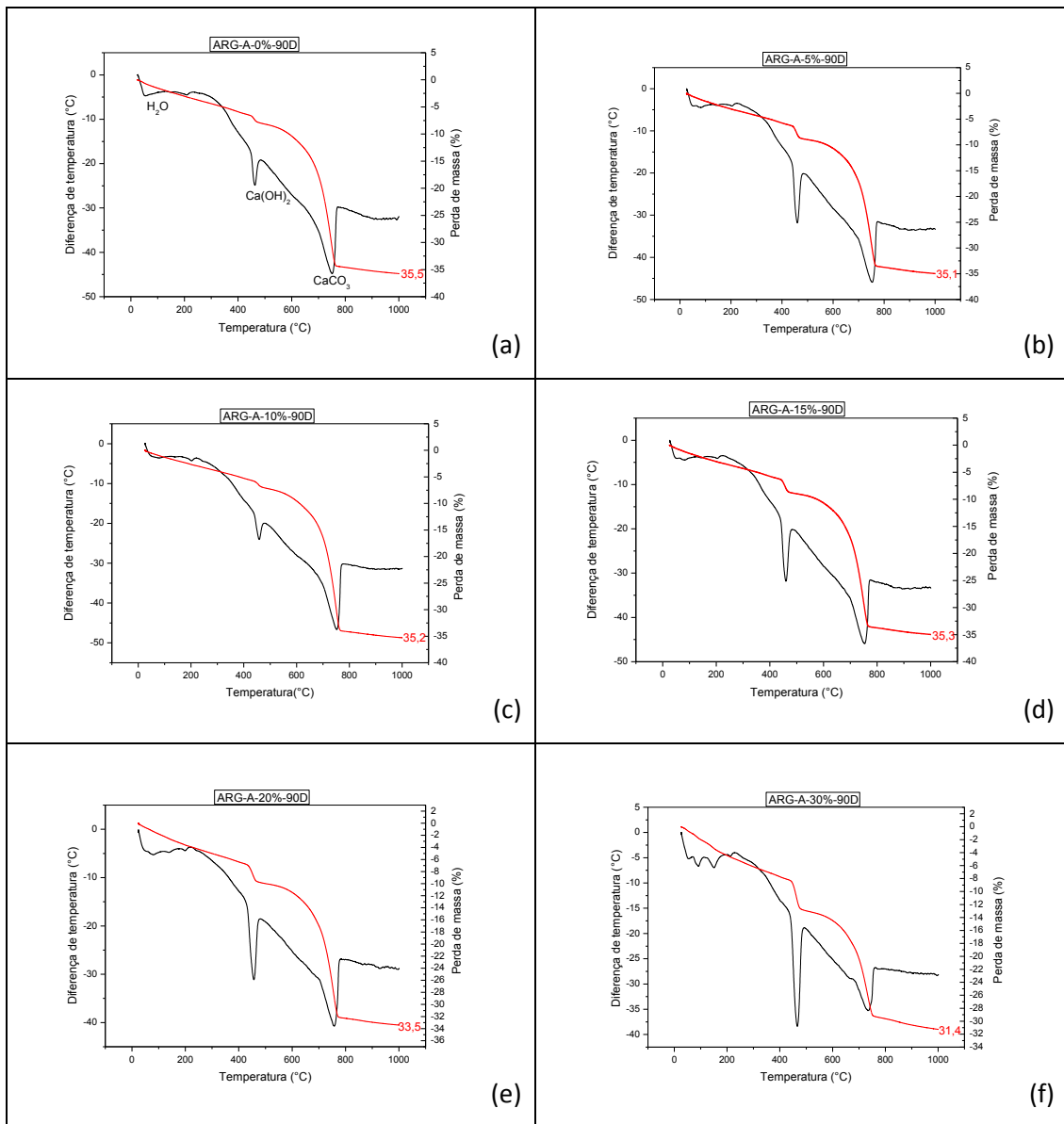
### **8.1.3 Análise térmica das argamassas submetidas ao processo de cura externa**

As Figuras 46 **A**, **B**, **C** e **D**, apresentam as curvas das análises térmicas para as argamassas submetidas ao processo de cura externa aos 90, 210, 360 e 512 dias.

Observa-se a intensificação do pico relativo ao carbonato de cálcio, onde para este, pode ocorrer tanto o consumo da portlandita pela reação pozolânica, tanto pode estar ocorrendo a carbonatação. Esta última, com mais intensidade.

Em se tratando de argamassas mistas (cimento+cal) quando a composição do traço permite que haja cal em excesso, o hidróxido de cálcio resultante da reação de hidratação do cimento soma-se a cal tornando o sistema saturado. Este fato pode estar relacionado a grande quantidade de carbonatos encontrados nas argamassas avaliadas, bem como poderá justificar o desempenho mecânico das argamassas alternativas.

Segundo a Peter et al (2008) a reação básica da carbonatação refere-se à combinação do  $\text{CO}_2$  com  $\text{Ca(OH)}_2$  em função da rapidez com que tais reações ocorrem em relação aos demais elementos carbonatáveis. O  $\text{CO}_2$  reage com o  $\text{Ca(OH)}_2$  três vezes mais rápido do que reage com C-S-H, vinte vezes mais rápido do que a reação com  $\text{C}_2\text{S}$  e cinquenta vezes mais rápido do que a reação com o  $\text{C}_3\text{S}$ .

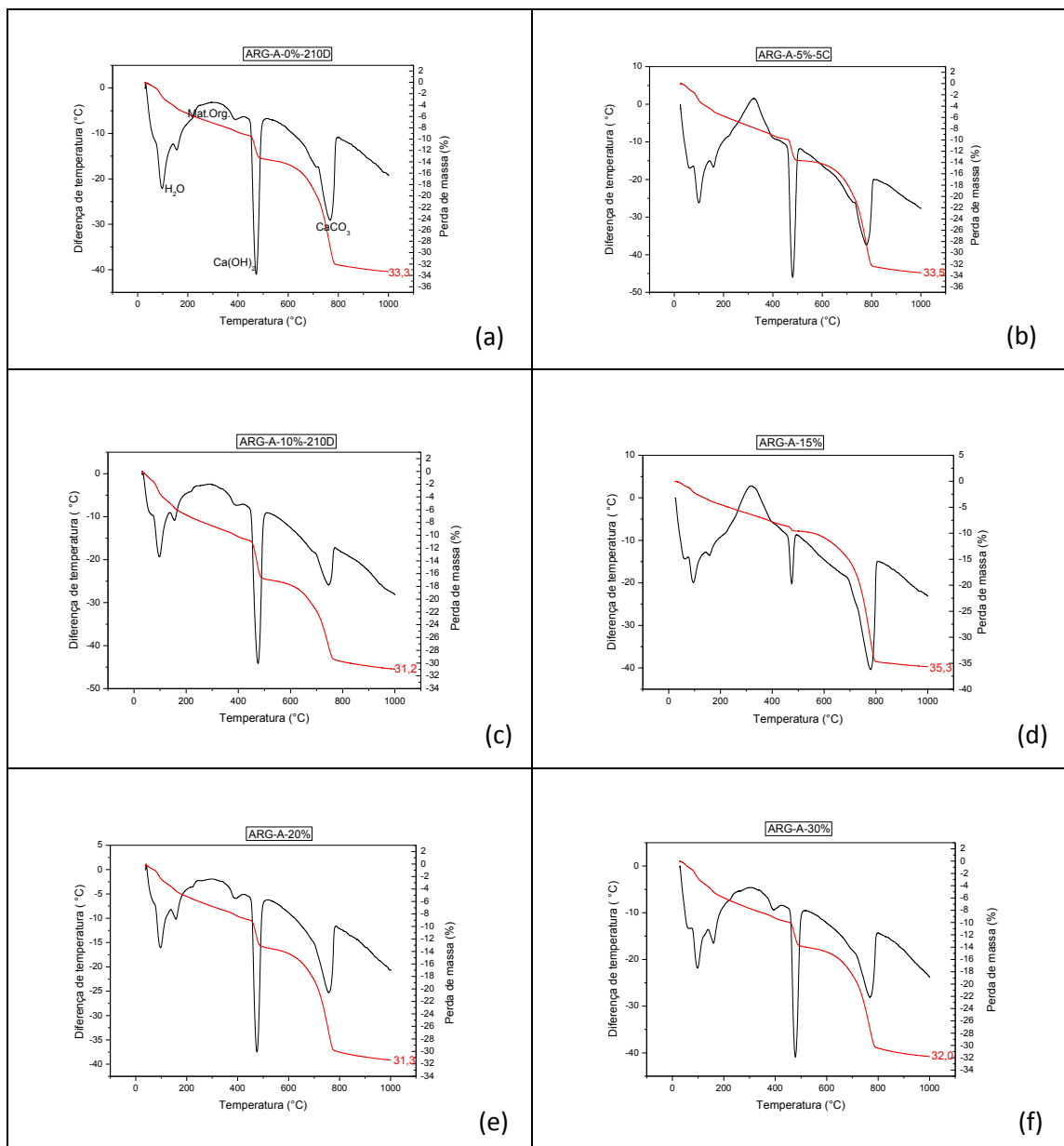


**Figura 46 A – ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 aos 90 dias de cura**

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

Fonte: Autor 2012

A Figura 46 B apresenta as curvas das análises térmicas diferencial e gravimétrica para as argamassas de traço 1:2:6 submetidas a cura externa.

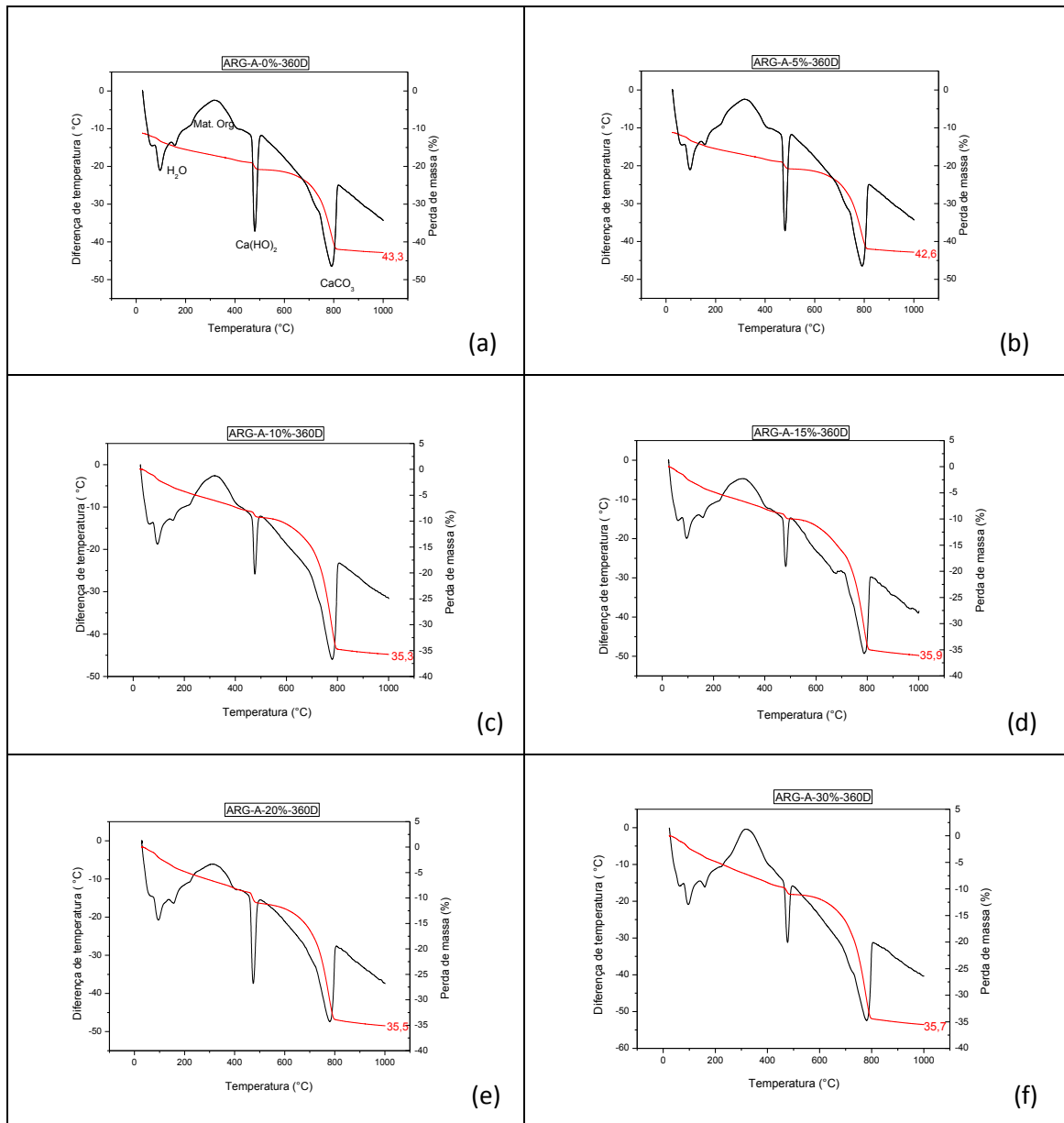


**Figura 46 B** - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 aos 210 dias de cura

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

Fonte: Autor 2012

A Figura 46 C apresenta as curvas das análises térmicas diferencial e gravimétrica para as argamassas de traço 1:2:6 submetidas a cura externa.

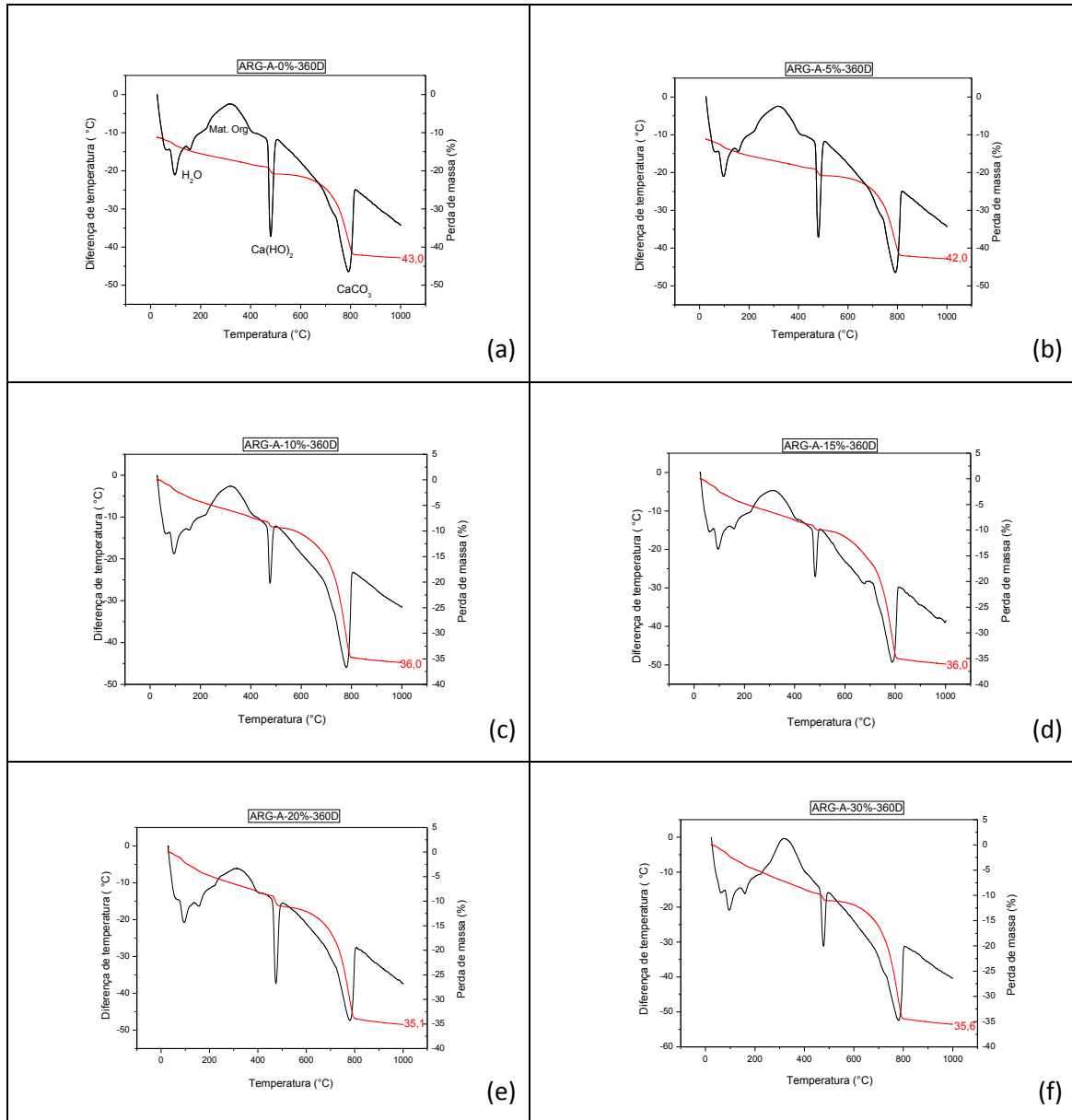


**Figura 46 C** - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 aos 360 dias de cura

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

Fonte: Autor 2012

A Figura 46 D apresenta as curvas das análises térmicas diferencial e gravimétrica para as argamassas de traço 1:2:6 submetidas a cura externa.



**Figura 46 D** ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 aos 512 dias de cura

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim..

Fonte: Autor 2012

As curvas das análises térmicas demonstram que ao longo da cura o pico endotérmico do hidróxido de cálcio tende a diminuir, alguns até diminuem significativamente, para algumas composições com substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

Verifica-se que para todas as composições em praticamente todos os tipos de cura aqui avaliados, cura interna, externa e acelerada, foi o que se pode constatar, um excesso de cal livre no sistema, o que justifica os picos intensos e constantes do carbonato de cálcio nas análises térmicas avaliadas.

