

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

**EFEITO DO USO DE RESÍDUOS DO CAULIM E GRANITO NA REGRESSÃO
DE RESISTÊNCIA EM MICROCONCRETO**

Dayelly Gonçalves Fusari

Campina Grande
Junho/2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

**EFEITO DO USO DE RESÍDUOS DO CAULIM E GRANITO NA REGRESSÃO
DE RESISTÊNCIA EM MICROCONCRETO**

Dayelly Gonçalves Fusari

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

Orientador: Dr. Gelmires de Araújo Neves

Co-orientador: Dr. Ulisses Targino Bezerra

Campina Grande

Junho/2009

F985m

2008 Fusari, Dayelly Gonçalves.

Efeito do uso de resíduos do caulim e granito na regressão de resistência em microconcreto / Dayelly Gonçalves Fusari. — Campina Grande, 2008.

129 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra.

1. Granito. 2. Caulim. 3. Cimento Portland. 4. Regressão de Resistência. 5. Microconcreto. I. Título.

CDU

679.861(043)

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha família, em particular minha mãe.

VITAE DO CANDIDATO

- **Curso Técnico:** Edificações – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - IFPB (2009).
- **Graduação:** Tecnologia em Construção de Edifícios – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB (2006).
- **Graduação:** Engenharia Civil – Universidade Federal da Paraíba - UFPB (5º período).
- **Pós - graduação:** Mestrado em Ciência e Engenharia de materiais – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG (2009).

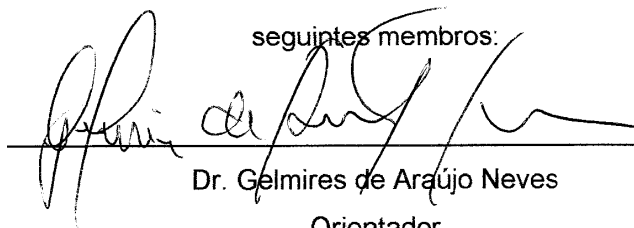
**EFEITO DO USO DE RESÍDUOS DO CAULIM E GRANITO NA REGRESSÃO
DE RESISTÊNCIA EM MICROCONCRETO**

Dayelly Gonçalves Fusari

Dissertação aprovada em 22 de junho de 2009, pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:

Banca Examinadora:

seguintes membros:



Dr. Gelmires de Araújo Neves

Orientador

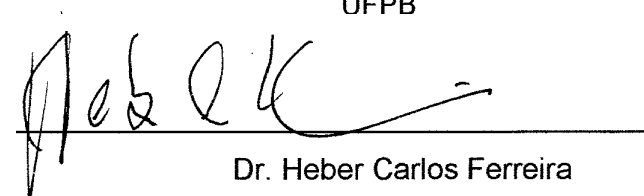
UAEMa – UFCG



Dr. Ulisses Targino Bezerra

Co-Orientador

UFPB



Dr. Heber Carlos Ferreira

Examinador Interno

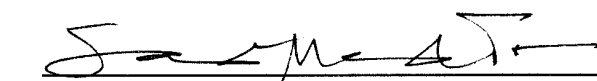
UAEMa/UFCG



Dr. Normando Perazzo Barbosa

Examinador Externo

UFPB



Dr. Sandro Marden Torres

Examinador Externo

UFPB

AGRADECIMENTOS

Ao meu mestre, no sentido estrito da palavra, que me orientou pelo simples prazer em ensinar de forma empática.

Ulisses Targino Bezerra.

Pela orientação no vestibular, na faculdade e no mestrado. “Meu papai de coração”.

Angelo Alpoim Calvão.

A quem conheceu no íntimo as minhas frustrações e vitórias neste trabalho.

Markel da Trindade Barreto Fusari.

Ao amigo para qualquer hora.

Emerson Neiva Monteiro.

A quem me proporcionou conciliar o trabalho e o mestrado.

Fátima de Araújo Viana e Antônio Aureliano de Almeida.

Aos meus amigos que me apoiaram quando eu já não morava no Brasil.

Ana Paula Batista da Silva e Marcos Antônio Padilha Júnior.