Ainda para as argamassas expostas ao ambiente externo, pode-se observar, entre as temperaturas de 215°C e 450°C bandas exotérmicas, referentes à presença de matéria orgânica desenvolvida durante o tempo de exposição das argamassas as intempéries, resultados semelhantes foram encontrados por Souza (2008)

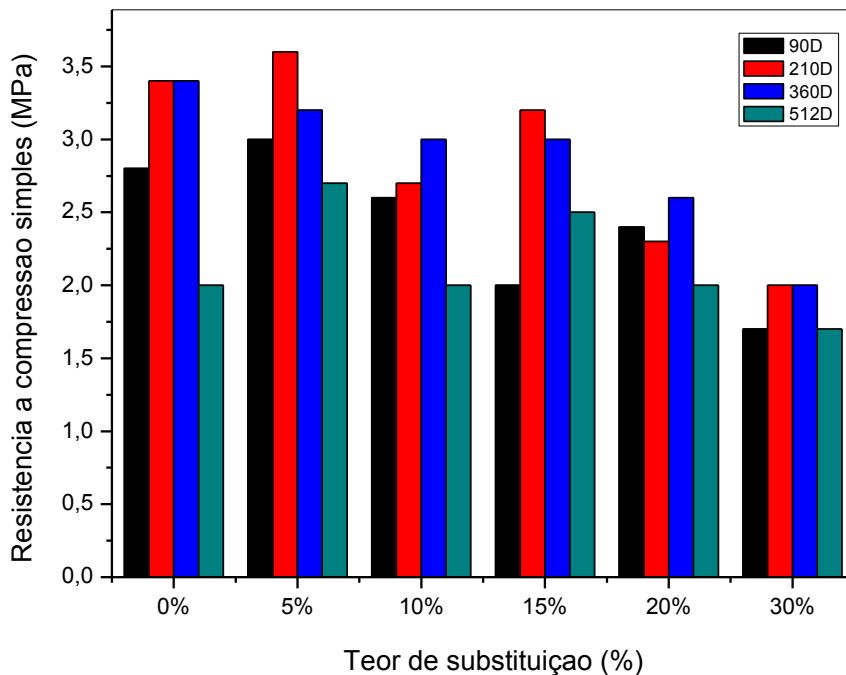
Em todas as composições observou-se a presença de picos endotérmicos por volta de 820°C, relacionados, a decomposição do carbonato de cálcio.

As perdas de massa de observadas para as argamassas convencionais de 35,5%, 33,3%, 43,3% e 43,0% correspondentes as idades de 90, 210,360 e 512 dias de cura são relativas às perdas de água livre e adsorvida, bem como a desidratação do hidróxido de cálcio e decomposição do carbonato de cálcio. Dessa maneira, segue também para as argamassas com substituição do cimento pelo resíduo de caulim calcinado.

## **8.2 Traço 1:2:8**

### **8.2.1 Resistência a compressão das argamassas submetidas a cura externa**

A Figura 47 apresenta os valores de resistência a compressão simples das argamassas de traço 1:2:8 submetidas a cura em ambiente externo, expostas as condições climáticas naturais durante 90, 210, 360 e 512 dias.



**Figura - 47** RCS das argamassas submetidas a cura externa  
 Fonte: Autor 2012

De acordo com os valores de resistência apresentados na Figura 46 podemos observar que apenas os teores de substituição de 5% para as idades de cura de 90, 210 e 512 dias apresentou valores acima dos valores de referência, enquanto para os 360 dias de cura essa alteração não foi muito significativa.

Percebe-se pequenos aumentos de resistência para os teores de 10% nas idades de 210 e 360 dias de cura quando comparados com os valores apresentados aos 90 dias. Entretanto, ocorre uma redução significativa aos 512 dias de cura.

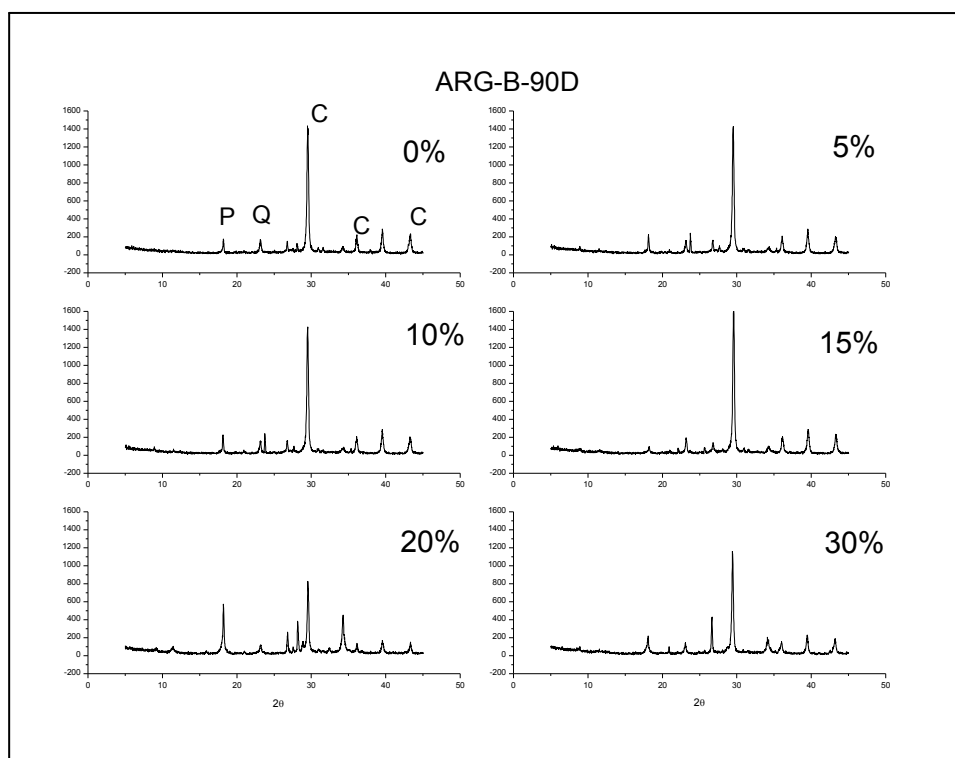
Para os teores de 15% e 20% observamos que o teor de 15% aparece com valores maiores aos 210, 360 e 512 dias, enquanto que, para 20% de substituição esse aumento é mais significativo aos 360 dias de cura, sofrendo perda de resistência na idade posterior.

O teor de 30% sofre perda de resistência em todas as idades de cura. Este comportamento já era esperado, pois os resultados obtidos durante a cura interna e o envelhecimento, evidenciaram que este teor de substituição não favorece o ganho de resistência. Fato também observado pelo aspecto físico

dos corpos de prova, pois de forma geral este traço foi o que mais sofreu deterioração e desenvolvimento de bolor, em especial esta composição.

### 8.2.2 Difração de raios X das argamassas submetidas ao processo de cura externa

A Figura 48 apresenta os difratogramas das argamassas submetidas ao processo de cura externa.



**Figura 48** Difratogramas das argamassas de traço 1:2:8 aos 90 dias de cura externa

**Legenda:** P - portlandita Q - quartzo C – calcita. ARG-B- argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

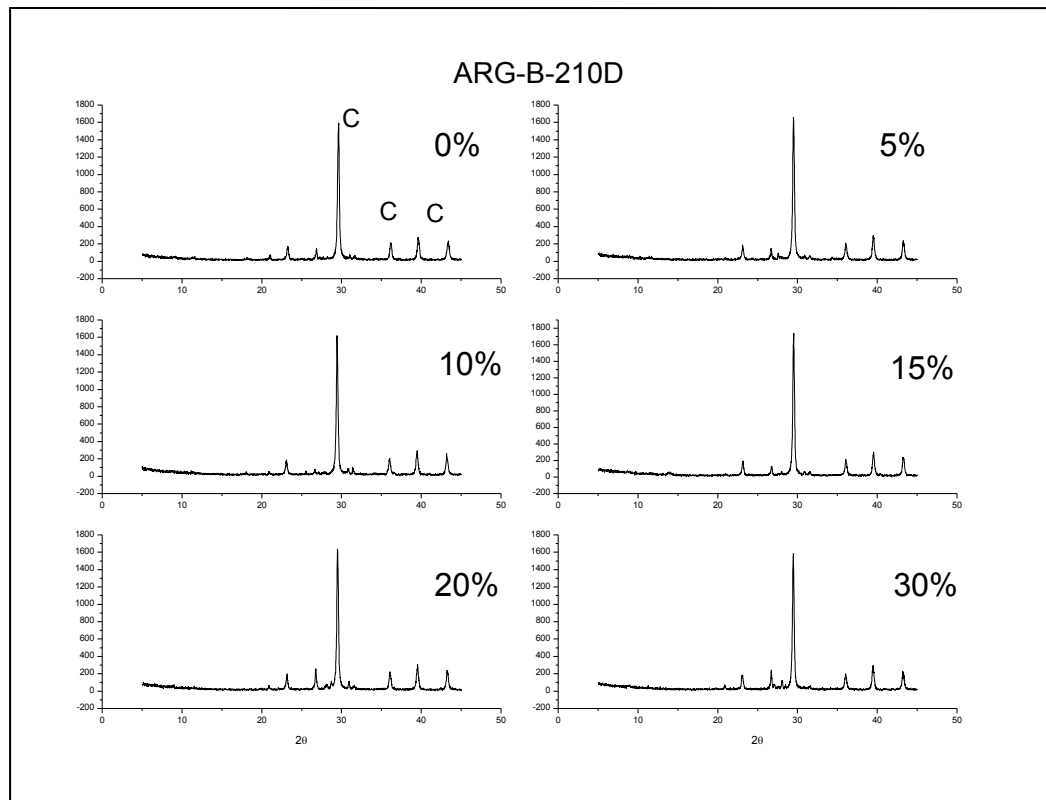
Fonte: Autor 2012

Analisando os difratogramas relativos aos 90 dias de cura sob condições externas, podemos observar as seguintes fases mineralógicas para as argamassas convencional e alternativas, presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caracterizada pela distância interplanar de 3,34 Å, da portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,



caracterizada pelas distâncias interplanares de 2,62 Å, 5,60 Å e 3,23 Å, e da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) caracterizada pelas distâncias interplanares 3,03 Å e 2,13 Å.

As Figuras 49, 50 e 51 apresentam os difratogramas para as idades de cura de 210, 360 e 512 dias em ambiente externo.

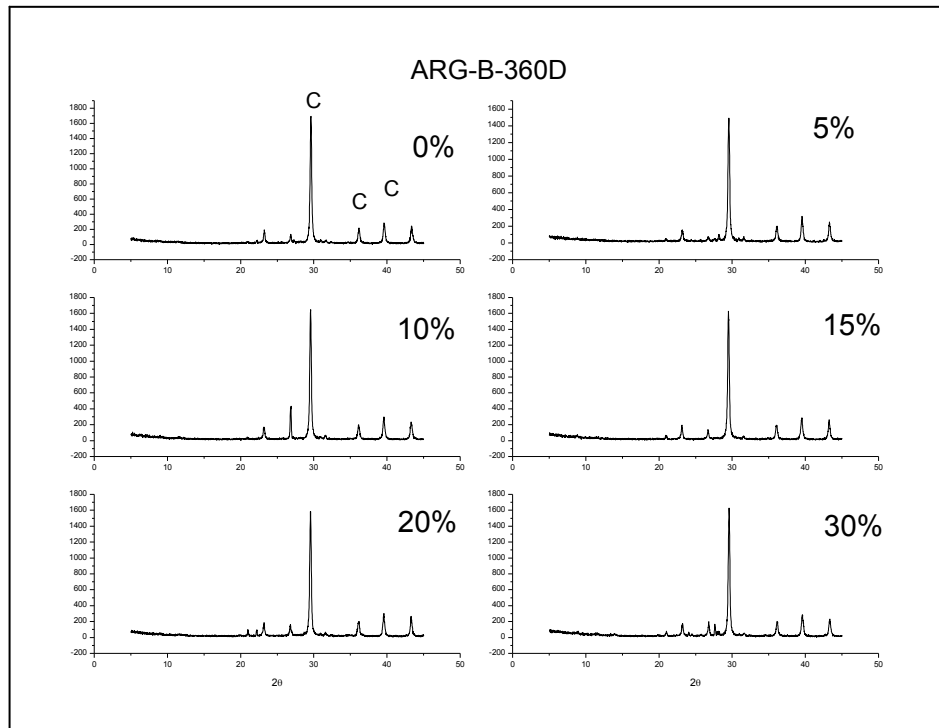


**Figura 49** - Difratogramas das argamassas de traço 1:2:8 aos 210 dias de cura externa

**Legenda:** C – calcita. ARG-B- argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Analisando os difratogramas relativos aos 210 dias de cura sob condições externas, podemos observar que a fase mineralógica predominante é a da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) para as argamassas convencionais e alternativas tendo esta, distância interplanar caracterizada por 3,03 Å e 2,13 Å.

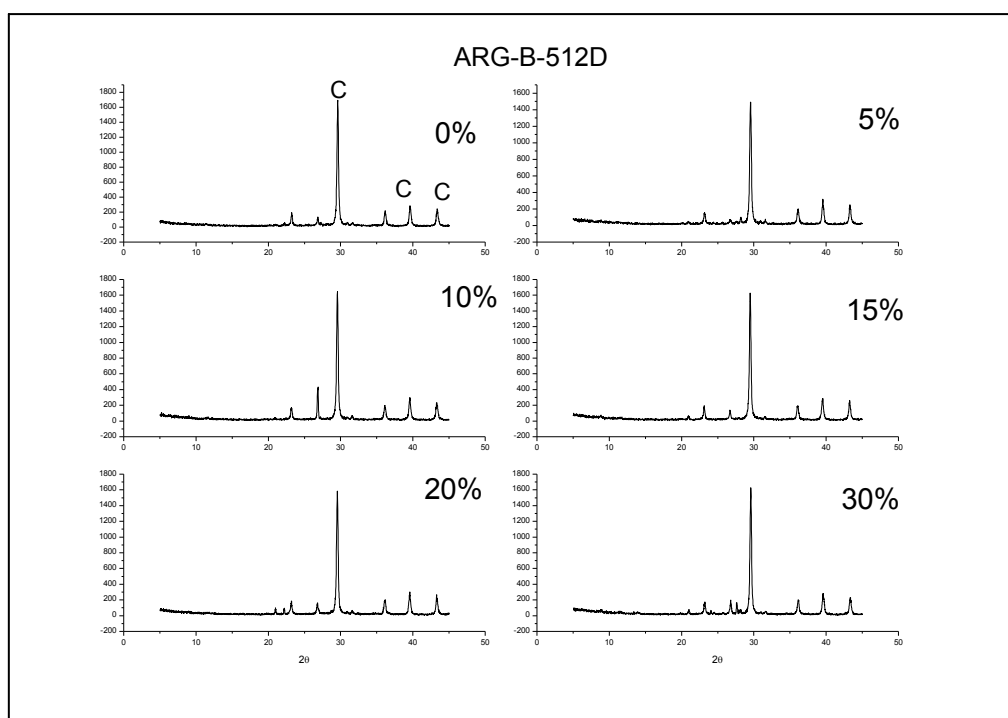


**Figura 50** - Difratoogramas das argamassas de traço 1:2:8 aos 360 dias de cura externa

**Legenda:** C – calcita. ARG-B- argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Para os difratogramas aos 360 dias de cura externa, podemos observar que a fase comportamento semelhante aos difratogramas para a idade de 210 dias onde se observa a calcita (CaCO<sub>3</sub>) para todas as composições de argamassas convencional e alternativas (distância interplanar caracterizada por 3,03 Å e 2,13 Å).



**Figura 51** - Difratomogramas das argamassas de traço 1:2:8 aos 512 dias de cura externa

**Legenda:** C – calcita. ARG-B- argamassa de traço 1:2:8 0% argamassa convencional e 5%, 10%, 15%, 20%, e 30% com substituição do cimento por resíduo de caulim calcinado.

Fonte: Autor 2012

Pode-se observar para as idades de 210, 360 e 512 dias difratogramas muito semelhantes, todos apresentam picos relativos a presença da calcita como material predominante, tratando-se da carbonatação da cal contida na composição das argamassas. O resultado deste efeito implica em valores de resistência mecânica comprometidos em função desta reação como pode ser observado na Figura 46.

### 8.2.3 Análise térmica das argamassas submetidas ao processo de cura externa

As Figuras A, B, C e D apresentam as análises térmicas das argamassas submetidas a cura externa por períodos de 90, 210, 360 e 512 dias que estão expostas no Apêndice E.

Pode-se observar nas idades iniciais de 90 e 210 dias de cura a presença dos picos endotérmicos referentes ao hidróxido de cálcio, que com o avanço da cura vai perdendo sua intensidade, enquanto que o carbonato de cálcio tem seus picos intensificados. Para as idades de 360 e 512 dias de cura, observa-se o total consumo do hidróxido de cálcio.

Para as composições referentes a cura aos 210 dias observa-se na temperatura de 401°C, pico endotérmico referente à inversão cristalográfica do quartzo  $\alpha$  em quartzo  $\beta$ . Também se observou pico endotérmico em 778°C, relacionado, provavelmente, ao carbonato de cálcio.

Para este traço pôde-se observar com mais intensidade em relação ao traço 1:2:6 o surgimento do bolor. Acredita-se que pode ser devido a quantidade maior de poros onde nestes o acúmulo de água foi maior. Diante disto, entre as temperaturas de 215°C e 450°C foram observadas bandas exotérmicas, referentes à presença de matéria orgânica desenvolvida durante o tempo de exposição das argamassas as intempéries, nas idades de cura mais avançadas (210, 360 e 512 dias) resultados semelhantes foram encontrados por Souza (2008).

Em virtude disto salienta-se que, para este traço os corpos de prova apresentaram-se de forma muito fragilizada, se encontrando já em estado de deterioração pela ação das intempéries.

## **8.2. Registro fotográfico das argamassas submetidas ao processo de cura externa**

A Figura 52 apresenta os corpos de prova das argamassas de traço 1:2:6 nos teores de substituição em sequência de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 30% antes de serem expostas as condições climáticas naturais.

Na Figura 52, percebe-se que as argamassas apresentam-se isentas de qualquer formação de bolor e degradação das superfícies perfeitamente visíveis.



**Figura 52** - Argamassas antes de serem expostas ao meio ambiente

As Figuras 53 A e B apresentam imagens dos corpos de prova das argamassas de traço 1:2:6 e 1:2:8, expostas as condições climáticas naturais ao longo de 90, 210, 360 e 512 dias de cura, representadas pelas letras A e B respectivamente.

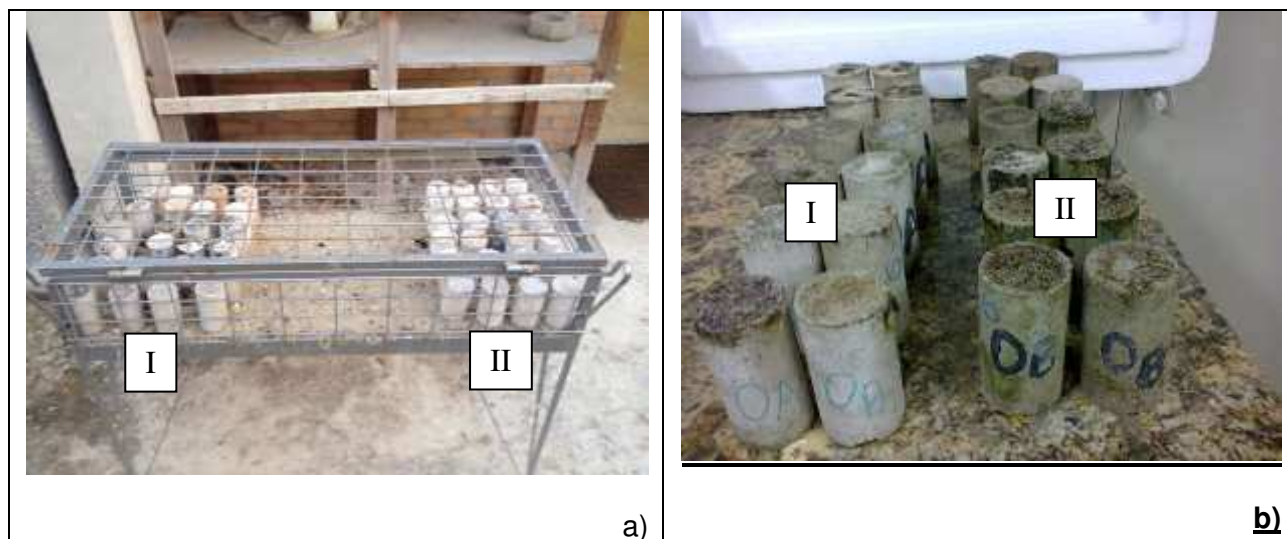
Vista superficial das argamassas de traço 1:2:6 e 1:2:8 aos 210 dias de cura externa

Argamassas de traço 1:2:6 e 1:2:8 aos 90 dias de cura externa



**Figura 53 A** - Argamassas expostas ao meio ambiente  
Fonte: Autor 2012

A Figura 53 B apresenta as argamassas de traço 1:2:6 (I) e 1:2:8 (II) expostas aos 210 dias de cura.



**Figura 53 B - Argamassas expostas ao meio ambiente**  
Fonte: Autor 2012

Observa-se em (b), que a argamassa II sofre mais influência da ação do tempo do que a argamassa I, isso poderá estar associado a resistência maior do traço (I), sendo considerado mais forte sendo comprovado ao longo dos ensaios aos quais foram submetidas.

A Figura 53 C apresenta os corpos de prova das argamassas aos 512 dias de cura externa.



**Figura 52 C - Argamassas expostas ao meio ambiente por 512 dias**

Em virtude da exposição ao ambiente natural, pode-se observar o estado de degradação apresentado pelas as argamassas: (a direita) a

argamassa de traço 1:2:8 e (a esquerda) a argamassa de traço 1:2:6. Ambas com o aspecto escuro afetado devido a proliferação da matéria orgânica (bolor) desenvolvidos na superfície das mesmas.

Percebe-se ainda influência maior desta exposição para a argamassa de traço 1:2:8, que degradou com maior intensidade, além de conservar um cheiro forte, bem como fragilidade de ruptura. Comportamento semelhante também foi observado para as argamassas aos 360 dias de cura.

## 9 Conclusões

- Os resíduos do beneficiamento do caulim são constituídos por caulinita, quartzo e mica e apresentam distribuição granulométrica e composição química que se encontram de acordo com os requisitos da normalização para materiais pozolânicos.
- O resíduo de caulim apresentou-se com uma elevada área superficial, proveniente da eficiência do processo de moagem;
- A partir de 600°C ocorreu a total desidroxilação da caulinita para as temperaturas analisadas na queima do resíduo de caulim;
- Os resultados da atividade pozolânica usando como parâmetro a resistência a compressão simples expressam que o resíduo de caulim apresenta-se com valores de resistência elevados;
- O índice de atividade pozolânica de 91,8% apresentou próximo aos valores considerados para uma pozolana de alta reatividade.
- As argamassas com incorporação do resíduo de caulim calcinado apresentaram resistências mecânicas superiores as prescritas pela NBR 13281 (2001);
- Para as argamassas de traço 1:2:6 e 1:2:8 verifica-se que o teor máximo de substituição do cimento pelo resíduo de caulim é 20%.
- Os resultados da atividade pozolânica usando como parâmetro a resistência a compressão simples expressam que o resíduo de caulim apresenta-se com valores de resistência elevados.
- Os valores de resistência a compressão simples e a tração na compressão diametral para o teor de substituição de 30% apresentaram-se com valores inferiores ao da argamassa de referência;
- As difratometria de raios-X e análises térmicas para as argamassas incorporadas com resíduo de caulim curadas internamente, externamente e sob envelhecimento acelerado apresentaram neossilicatos de cálcio e alumínio ou etringita (primária), silicato de cálcio hidratado, potlandita e calcita para todas as composições.



- A introdução do resíduo de caulim calcinado nas argamassas de traço 1:2:6 submetidas aos ciclos de molhagem e secagem apresentou um acréscimo da resistência mecânica para os ciclos 10 e 30 nos teores de substituição de 5% e 10%;
- As argamassas de traço 1:2:6 apresentaram melhor desempenho mecânico em relação ao traço 1:2:8;
- Com a evolução das idades na cura externa, a resistência mecânica para a argamassa 1:2:6 teve um melhor desempenho do que para as argamassas 1:2:8, onde esta sofreu mais devido a ação das intempéries;
- As análises térmicas e por difratometria de raios-X para as argamassas incorporadas com resíduo de caulim curadas internamente, externamente e sob envelhecimento acelerado apresentou carbonatação do hidróxido de cálcio para todas as composições, resultado da cal livre na composição dos traços;

## **10 Conclusão final**

Através da pesquisa realizada pode-se concluir que é viável a substituição parcial do cimento Portland por resíduo de caulim pozolânico para a obtenção de argamassas de assentamento e revestimento nos traços 1:2:6 e 1:2:8 para uso na construção civil.

## **11. Sugestões para trabalhos futuros**

- Redução da temperatura de queima e do tempo de permanência do resíduo no forno.
- Expandir este estudo para outros traços segundo Pini.
- Estudar as patologias nas argamassas avaliadas.

## 12. Literatura Citada

“Cement Industry and CO<sub>2</sub> Performance - Getting the Numbers Right”  
Disponível: em <<http://WWW.wbcasd.org/plugins/docseach/details>>. Acesso em 18 dezembro de 2010.

ABCP- Associação Brasileira de Cimento Portland. Acesso julho de 2014  
Disponível em:

[http://www.abcp.org.br/conteudo/wpcontent/uploads/2009/12/press\\_kit.pdf](http://www.abcp.org.br/conteudo/wpcontent/uploads/2009/12/press_kit.pdf)

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Cal Hidratada para Argamassas”, NBR – 7175, 1992.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Cal Virgem para Construção”, NBR – 6453, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais pozolânicos – Especificação, NBR 12653 Rio de Janeiro, 1992.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas – Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos- Desempenho. Requisitos para os sistemas estruturais. P2 NBR 15575 2010.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas - Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas- Especificação. NBR 13749 1996.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Areia Normal para Ensaio de Cimento”, NBR – 7214, 1982.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Metacaulim para uso com o cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. NBR 15894 P1(2010) Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Solo-cimento – Ensaio de Durabilidade por Molhagem e Secagem – Método de Ensaio, NBR 13554, (1996);

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. Cimento Portland Determinação da resistência à compressão, NBR 7215. Rio de Janeiro, 1994.

ACI - American Concrete Institute - COMMITTEE 232. Use of natural pozzolans in concrete (ACI 232.1R). *ACI Materials Journal*. v. 91,n. 4, p. 410-426, 1994.

ACI - American Concrete Institute. *Use of raw or processed natural pozzolans in concrete*. ACI Committee Report 232.1R-00, 24 p. 2004.

ACI - American Concrete Institute. *Use of raw or processed natural pozzolans in concrete*. ACI Committee Report 232.1R-00, 24 p. 2004.

ANDRADE, F. L. F, Varela, M. L, Dutra, R. P. S. b, Nascimento, Melo, R. M., D. M. A. Paskocimas, C. A. Avaliação da Potencialidade de Uso do Resíduo Proveniente da Indústria de Beneficiamento do Caulim na Produção de Piso Cerâmico, *Revista Cerâmica Industrial*, v.14 Janeiro/Fevereiro, 2009.

ANDREOLA, F. Utilisation of municipal incinerator grate slag for manufacturing porcelainized stoneware tiles manufacturing. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 22, p. 1457-1462, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Pozolanas- Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland - NBR-5752. Rio de Janeiro, 1992.

ASTM – American Society for Testing and Materials, ASTM C618, Specifications for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement, 1989.

BARATA, M. S. Dal Molin, D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 2, nº 1, p. 69-78, jan./mar. 2002.

BEZERRA, I. M. T. Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010. 108p. CASTRO, W. A. M. Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil. Dissertação de Mestrado. UFCG- Campina Grande, 89f. 2008.

BRITO, L.A.T, Avaliação e análise para métrica de compressão diametral sobre cargas repetidas em misturas asfálticas. Dissertação de mestrado. UFRS Porto Alegre, 2006.

CEOTTO, L. H.; Banduk, R. C.; Nakakura, E. H. Revestimentos de Argamassas: boas práticas em projeto, execução e avaliação. *Recomendações Técnicas HABITARE*, nº1. Porto Alegre: Pro-livros, 2005.

CETEM - ARGILA – CAULIM - Rochas e Minerais Industriais - Adão Benvindo da Luz, Antonio R. de Campos, Eduardo Augusto de Carvalho Luiz Carlos Bertolino, Rosa Bernstein Scorzelli. RJ, 2 ed. 2008.

CHAIPANICH, A., NOCHAIYA, T. Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes. *Jornal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v.99, n.2, 2010, pp.487-493

COELHO, A. C. V.; Souza Santos, P. S.; Souza Santos, H. S.; *Argilas Especiais Quim. Nova*, v.30, p.146, 2007.

COIMBRA, M. A, W. N. dos Santos, M. R. MORELLI - Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil *Cerâmica* nº48 Abr/Mai/Jun 2002.

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. *Resolução nº. 1524/1982*. Disponível em <<http://www.dnppm.gov.br/conteudo.asp>>. Acesso em 20 outubro de 2010.

CORDEIRO, G. C e DÉSIR, J. M. Potencial de argila caulinitica de Campos de Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. *Cerâmica* 56 p. 71-76, 2010.

COSTA, C. G. Incorporação do Resíduo de Caulim em Concreto Asfáltico. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Natal-RN, 106f . 2006.

DIAS, S.L. Incorporação de resíduos de caulim em argamassas de assentamento e revestimento para uso em construção civil- avaliação da atividade pozolânica. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Campina Grande, 2010.

DUTRA, R; Beneficiamento dos minerais industriais. 49º Congresso brasileiro de cerâmica, São Pedro – SP, 2005.

FARIA, P. Argamassas sustentáveis. 2ª Conferência construção e reabilitação sustentável de edifícios no espaço Lusófono. 2012

FARIAS Filho, J. , Menezes, R. Ferreira, Santana, L. N. L. Neves, G. A. Ferreira, H. C. Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos *Revista Cerâmica* v.57 p.395-403 2011.

FARIAS FILHO, J. S. Rolim, R. D. Toledo Filho, Rev. Bras. Eng. Agr. Amb. 4, 3 (2000) 437.

GRUBER, K.A. Ramlochan, T. Boddy, A. Hooton, R.D. Thomas, M. D. Alncreasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. Cement & Concretes v.23, p.479-484 2001.

HELENE, P. R. L. Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concretos,2003.

ISO – International Organization for Standardization – Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles. ISO 15686-1. Switzerland, 2001.

ISO -International Organization for Standardization 15686-1 2001.

JOHN, V. M. Sato, N.M N. Durabilidade de componentes da construção. In: Coletânea Habitare - Construção e Meio ambiente, Porto Alegre: ANTAC, v.7, p.20-57, 2006.

JOHN, V. M., Agopyan, V. & Prado, T. A. Durabilidade de Compósitos de Cimentos e Fibras Vegetais. III Seminário Internacional Durabilidade de Materiais, Componentes e Estruturas. PCC USP São Paulo, Julho/1997

KAKALI, G. Perraki, T. Tsvilis, S. Bandojiannis, E. - Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. Applied Clay Science, London UK, v. 20, p.73-80, 2001.

KAPEL, I.C, Neves, G.A, Ferreira, H. C, Previsão da atividade pozolânica através do uso da análise térmica diferencial- resultados preliminares. Cerâmica, 35, 1989.

LIMA, J. M. Estudo de aproveitamento do resíduo do beneficiamento de caulim como matéria prima na produção de pozolanas para cimentos compostos e pozolânicos. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil), UFPA, Belém - PA, 2004.

LIMA, S. A E Rossignolo, J. A. - Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios. Acta Scientiarum. Technology Maringá, v. 32, nº 4, p. 383-389, 2010.

LIMA, S.A. Rossignolo, J.A. Análise da pozolanicidade da cinza da casca da castanha do caju pelo método de difratometria de raios X. *Revista Matéria*, v. 14, nº 1, p. 680 – 688, 2009.

LUCAS, D. e Benatti, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, v. 1, nº 3, p. 405-418, set./dez. 2008.

LUZ, A. B. Campos, A. R. Carvalho, E. A. Bertolino, L. C.- CAULIM - Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia- CETEM, 2005.

LUZ, A. B. Campos, A. R. Carvalho, E. A. Bertolino, L. C. Scorzelli, R. B Argila Caulim Rochas e Minerais Industriais – CETEM, 2ª Edição, 2008.

LUZ, A. B. Campos, A. R. Carvalho, E. A. Bertolino, L. C. Scorzelli, R. B. - Em Rochas e Minerais Industriais. CETEM/MCT: Rio de Janeiro, 2ª ed, cap. 12. 2009.

LUZ, A. B. Chaves, A. P. Em Rochas e Minerais Industriais; Luz, A. B. Albuquerque, G. A. S. C., eds.; CETEM/MCT: Rio de Janeiro, v. 1, cap.1. 2000.

LUZ, A. B. Damasceno, E. C. Em série Tecnologia Mineral; Fernandes, F. R. C., ed. CETEM/MCT: Rio de Janeiro, vol. 65, cap. 1. 1994.

M. A. COIMBRA, W. N. dos Santos, M. R. Morelli, *Cerâmica* 48 (2002) 44.

MALHOTRA, V. M. and Mehta, P. K. *Advances in concrete technology Pozzolan and cementitious materials* v.1, 1996.

MASSENA , R. M. L. C. M - Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural .Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção UNL- Lisboa, p.86 2011.

MEHTA, P. K. “Natural Pozzolans”. *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, CANMET-SP-86- 8e, Canadian Government Publishing Center, Supply and Services. Ottawa, v. 1, p.1-33, 1987.

MEHTA, P. K. Studies on blended portland cements. *Cement and Concrete Research*. Pennsylvania, v. 11, p. 507-518, 1981.



MENEZES, R. R.; de Almeida, R. R.; Santana, L. N. L.; Neves, G. A.; Lira, H. L.; Ferreira, H. C. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos. *Cerâmica*, v.53, p.192-199, 2007.

MENEZES, R.R Neves A.G, Souza J, Melo A. M, Heber S. Ferreira & Heber C. Ferreira Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* n.6, v.13, p.795–801, 2009.

MENEZES, R.R. Ferreira, H. S. Neves , G. A. Ferreira, H. C. Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção – revisão. *Cerâmica* 2006.

MONTANHEIRO, J.F.A.N. JANASI, V. A. YAMAMOTO, J. K. VOGADO, F. P. Vidro Vulcânico Maciço: Pozolana Natural no Oeste *Revista do Instituto de Geociências – USP Disponível on-line no endereço [www.igc.usp.br/geologiausp](http://www.igc.usp.br/geologiausp) - 59 - Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, nº 1, v. 11, p. 59-74, abril 2011.*

MONTE, M. B. M., Carvalho, E. A., Ferreira, O., Cabo, S. S., “Caulim CADAM”. In: SAMPAIO, J. A., LUZ, A. B., LINS, F. F. *Usinas de beneficiamento de minérios do Brasil*, 1 ed. cap. 01, Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia Mineral, 2001.

NABI, M. AL- akhras Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement & Concrete* v.36 p. 1727-1734 , 2006.

INDUSTRIAL MINERALS, July, p. 21, 2001.

Nik, D. O. *Cement Concrete Composites* v.27p. 315, 2005

Nóbrega, Aline Figueirêdo da. Potencial de aproveitamento de resíduos de caulim paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso. UFPB. Dissertação de mestrado. João Pessoa, 2007. 117p.

OLIVEIRA, M. P e Barbosa, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas R. *Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, nº2, v.10, p.490–496, 2006.

RAPOSO T. F. Durabilidade da construção. Estimativa da vida útil de revestimentos de coberturas planas. Faculdade de engenharia da universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

REZENDE, M. L. S. Menezes, R. R. Neves, G. A. Nascimento, J. W. B. LEAL, A. F. Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 61(3): 285-290, jul./set. 2008.

ROCHA, A K. A. Argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim - Parte I: comportamento mecânico. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 61 p.505-512, out./dez. 2008.

ROCHA, A.K.A. Incorporação de resíduo de caulim em argamassas de alvenaria. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. UFCG-PB, 95f. 2005.

ROCHA, CORDEIRO E TOLEDO FILHO, Influência de resíduos de corte de rochas e blocos cerâmicos moídos na hidratação e no empacotamento da pastas cimentícias. IBRACON Structure and Materials Journal, v.6 n. 4 2013.

SABIR, B.B. Wild, S. Bai, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Cement & Concrete Composites v.23 p.441-454, 2001.

SANTOS, P. H. C. A. F. S. Filho. Eflorescência: causas e conseqüências.

SANTOS, P. S. Ciência e Tecnologia de argilas, 2. ed. revisada e ampliada, São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

SHVARZMAN, A.; Kovler, K.; Grader, G. S.; Shter, G. E. The effect of a hydroxylation/amorphization de gree on pozzolanic activity of kaolinite. Cement and Concrete Research, London UK, v.33, p.405-416, 2003.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. Applied Clay Science. n°43, p.392-400, 2009.

SIDERIS, K. K. A. E. Savva, J. Papayianni, Cement Concrete Composites v. 36 p.1047 2006.

SILVA, F. N. G. Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema-Seridó (RN) Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE Rio de Janeiro XVI, 70 p. 2007.

SINAPROCIM – Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento Índices SINAPROCIM Janeiro à Dezembro de 2010. Disponível em: [www.sinaprocim.org.br](http://www.sinaprocim.org.br)

SOUZA SANTOS, P. H. C. Filho, A. F. S. - Eflorescência: causas e conseqüências, UCSAL – BA, 2009. Disponível em: [www.info.ucsal.br/banmon/Arquivos](http://www.info.ucsal.br/banmon/Arquivos) acesso em Julho de 2011.

SOUZA, J. de. Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz. Campina Grande, 2008.

SOUZA, V. C. M. e RIPPER, T. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: PINI, 1998.

SUSTENTABILIDADE – EDIFICAÇÃO – CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. CÂMARA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Guia de Sustentabilidade na Construção. Belo Horizonte: FIEMG, 60p CDU 69.01:658, 2008.

TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry, 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997, 459 p

TORGAI, F.P. e Jalali, S. Betão - Ambiente e Segurança. Universidade do Minho, Portugal, 2011.

TCPO – Tabela de composição de preços para orçamentos. 13. ed. - São Paulo: Pini, 2008.

VARELA, M. L. F. L. Formiga, R. P. S. Dutra, R. M. do Nascimento, C. A. Paskocimas. Influência da adição de resíduo de caulim nas propriedades tecnológicas de uma massa padrão de porcelanato produzido em escala industrial- Cerâmica, p.209-215, 2009.