Ao meu orientador que com dedicação me manteve no foco.

Gelmires de Araújo Neves.

A quem orienta com propriedade.

Heber Carlos Ferreira e Normando Perazzo Barbosa.

Ao técnico do laboratório LABEME- UFPB, que passou vários finais de semanas moldando e rompendo corpos-de-prova.

Ricardo Luiz de Carvalho.

Ao professor que realizou os ensaios de Difração de Raios X.

Romualdo Rodrigues Menezes.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.
PPgemat.

Ao laboratório onde foram realizados os ensaios de resistência mecânica.

**Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas - LABEME –
Universidade Federal da Paraíba.**

Ao laboratório onde foram realizados os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura.

Centro de Tecnologia do Gás - CTGAS, Natal-RN.

A todos que de alguma forma se dedicaram e contribuíram para a elaboração desta dissertação.

Obrigada.

EFEITO DO USO DE RESÍDUOS DO CAULIM E DO GRANITO NA REGRESSÃO DE RESISTÊNCIA EM MICROCONCRETO

RESUMO

O aumento na produção de resíduos industriais motivou a realização deste trabalho. Os resíduos oriundos das empresas beneficiadoras de granitos e caulins têm gerado grande impacto ambiental, e diante deste fato, causando preocupação aos ambientalistas. Este trabalho tem como objetivo estudar a incorporação dos resíduos de caulim e de granito, ambos com sílica cristalina para fabricação de microconcreto que apresente boas características de combate ao fenômeno de regressão de resistência. Inicialmente foi realizada a caracterização física, química e mineralógica dos resíduos, através dos ensaios de análise granulométrica a laser, análise química, difração de raios X e análise térmica, diferencial e gravimétrica. Os traços para confecção do microconcreto foram divididos em quatro grupos: cimento e areia; cimento, areia e resíduo de granito; cimento, areia e resíduo de caulim; e cimento, areia, resíduo de granito e resíduo caulim. A substituição dos resíduos por areia foi na ordem de 50%, e fator água/ aglomerante de 0,40. Para cada combinação, três amostras foram preparadas. Os corpos-de-prova foram moldados em forma cilíndrica de 50 mm x 100 mm, curados por 24 horas e colocados por período de sete dias no forno nas seguintes temperaturas: 30°C; 100°C; 120°C; 180°C; 230°C; 300°C; 350°C e 400°C. Após o desmolde foram determinadas as resistências à compressão simples e as perdas de massa dos corpos-de-prova. Após análises dos resultados, conclui-se que a resistência à compressão simples diminuiu da temperatura de 180°C para 230°C e voltou a aumentar, para temperaturas acima de 230°C, exceto para o microconcreto aditivado com resíduo de caulim em que a resistência diminuiu a partir de 180°C e não voltou a aumentar. Pode-se concluir que o emprego de caulim e granito dependerá em que temperatura será empregado o microconcreto, por exemplo, para 180°C e 230°C é aconselhável utilizar o resíduo de caulim e para 300°C utilizar o resíduo de granito. Para temperaturas abaixo de 120°C não é aconselhável utilizar resíduos

de caulim e granito no microconcreto. O microconcreto incorporado com resíduo de granito apresentou um melhor desempenho quanto à resistência à compressão simples em temperaturas elevadas.

Palavras - chaves: granito, caulim, cimento Portland, regressão de resistência, microconcreto.