VASCONCELOS A. R. B. e AKASAKI J. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu Ambiente Construído, Porto Alegre, n. 1 v. 10, p. 77-90, jan./mar. 2010.

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development – The cement sustainability initiative:

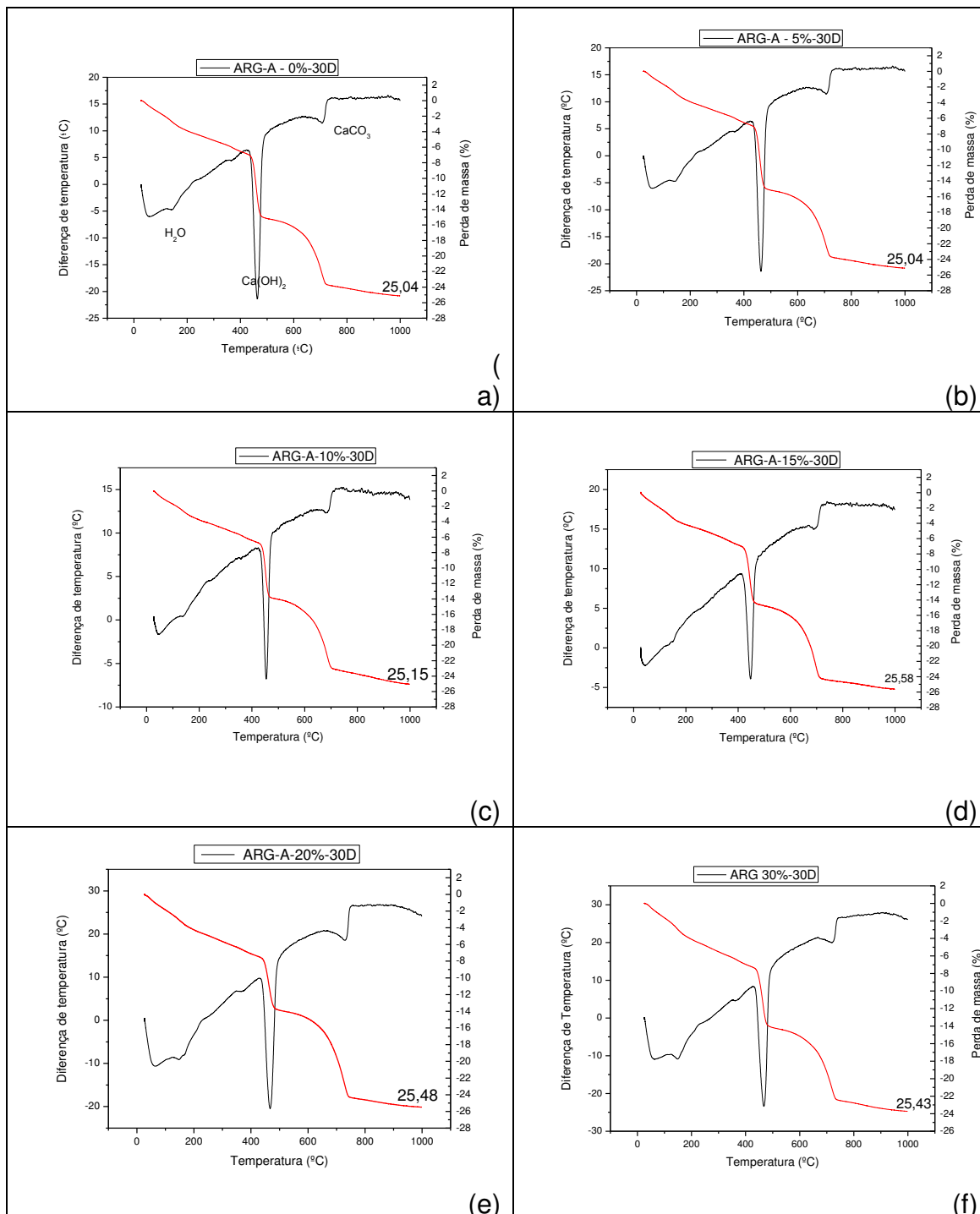
WERLE, A.P, Kazmierczak, C.S, Kulakowski, M. P, Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 213-228, abr./jun. 2011.

WILSON, I. R., Santos, H. S. S. e P. S. Brazilian kaolins: some aspects of the geology and mineralogy. *Cerâmica*, 44, p.118-129, 1998.

## APÊNDICE A

### Análise térmica e gravimétrica das argamassas submetidas a cura interna

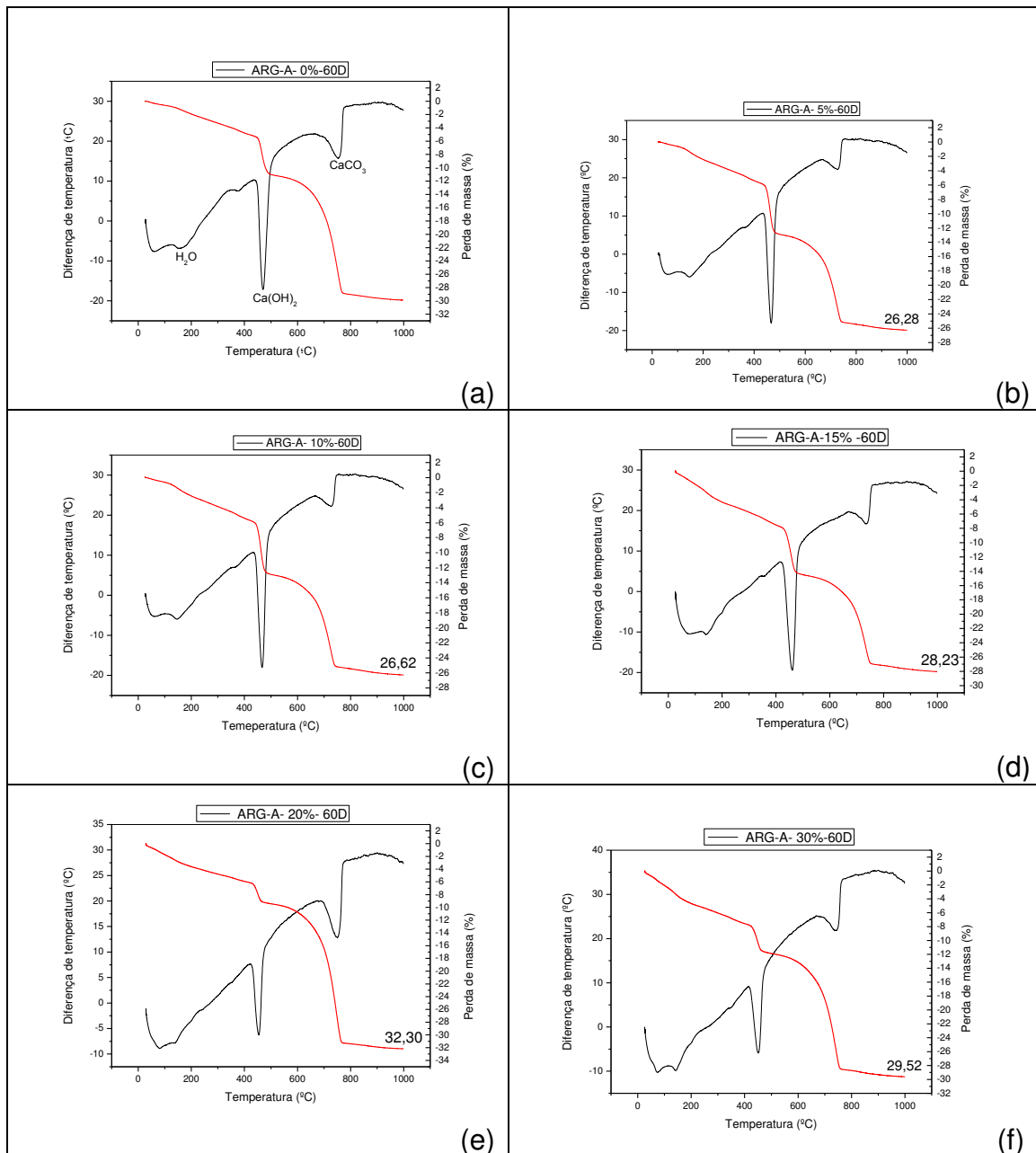
**Figura A** - ATD e TG das argamassas com e sem RC calcinado aos 30 dias de cura de traço 1:2:6.



Fonte: Autor 2012

Legenda: Em (a) amostra com 0% de substituição ; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim;

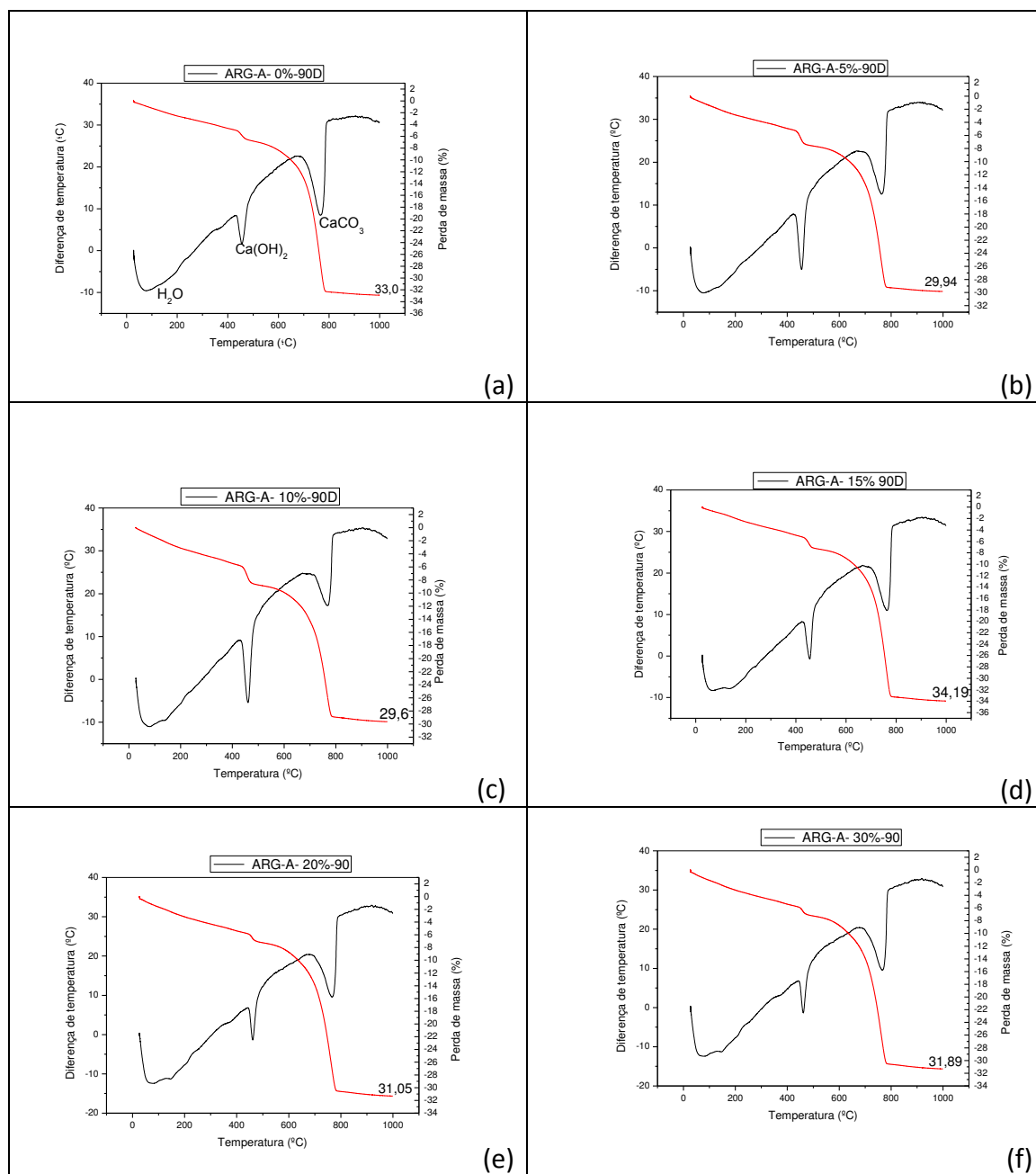
**Figura B - ATD e TG das argamassas com e sem RC calcinado aos 60 dias de cura de traço 1:2:6.**



Fonte: Autor 2012

Legenda: Em (a) amostra com 0% de substituição ; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim;

**Figura C - ATD e TG das argamassas com e sem RC calcinado aos 90 dias de**

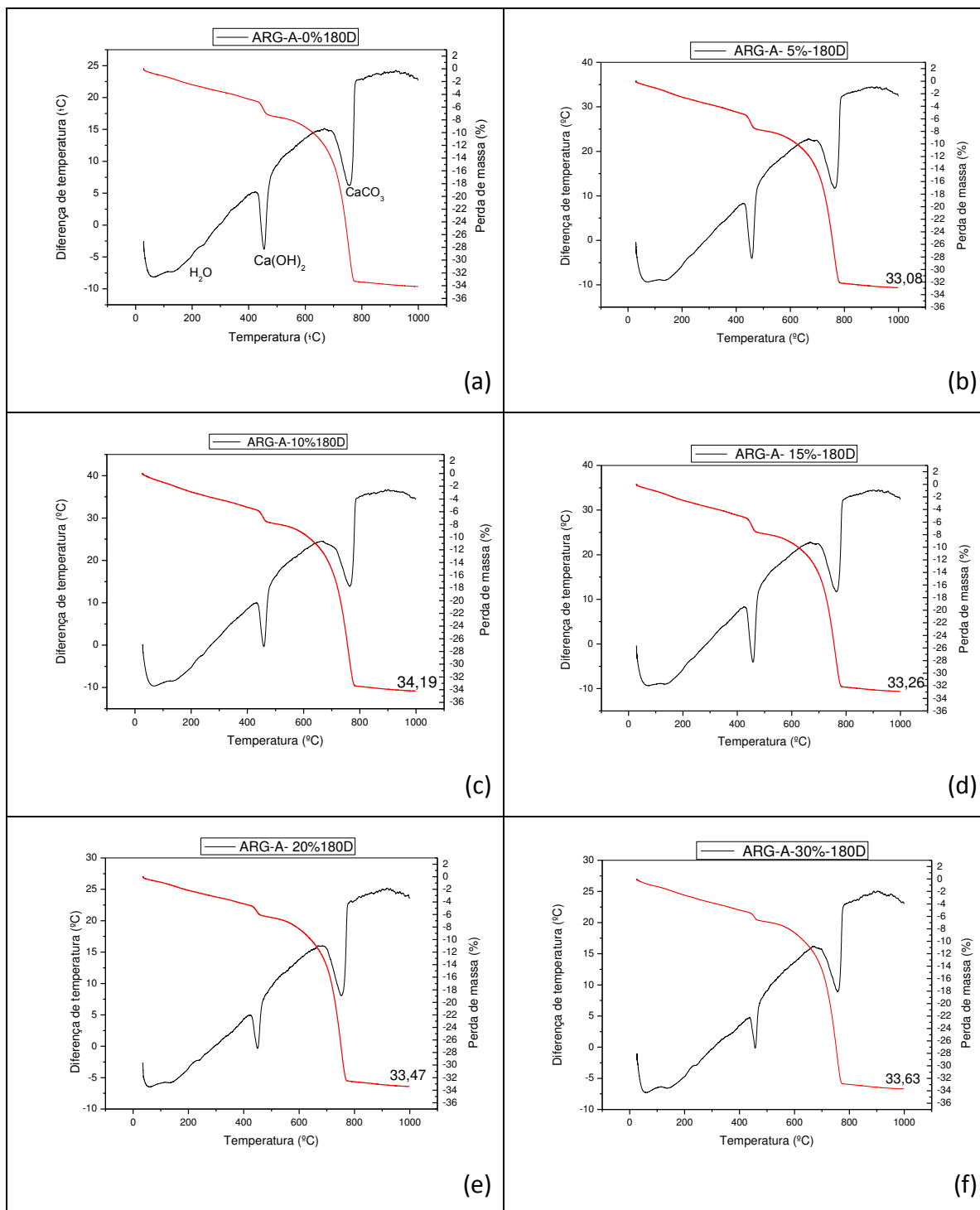


cura de traço 1:2:6.

Fonte: Autor 2012

Legenda: Em (a) amostra com 0% de substituição ; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim;

**Figura D - ATD e TG das argamassas com e sem RC calcinado aos 180 dias de cura de traço 1:2:6.**

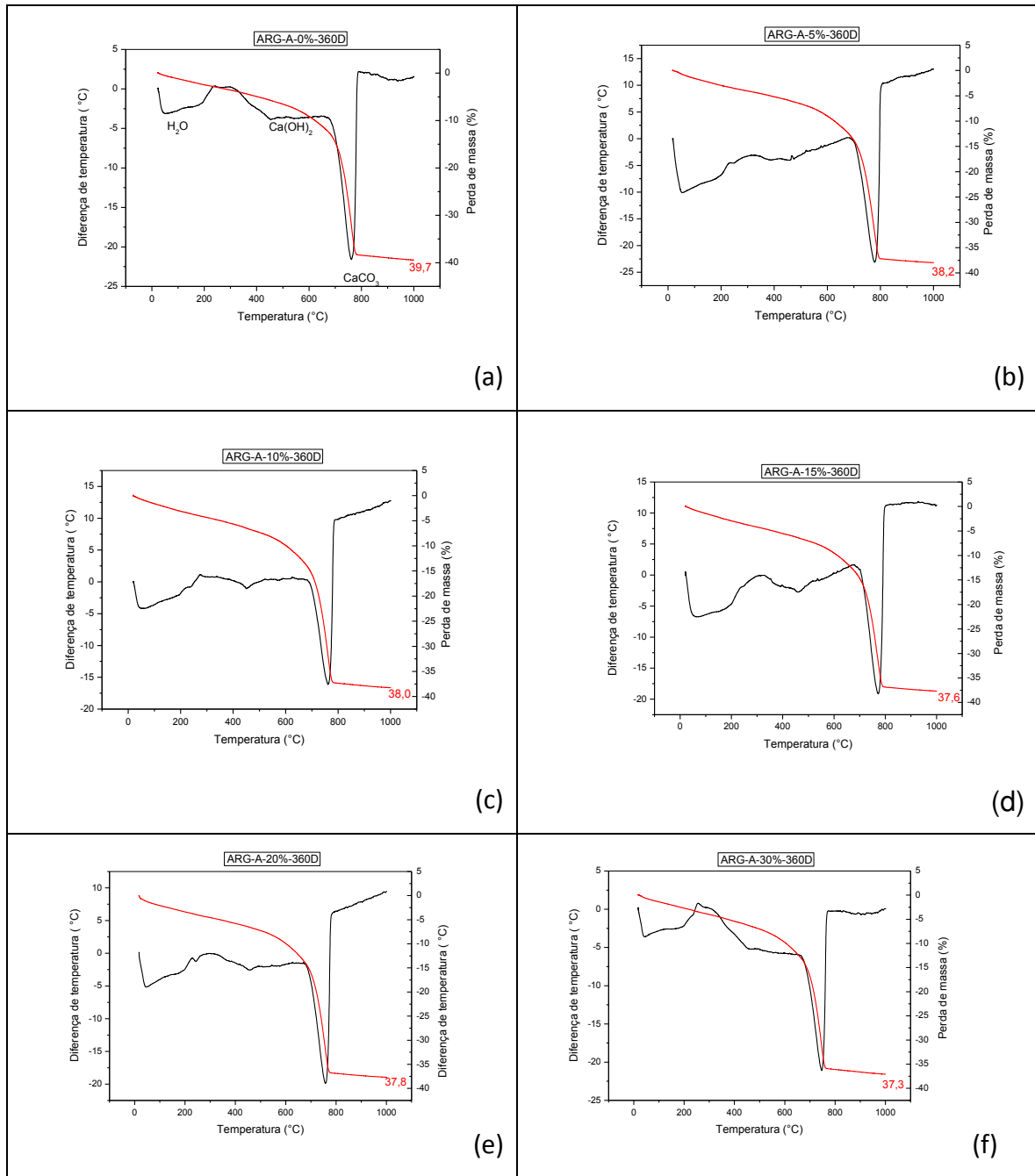


Fonte: Autor 2012

Legenda: Em (a) amostra com 0% de substituição ; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim;



**Figura E - ATD e TG das argamassas com e sem RC calcinado aos 360 dias de cura de traço 1:2:6.**

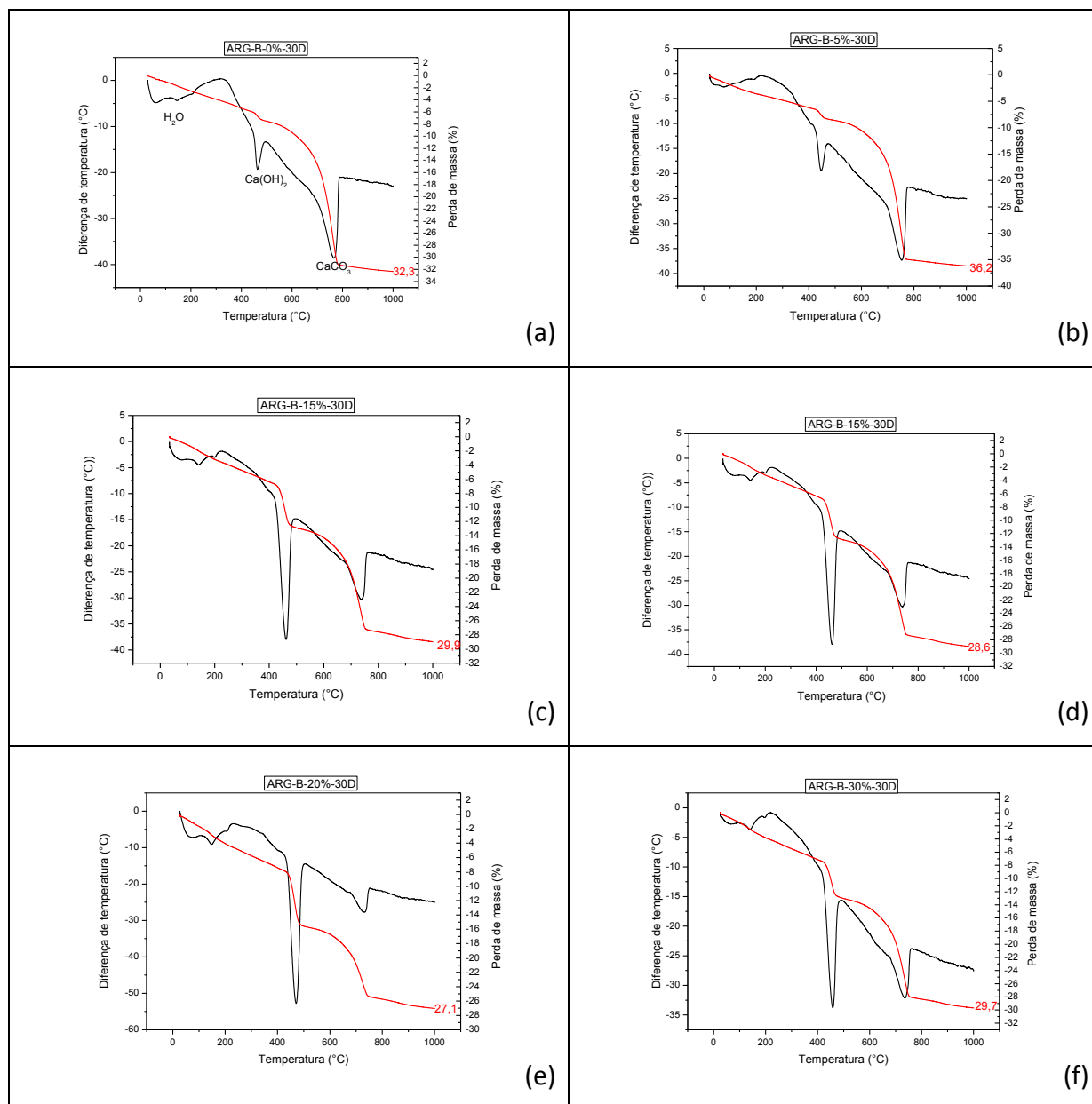


Fonte: Autor 2012

Legenda: Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim;

## APÊNDICE B

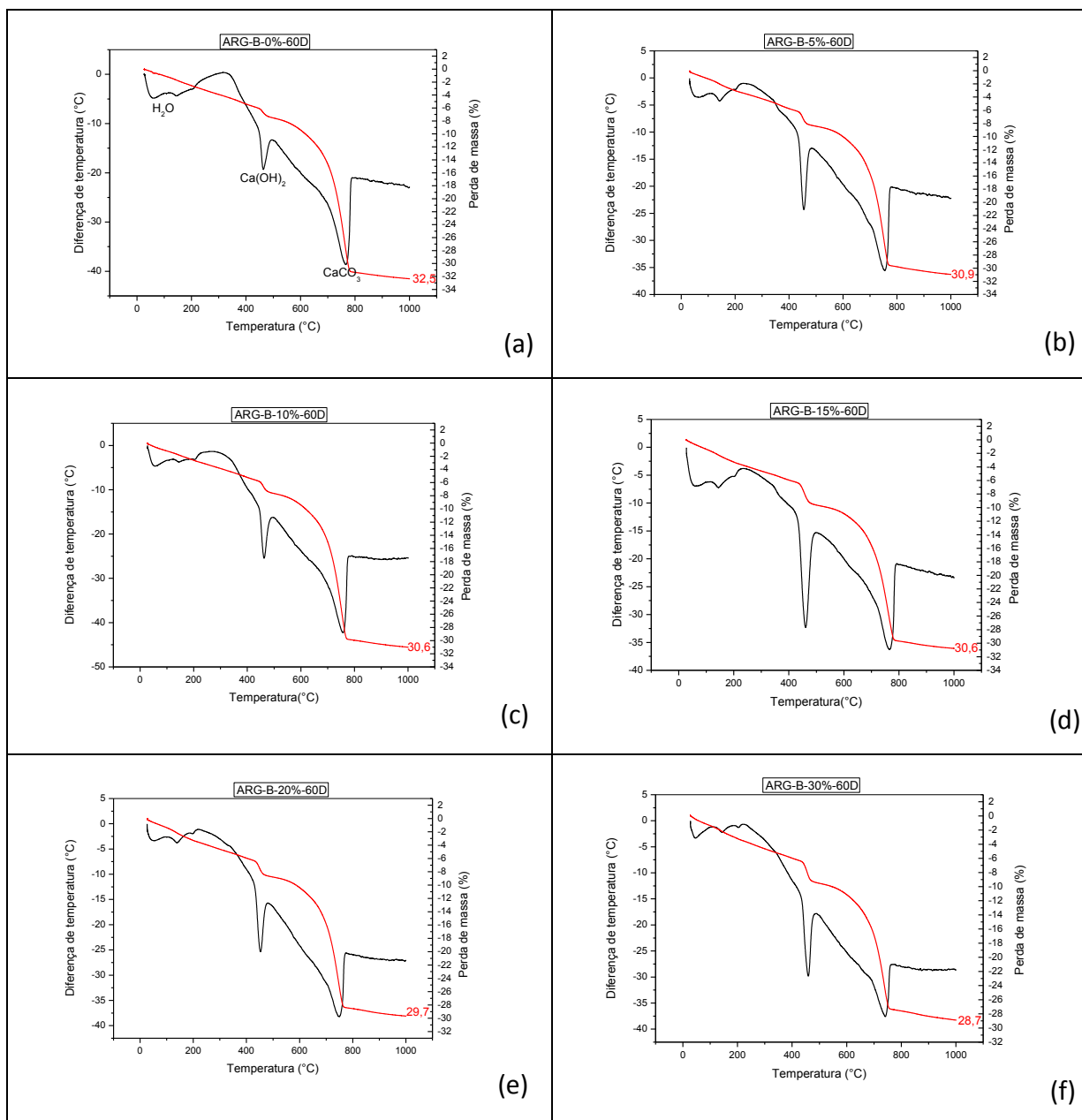
**Análise térmica e gravimétrica das argamassas submetidas a cura interna**  
**Figura A - ATD e TG das argamassas com e sem RC calcinado aos 30 dias de cura de traço 1:2:8.**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim;

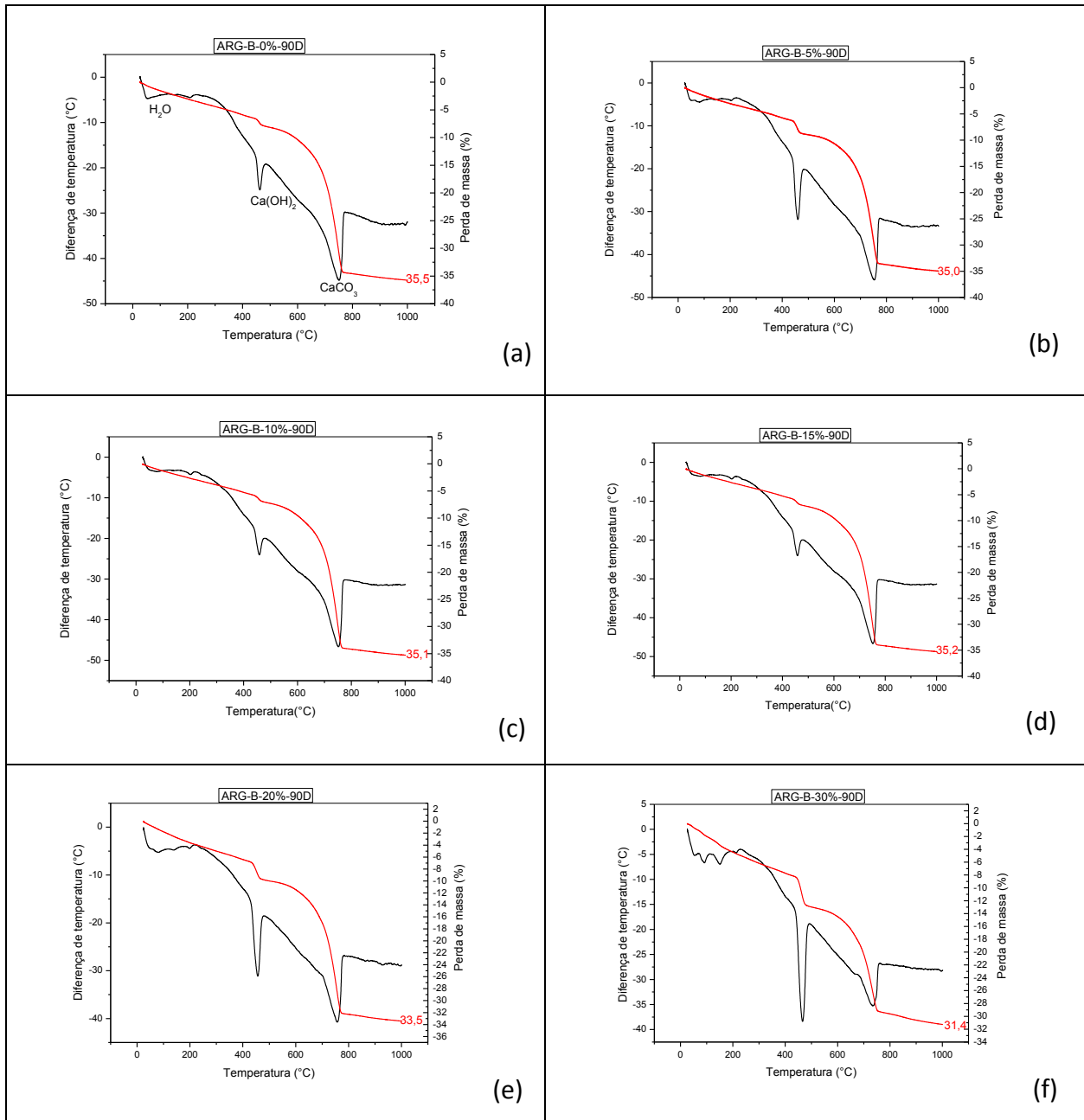
**Figura B - ATD e ATG das argamassas com e sem RC calcinado aos 60 dias de cura**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim;

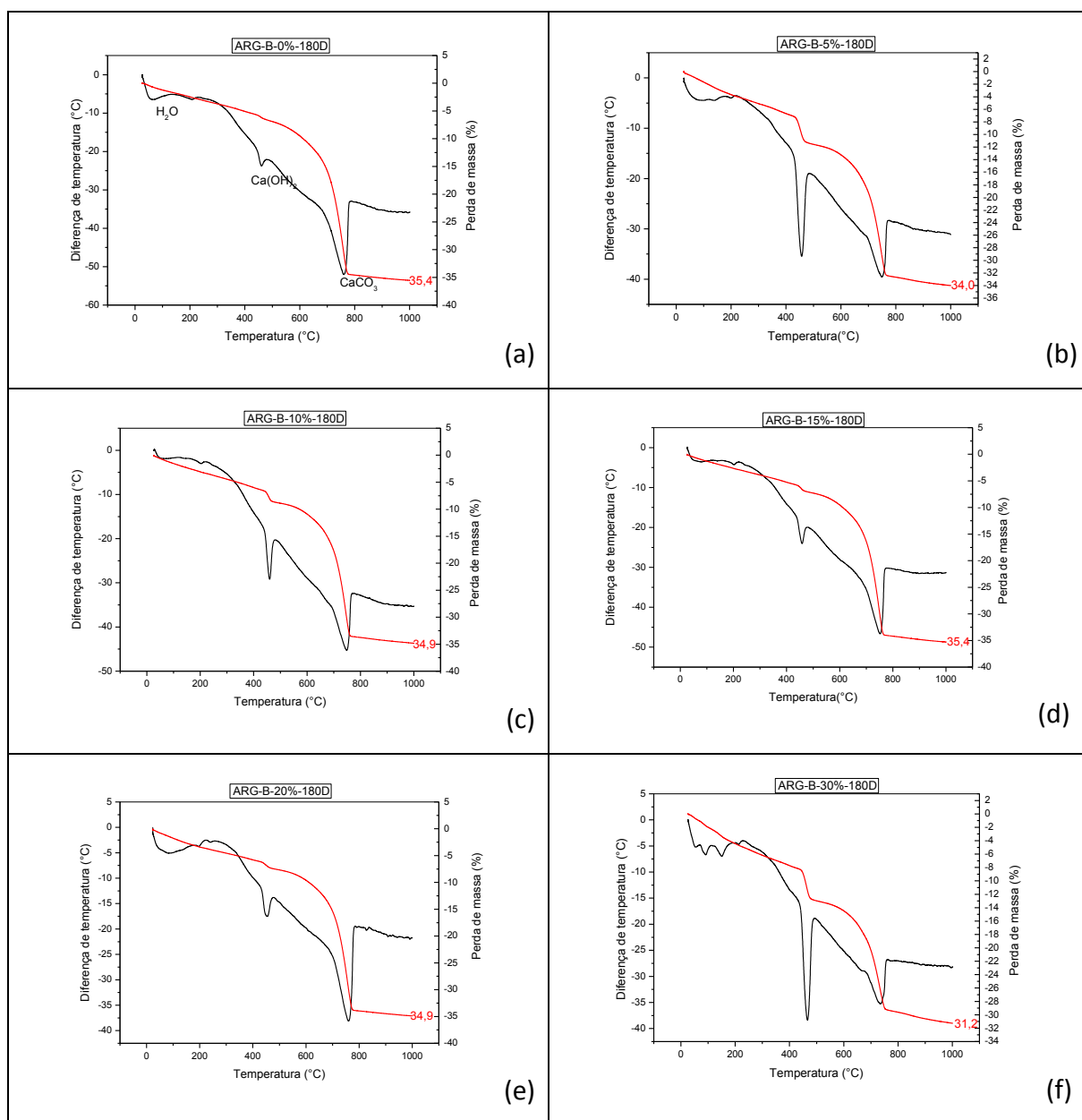
**Figura C - ATD e ATG das argamassas com e sem RC calcinado aos 90 dias de cura**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