EFFECT OF THE USE OF KAOLIN AND GRANITE WASTE IN SHOTCRETE STRENGTH REGRESSION

ABSTRACT

The motive of this work was the increase of industrial waste products. The by-products of the kaolin and granite processing companies have caused a great environment impact and became a matter of concern among environmentalists. The aim of this study is to investigate the incorporation of kaolin and concrete waste, both with crystalline silica, in shotcrete. This shotcrete must have attributes, good enough to oppose the strength regression phenomenon. Initially was established the physical, chemical and mineral characteristics of the waste products, using the test results of several analysis: laser granulometry, x-ray diffraction, chemical, thermal, differential and gravimetric. The test samples, used for the experience, were divided in four groups: 1- cement and sand; 2- cement, sand and granite waste; 3- cement, sand and kaolin waste; 4- cement sand and granite and kaolin waste. The replacement of waste by sand was in the order of 50% and the waste/binder ratio of 0,40. For each group were prepared three test samples, moulded in a cylindrical shape, with dimensions 50mm x 100 mm, cured for 24 hours and placed in the oven for seven days at the following temperatures: 30°C, 100°C, 120°C, 180°C, 230°C, 300°C, 350°C and 400°C. After unmoulding the test samples, strength to compression and loss of body mass was evaluated. The data analysis showed that the compressing strength decreased when temperature rose from 180° C to 230°C and increased, again, above 230°C. The exception was sample nº 2 (cement, sand and kaolin waste), where the strength decreased from 180°C, not increasing again. It can be concluded that the use of kaolin and concrete waste will depend on the temperature the shotcrete will be used. For exemple between 180°C and 230°C it is advisable to use the kaolin waste. Above 300°C use the granite one. For temperatures below 120°C it is not convenient to use either waste. The granite

waste shotcrete was more efficient, as to the compressive strength, at high temperatures.

Key words: granite, kaolin, Portland cement, strength regression, shotcrete.

PUBLICAÇÕES

Trabalho publicado baseado nos resultados de pesquisa desta dissertação:

BEZERRA, U. T.; NEVES G. A.; FUZARI, D. G.; FERREIRA, H. C.; LIRA, H. L..
Addition of kaolin and granite residue in refractory shotcrete. International Congress - Concrete: Construction's Sustainable Option – Escócia, 2008.

SUMÁRIO

	AGRADECIMENTOS	i
	RESUMO	iii
	ABSTRACT	v
	PUBLICAÇÕES.....	vii
	SUMÁRIO	viii
	ÍNDICE DE TABELAS.....	xi
	ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
	SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xvi
1.0	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2.0	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Microconcreto / Material compósitos.....	7
2.2	Resíduos.....	8
2.3	Caulim.....	9
2.4	Granito.....	14
2.5	Cimento Portland.....	17
2.5.1	Hidratação do Cimento Portland.....	19
2.5.2	Hidratação do Cimento Portland em altas temperaturas.....	23
2.6	Cimento Portland Pozolânico.....	28
2.7	Concreto.....	29
2.7.1	Resistência do concreto.....	30
2.7.2	Cura do concreto.....	31
2.7.3	Durabilidade do concreto.....	31
2.7.4	Efeitos da temperatura sobre o concreto.....	37
2.8	Concreto refratário.....	38
2.8.1	Secagem do concreto refratário.....	39
3.0	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1	Materiais	41
3.2	Métodos.....	41
3.2.1	Preparação das amostras.....	42
3.2.2	Ensaio de caracterização.....	42

3.2.2.1	Análise granulométrica por difração de laser.....	43
3.2.2.2	Análise química.....	43
3.2.2.3	Análise térmica diferencial e termogravimétrica.....	44
3.2.3	Ensaio tecnológicos.....	44
3.2.4	Ensaio de Caracterização do microconcreto.....	47
3.2.3.1	Difração de raios X (DRX).....	47
3.2.3.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	48
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1	Matéria-prima.....	50
4.1.1	Análise granulométrica por difração de laser (AG) dos resíduos de caulim e granito.....	50
4.1.2	Composição química, por fluorescência de raios X, dos resíduos de caulim e granito.....	51
4.1.3	Análise termogravimétrica (TG) e térmica diferencial (DTA) dos resíduos de caulim e granito.....	52
4.1.4	Análise de difração de raios X dos resíduos de granito e caulim.....	53
4.1.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos resíduos de caulim e granito.....	54
4.2	Ensaio tecnológicos.....	55
4.2.1	Perda de massa.....	55
4.2.2	Propriedades mecânicas do microconcreto.....	57
4.2.1.1	Resistência à compressão simples.....	58
4.2.3	Caracterização do microconcreto.....	65
4.2.3.1	Análise de difração de raios X do microconcreto.....	65
4.2.3.1.1	Microconcreto submetido a 30°C.....	67
4.2.3.1.2	Microconcreto submetido a 180°C.....	68
4.2.3.1.3	Microconcreto submetido a 300°C.....	70
4.2.3.1.4	Microconcreto submetido a 350°C.....	70
4.2.3.1.5	Microconcreto submetido a 400°C.....	71
4.2.3.1.6	Microconcreto em todas as condições.....	72
4.2.4	Análise de microscopia eletrônica de varredura do microconcreto.....	76