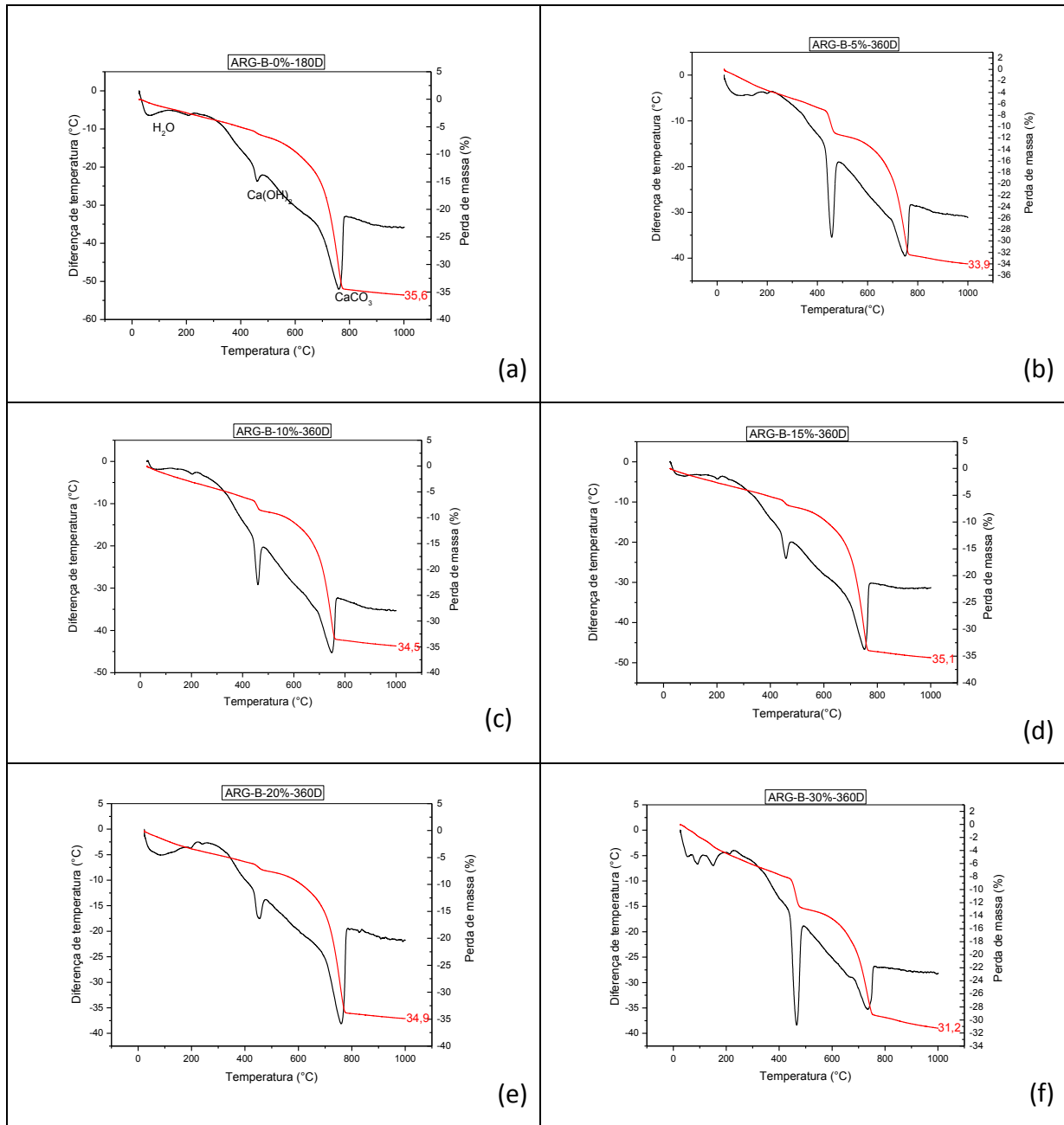
**Figura D - ATD e ATG das argamassas com e sem RC calcinado aos 180 dias de cura**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

**Figura E - ATD e ATG das argamassas com e sem RC calcinado aos 360 dias de cura**



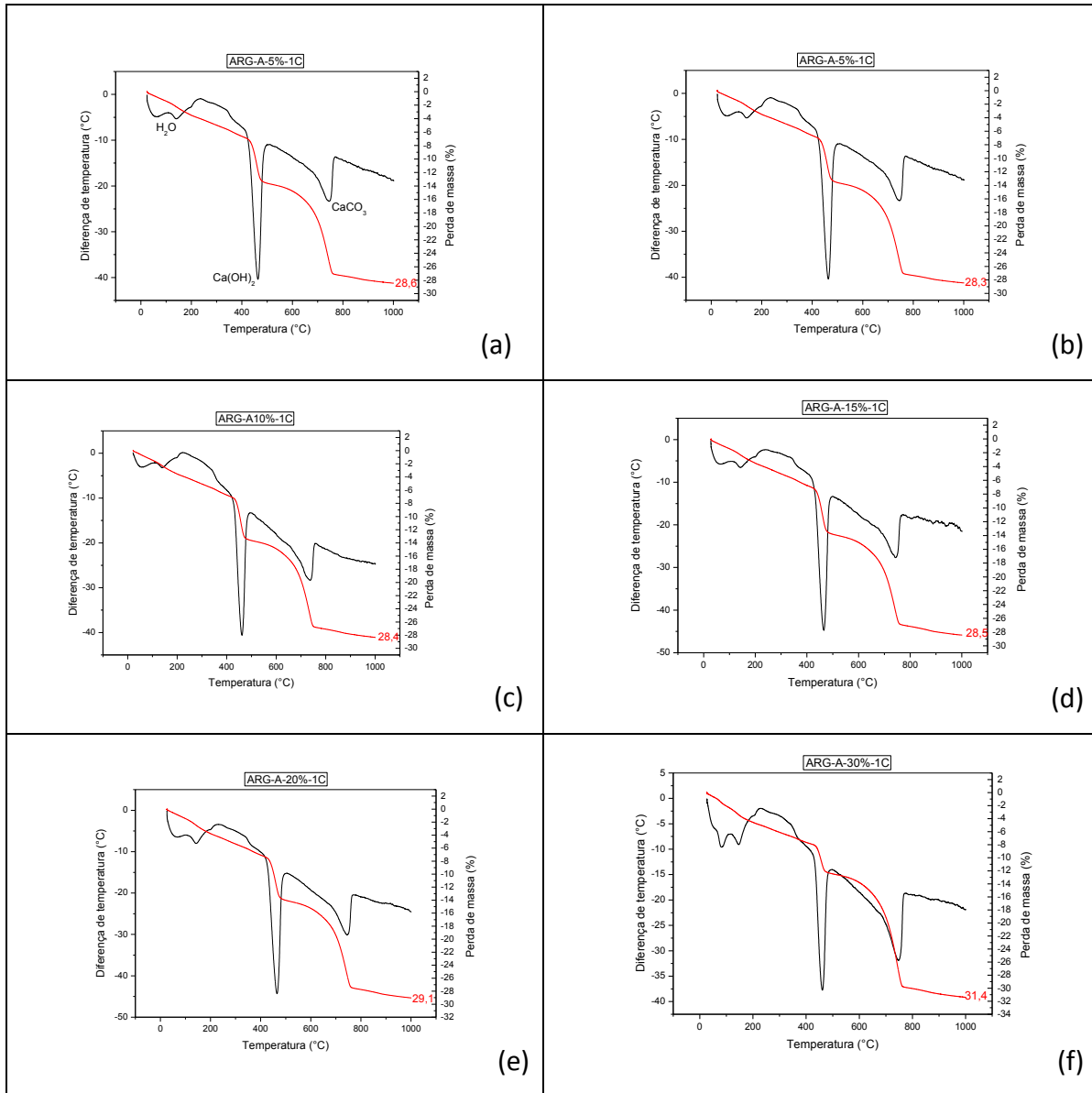
Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim

## APÊNDICE C

### Análise térmica e gravimétrica das argamassas submetidas ao envelhecimento acelerado

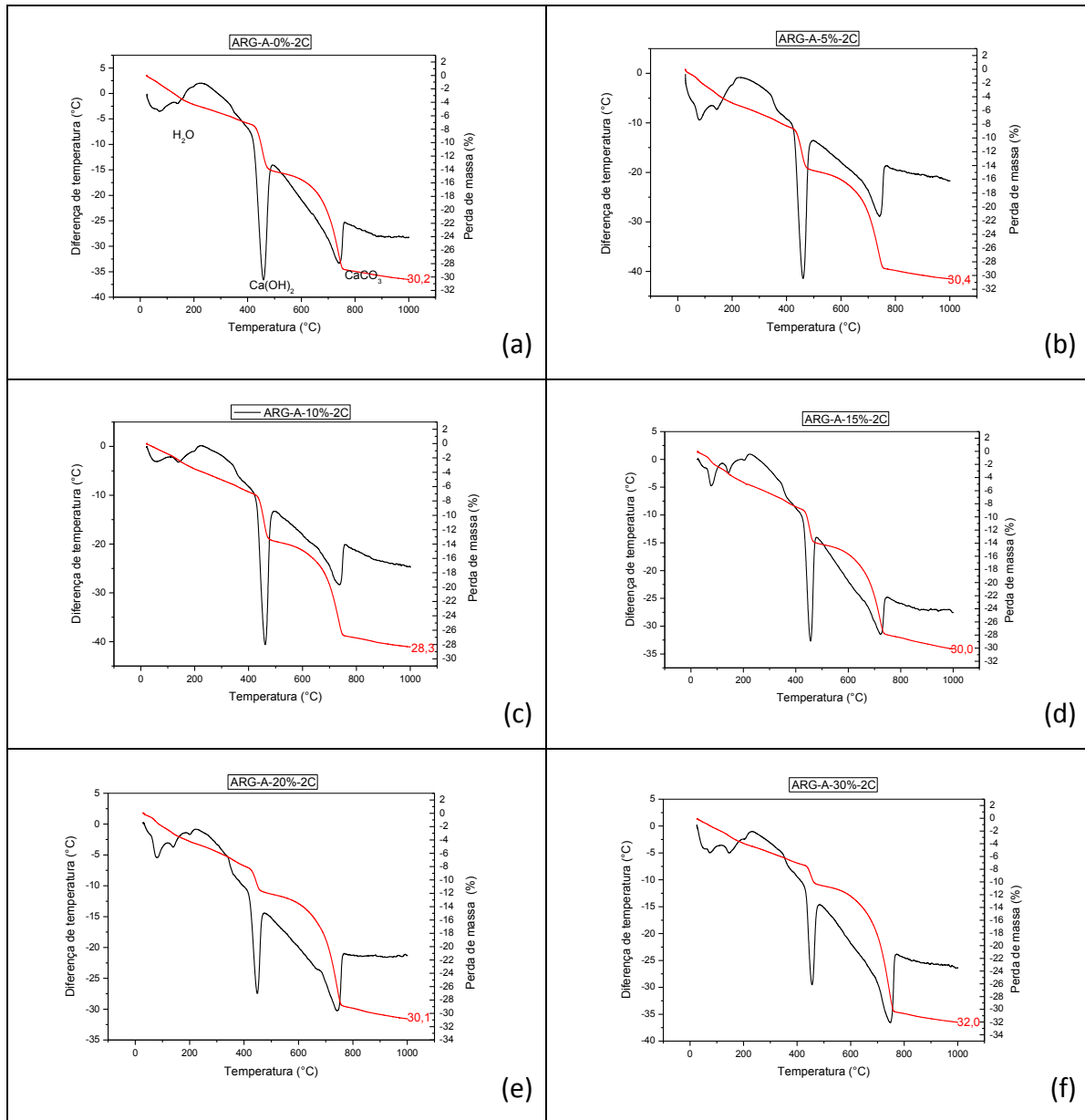
Figura A - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 aos 10 ciclos



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

**Figura B - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 aos 20 ciclos**

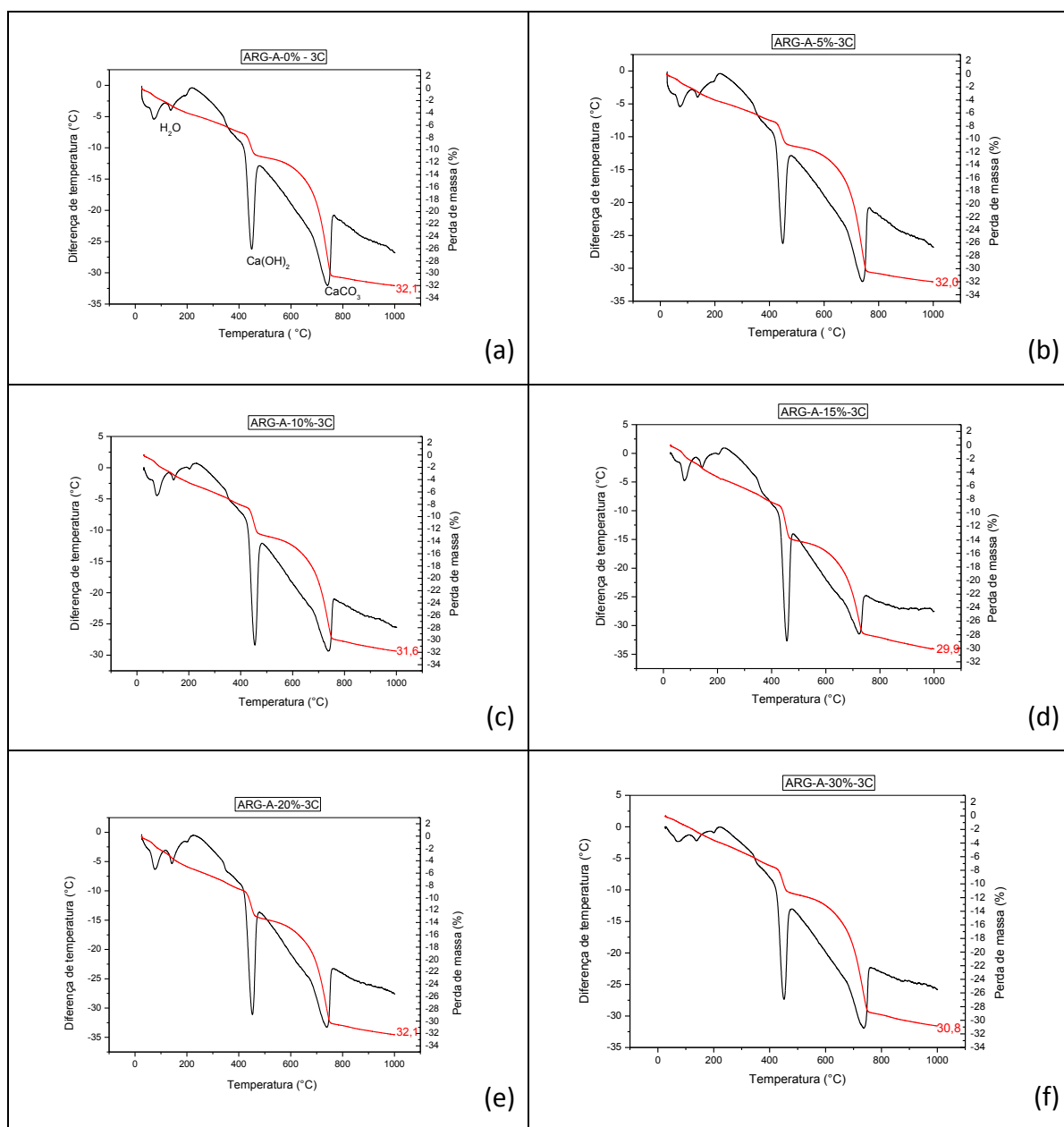


Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.



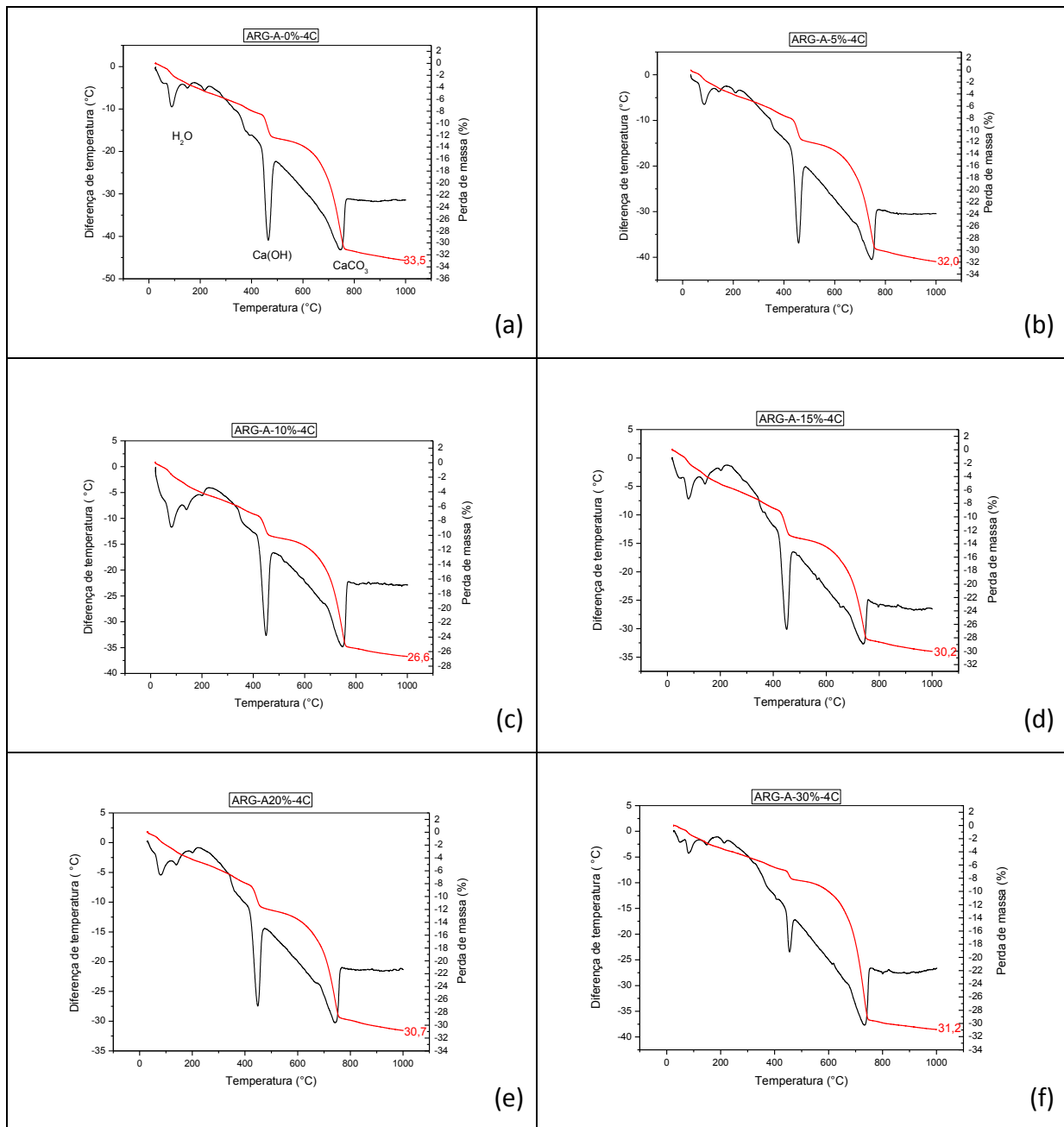
**Figura C - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 aos 30 ciclos**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

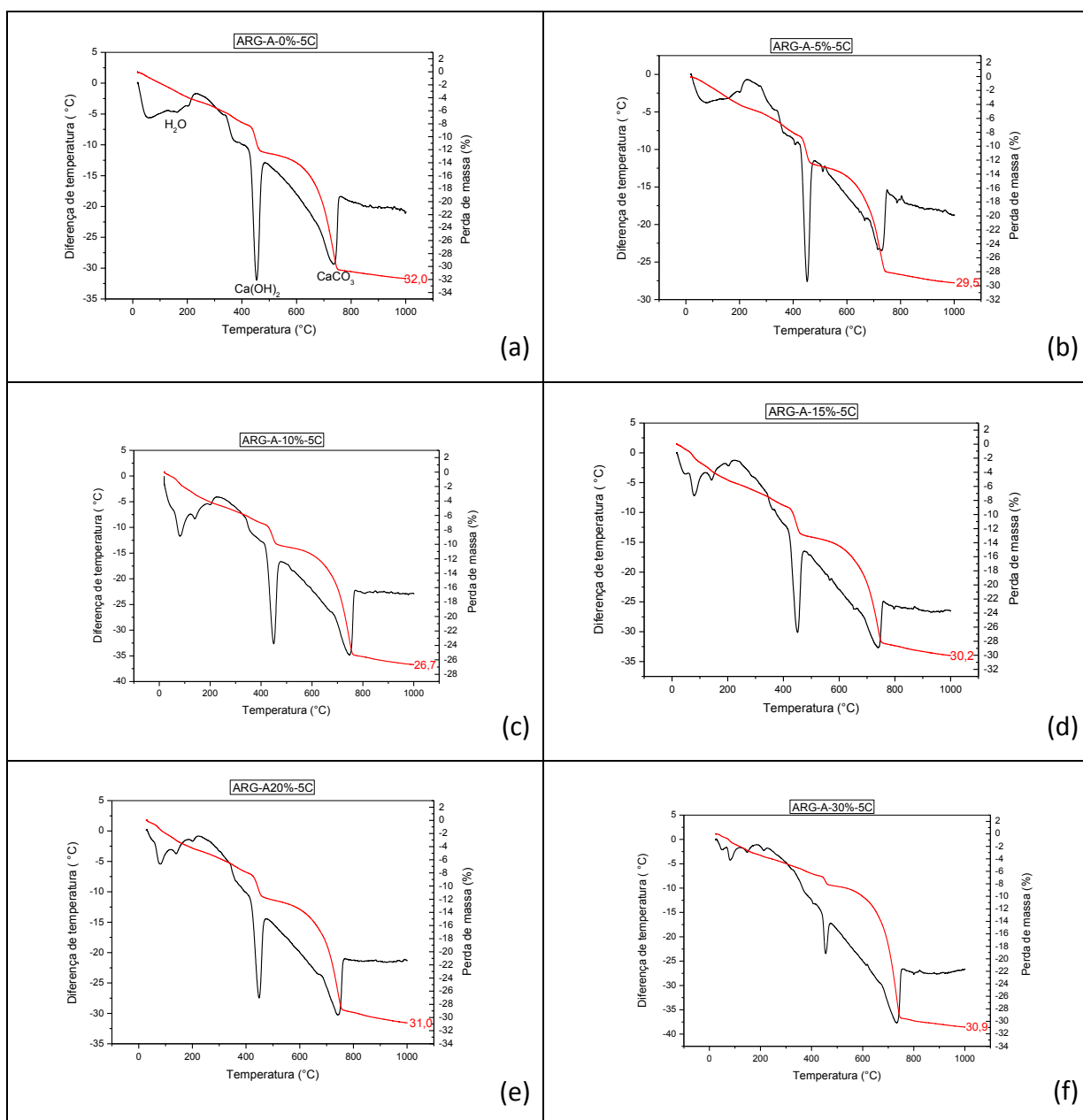
**Figura D - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 aos 40 ciclos**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

**Figura D – ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:6 aos 50 ciclos**



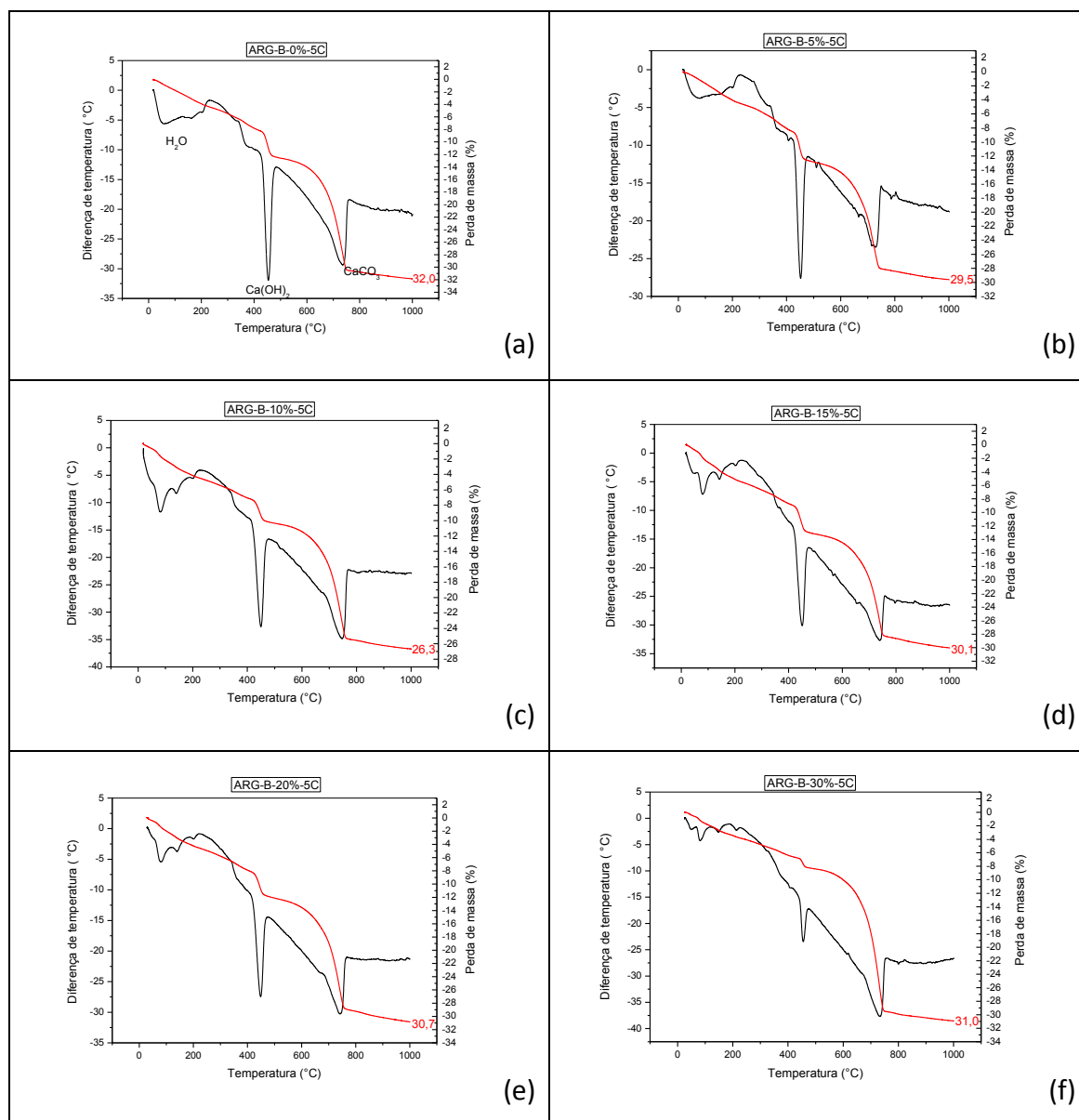
Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

## APÊNDICE D

### Análise térmica e gravimétrica das argamassas submetidas ao envelhecimento acelerado

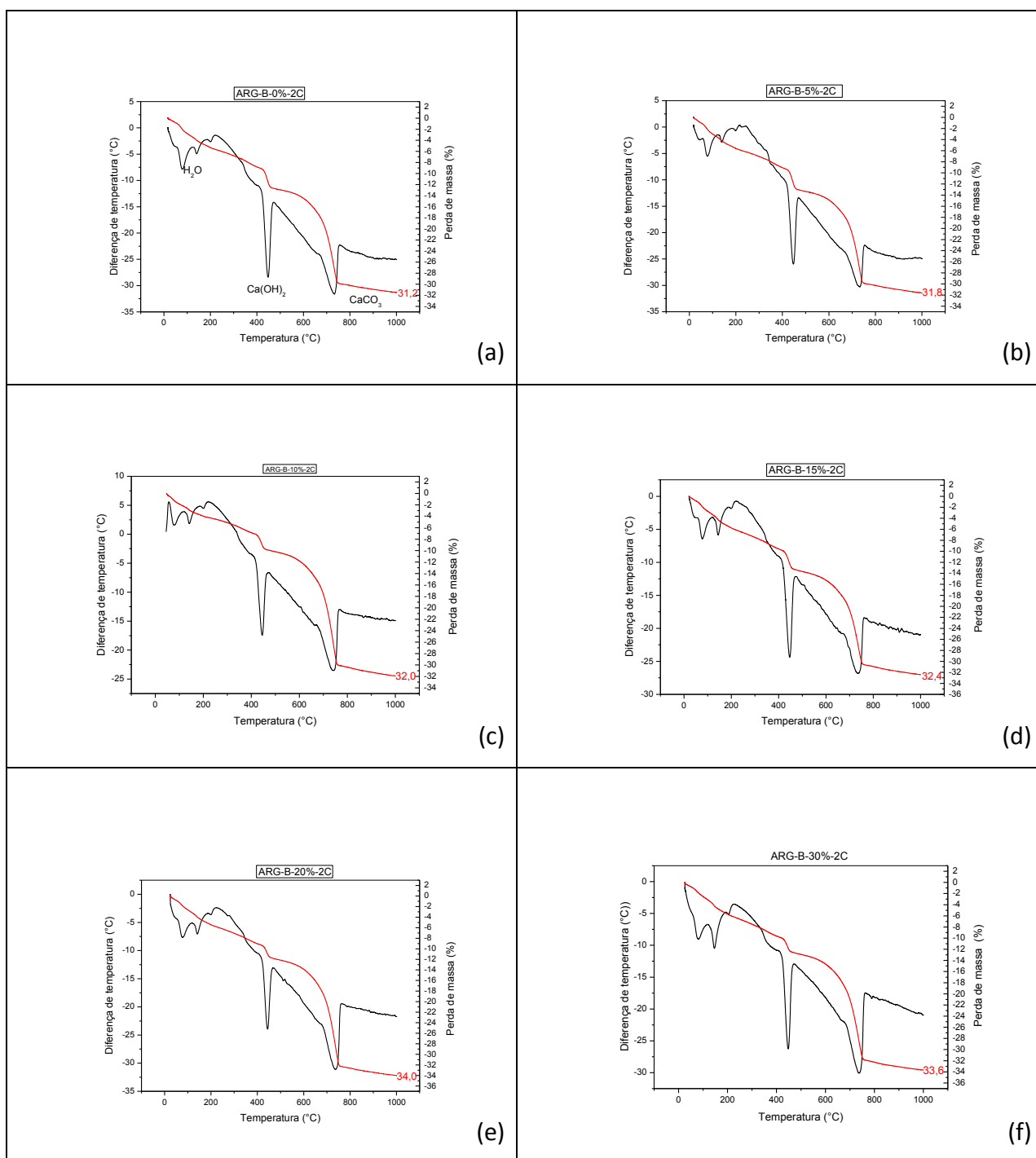
Figura A – ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 aos 10 ciclos



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

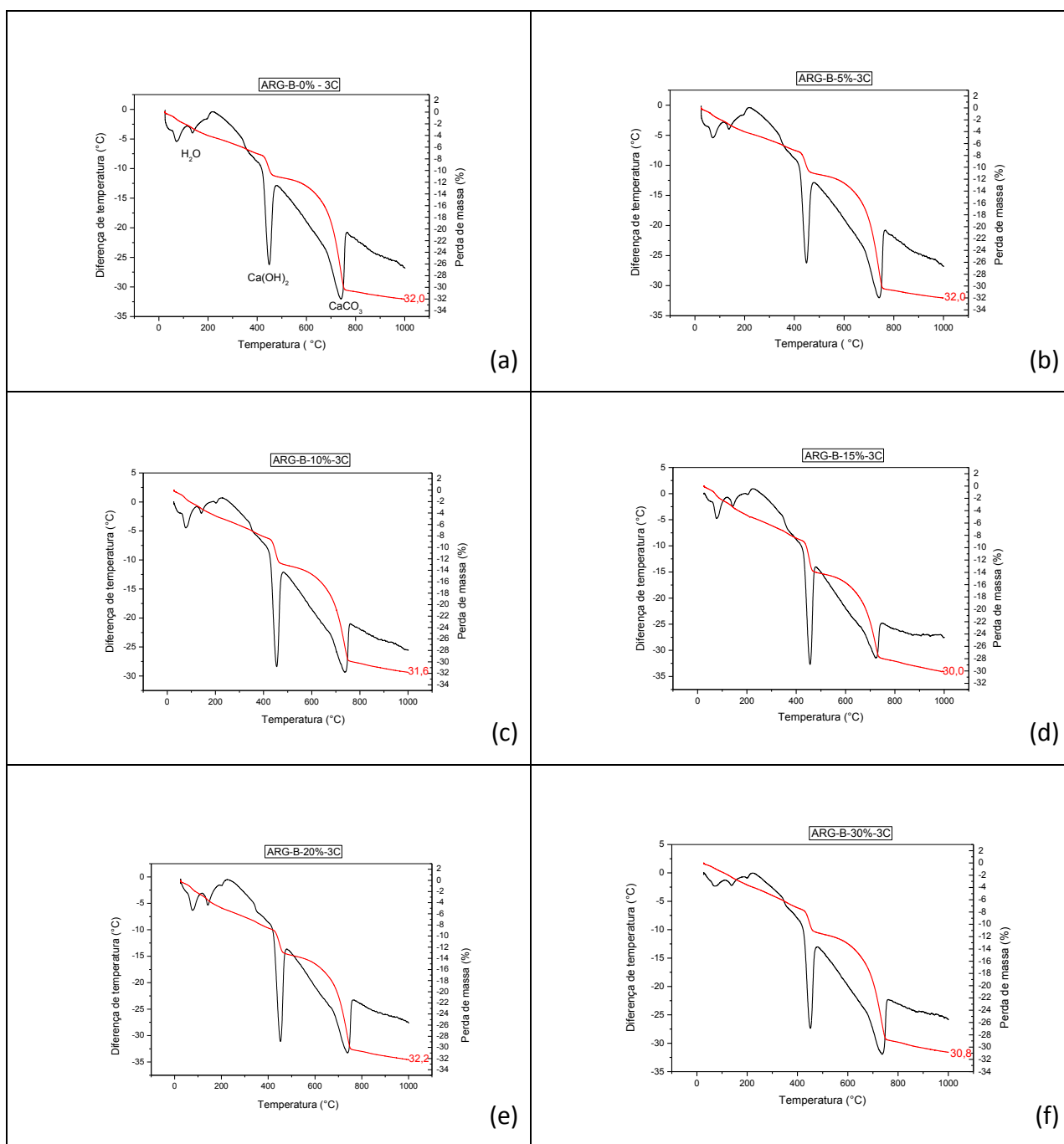
**Figura B – ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 aos 20 Ciclos**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

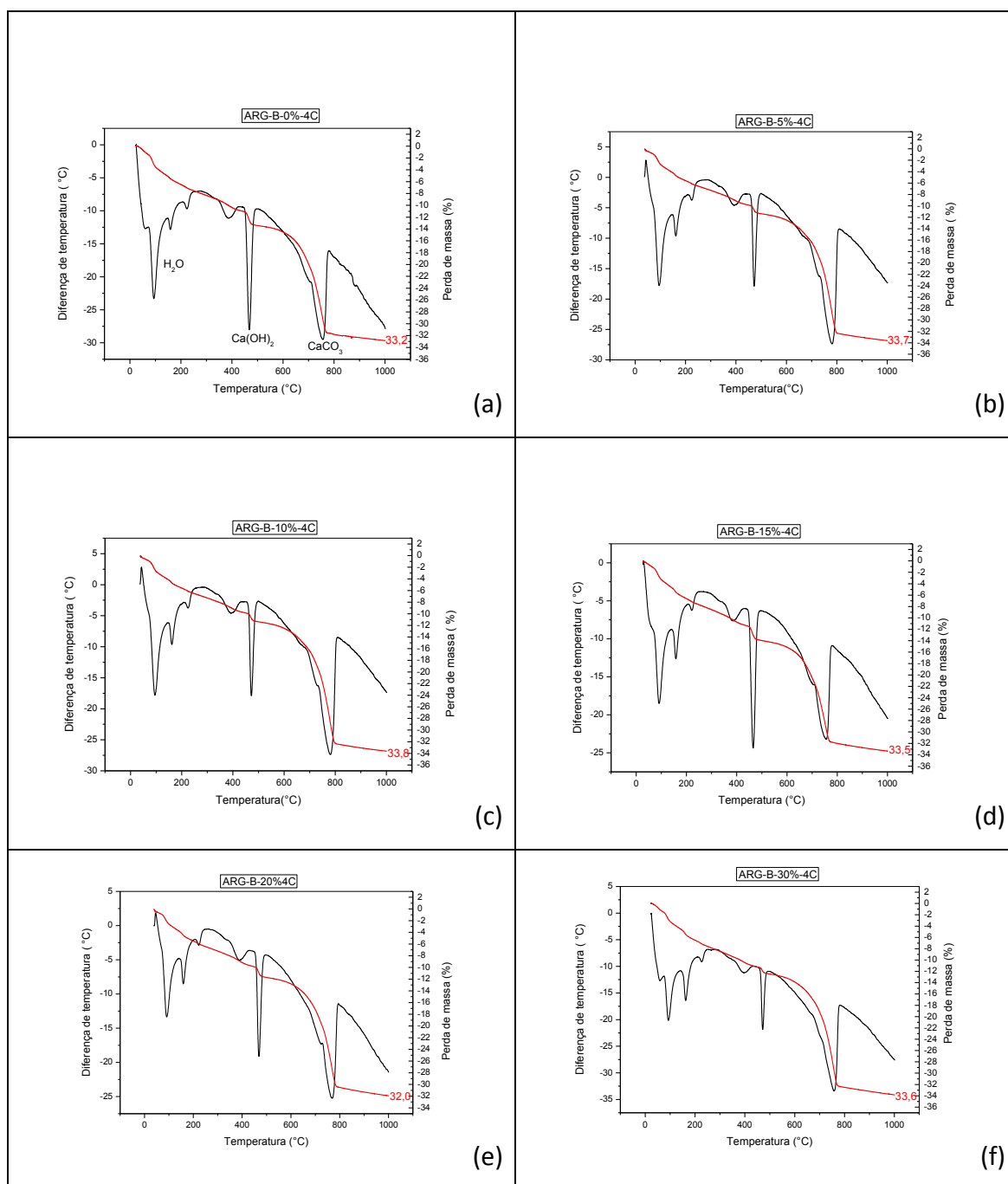
**Figura C – ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 aos 30 Ciclos**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