4.2.4.1	Microconcreto de referência.....	77
4.2.4.2	Microconcreto com resíduo de caulim.....	83
4.2.4.3	Microconcreto com resíduo de granito.....	85
4.2.4.4	Microconcreto com resíduo de caulim e granito.....	88
5.0	CONCLUSÕES	90
6.0	SUGESTÕES	92
	REFERÊNCIAS.....	93
	ANEXO.....	98

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	Reservas de caulim – 2005.....	12
Tabela 2	Componentes do cimento Portland.....	18
Tabela 3	Produtos da hidratação do cimento Portland.....	19
Tabela 4	Teores dos componentes do cimento Portland pozolânico...	28
Tabela 5	Exigências químicas para o cimento Portland pozolânico.....	28
Tabela 6	Exigências físicas e mecânicas para o cimento Portland pozolânico.....	29
Tabela 7	Exigências físicas e mecânicas (facultativas) para o cimento Portland pozolânico.....	29
Tabela 8	Composição dos traços do microconcreto em grama (g).....	45
Tabela 9	Composição química dos resíduos de caulim e granito.....	51
Tabela 10	Perda de massa do microconcreto sem e com a incorporação de resíduos de caulim e granito.....	56
Tabela 11	Relação da perda de massa do microconcreto sem e com incorporação de resíduos de caulim e granito, na temperatura de 30°C e nas demais temperaturas.....	57
Tabela 12	Resistência à compressão simples do microconcreto com e sem incorporação de resíduos de caulim e granito.....	58
Tabela 13	Identificação das fases encontradas nas fichas da DRX.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Impacto ambiental causado pelo resíduo de caulim.....	11
Figura 2	Extração dos blocos de granitos.....	15
Figura 3	Lagoa de deposição de resíduo (lama).....	15
Figura 4	Lama gerada no beneficiamento do granito (ainda na indústria.....	16
Figura 5	Pó resultante do beneficiamento do granito.....	16
Figura 6	Representação de mudanças de fases do cimento Portland aquecido em função da fração C/S.....	26
Figura 7	Fluxograma para estudo da durabilidade de concreto a partir de resíduos de construção civil reciclados.....	35
Figura 8	Resíduo de caulim e granito.....	42
Figura 9	Equipamento CILAS1064.....	43
Figura 10	Corpos-de-prova de referência rompidos.....	46
Figura 11	Equipamento DRX 6000 da Shimadzu.....	47
Figura 12	Recobrimento da amostra com ouro e equipamento de MEV com EDS acoplado.....	48
Figura 13	Fluxograma das atividades desenvolvidas no estudo.....	49
Figura 14	Distribuição do tamanho de partículas do resíduo de granito.....	50
Figura 15	Distribuição do tamanho de partículas do resíduo de caulim.....	51
Figura 16	Análise térmica diferencial e termogravimétrica do resíduo de granito.....	52
Figura 17	Análise térmica diferencial e termogravimétrica do resíduo de caulim.....	52

Figura 18	DRX dos resíduos estudados.....	54
Figura 19	MEV do resíduo de caulim.....	54
Figura 20	MEV do resíduo de granito.....	55
Figura 21	Perda de massa do microconcreto sem e com incorporação de resíduos de caulim e granito.....	56
Figura 22	Resistência à compressão do microconcreto com e sem resíduos.....	58
Figura 23	Resistência à compressão do microconcreto de referência.....	59
Figura 24	Confirmação da resistência à compressão do microconcreto de referência.....	60
Figura 25	Resistência à compressão do microconcreto com resíduo de caulim.....	60
Figura 26	Resistência à compressão do microconcreto com resíduo de granito.....	61
Figura 27	Resistência à compressão do microconcreto com resíduo de caulim e granito.....	62
Figura 28	Resistência à compressão do microconcreto com resíduo de caulim e granito.....	62
Figura 29	Resistência à compressão do microconcreto sem e com resíduo submetido a 30°C e 100°C.....	64
Figura 30	Resistência à compressão do microconcreto sem e com resíduo submetido a 120°C e 180°C.....	64
Figura 31	Resistência à compressão do microconcreto sem e com resíduo submetido a 230°C e 300°C.....	65
Figura 32	Resistência à compressão do microconcreto sem e com resíduo submetido a 350°C e 400°C.....	65
Figura 33	DRX para o microconcreto submetido a 30°C.....	68
Figura 34	DRX para o microconcreto submetido a 180°C.....	69