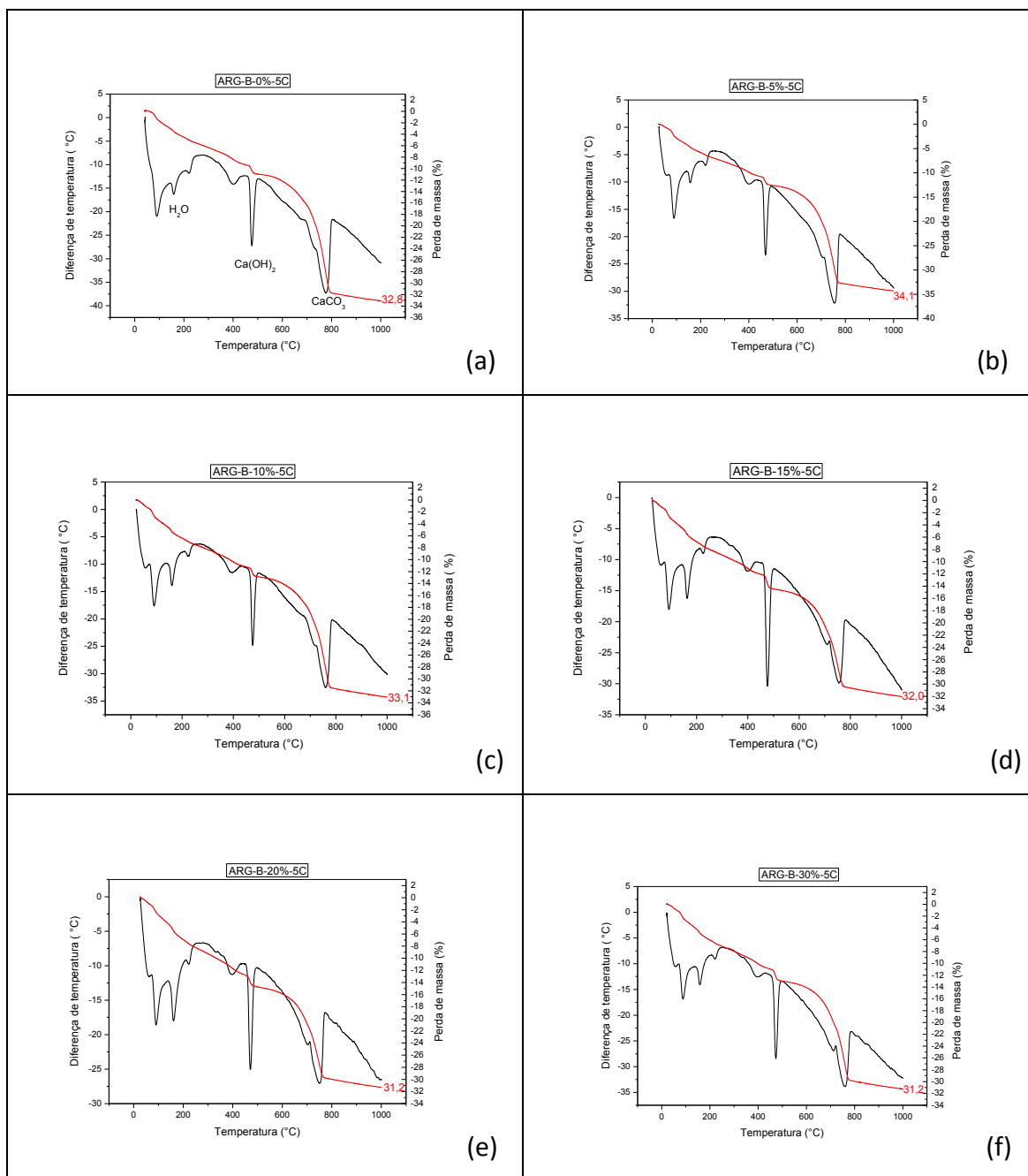
**Figura D - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 aos 40 Ciclos**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

**Figura E – ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 aos 50 Ciclos**



Fonte: Autor 2012

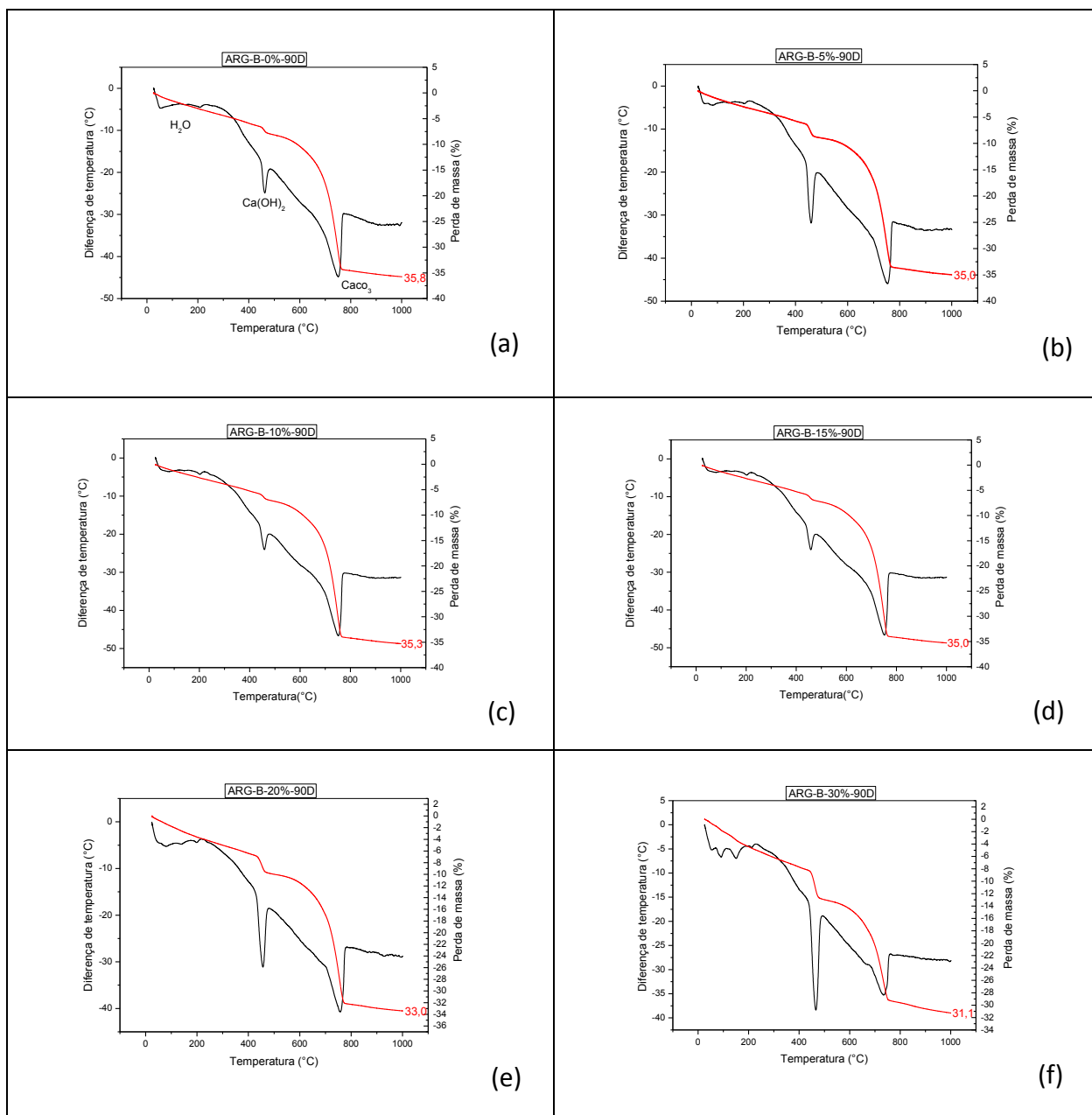
**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.



## APÊNDICE E

### Análise térmica e gravimétrica das argamassas submetidas a cura externa

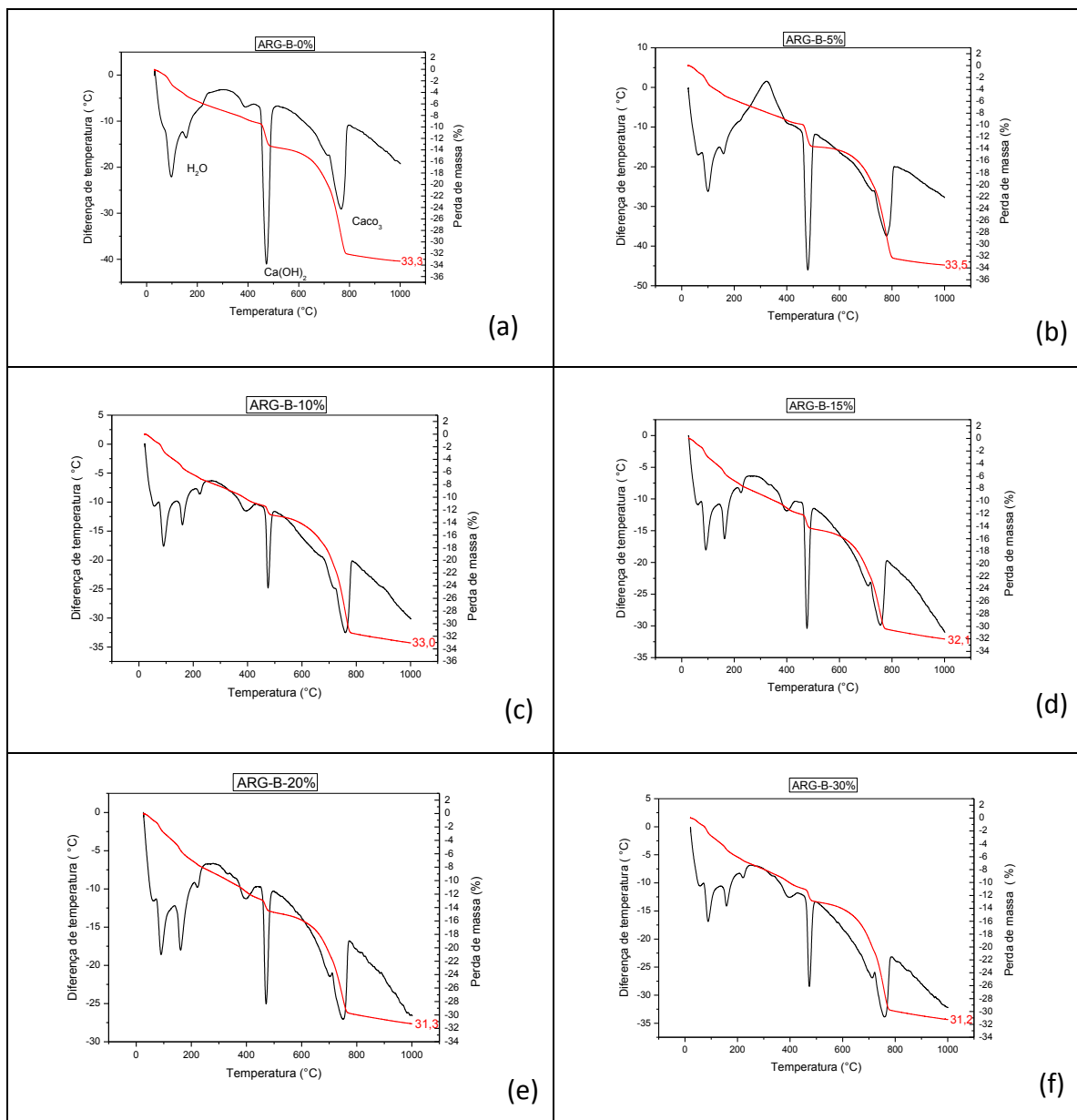
**Figura A - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 com 90 dias de cura externa**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

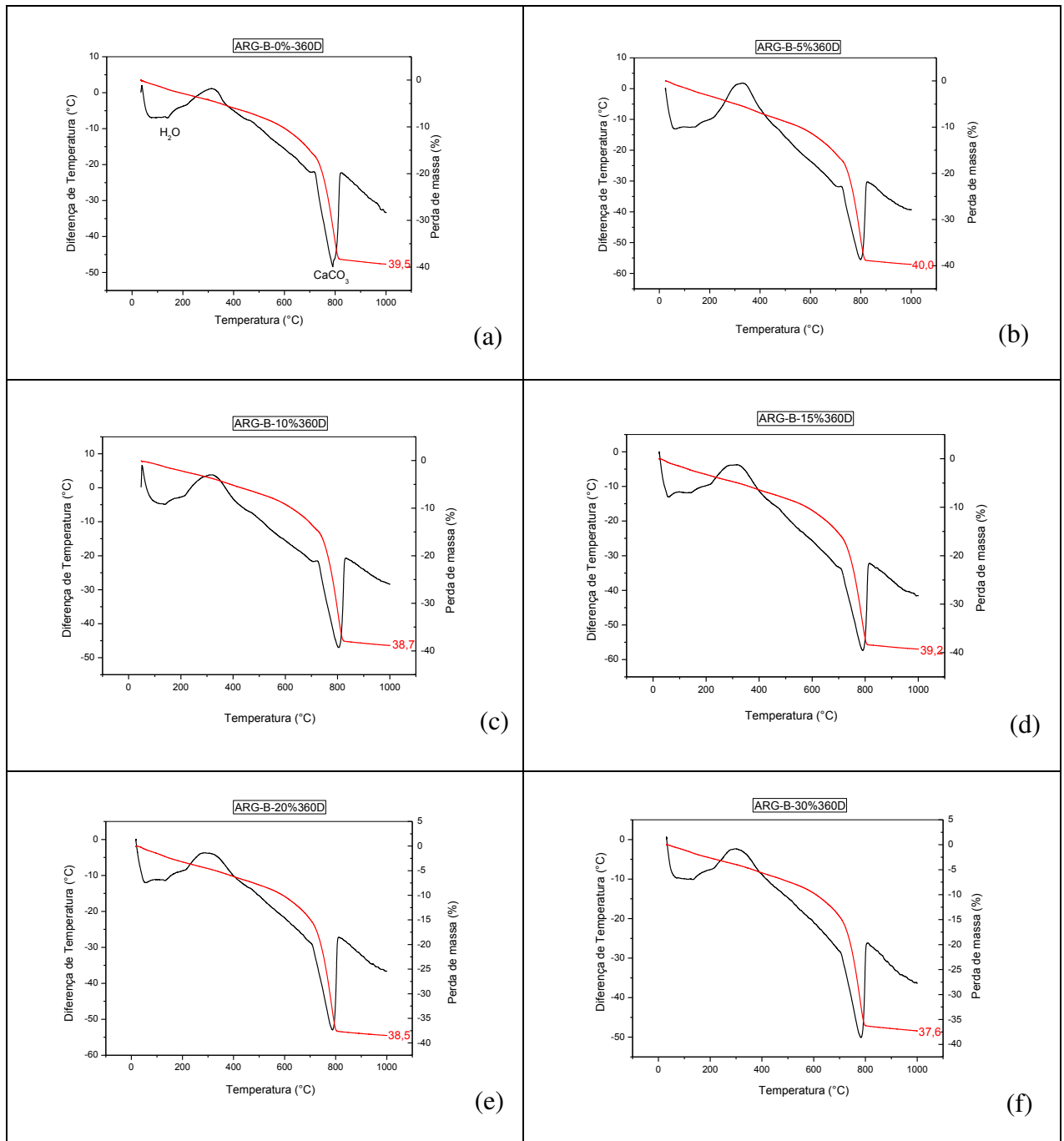
**Figura B - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 com 210 dias de cura externa**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

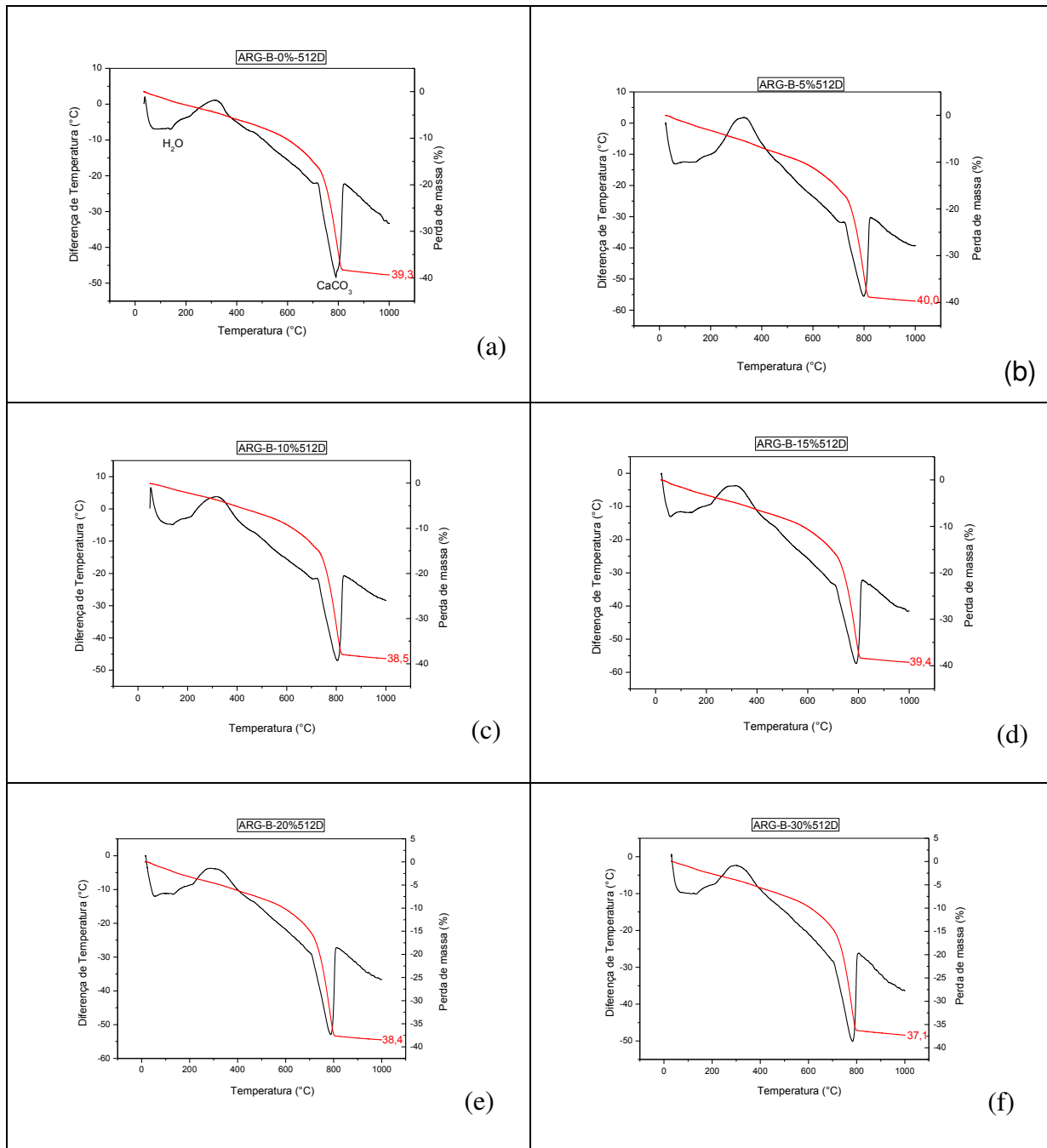
**Figura C - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 com 360 dias de cura externa**



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.

## APÊNDICE D - ATD e ATG das argamassas de traço 1:2:8 com 512 dias de cura



Fonte: Autor 2012

**Legenda:** Em (a) amostra com 0% de substituição; (b) amostra com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (c) amostra com 10% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (d) amostra com 15% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (e) amostra com 20% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim; (f) amostra com 30% de substituição do cimento pelo resíduo de caulim.