Figura 35	DRX para o microconcreto submetido a 300°C.....	70
Figura 36	DRX para o microconcreto submetido a 350°C.....	71
Figura 37	DRX para o microconcreto submetido a 400°C.....	72
Figura 38	DRX para o microconcreto de referência.....	73
Figura 39	DRX para o microconcreto de caulim.....	74
Figura 40	DRX para o microconcreto de granito.....	75
Figura 41	DRX para o microconcreto de caulim e granito.....	76
Figura 42	MEV do microconcreto de referência a 30°C.	77
Figura 43	MEV e análise química no ponto A do microconcreto de referência a 30°C	78
Figura 44	MEV e análise química no ponto A do microconcreto de referência a 180°C.....	79
Figura 45	MEV e análise química no ponto B do microconcreto de referência a 300°C.....	80
Figura 46	MEV e análise química no ponto A do microconcreto de referência a 350°C.....	81
Figura 47	MEV e análise química no ponto B do microconcreto de referência a 400°C.....	82
Figura 48	MEV e análise química no ponto A do microconcreto com resíduo de caulim a 30°C.....	83
Figura 49	MEV do microconcreto com resíduo de caulim a 180°C.....	84
Figura 50	MEV e análise química no ponto C do microconcreto com resíduo de granito a 180°C.....	85
Figura 51	MEV e análise química no ponto A do microconcreto com resíduo de granito a 300°C.....	86
Figura 52	MEV e análise química no ponto A do microconcreto com resíduo de granito a 400°C.....	87

Figura 53	MEV e análise química no ponto A do microconcreto com resíduos de caulim e granito a 180°C.....	88
Figura 54	MEV e análise química do microconcreto com resíduos de granito e caulim a 400°C.....	89

SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

Au - elemento químico denominado de Ouro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AG - análise granulométrica por difração de laser

AQ - análise química

CTGAS - Centro de Tecnologia do Gás

CAGEPA - Companhia de Água e Esgota da Paraíba

DTA - análise térmica diferencial

DRX - difração de raios X

EDS - equipamento de energia dispersiva

g – grama

IFPB - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

ICDD – *Internacional Centre for Diffraction Data*

kV - quilovolt

LABEME - Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas

MPa – megapascal

MEV - microscopia eletrônica de varredura

mA - microampére

min. - minuto

nm – nanometro

PPgemat - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

rpm - rotações por minuto

TG - análise termogravimétrica

UFPB - Universidade Federal da Paraíba

UFMG - Universidade Federal de Campina Grande

U.A. – Unidade Astronômica

μm - micrometro

\AA - ângstron

$^{\circ}\text{C}$ – grau Celcius

α - alfa

β - beta

θ - Teta

μ - micron

Υ - ômega

1.0 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A preocupação do homem com relação a seu bem estar e conforto é diretamente proporcional à evolução da humanidade. Para acompanhar as excessivas exigências do ser humano e as mudanças do meio em que ele vive, surgem materiais com vantagens quando comparados a outros que apresentam a mesma função. A adição de resíduos minerais em microconcreto pode ser uma alternativa de melhorias das propriedades destes materiais, assim como o favorecimento da boa utilização dos recursos naturais.

A demanda contínua por maiores índices de produtividade na economia mundial levou ao rápido decréscimo dos recursos naturais e, ao mesmo tempo, à geração de grandes quantidades de resíduos e subprodutos, a maioria deles não reciclados diretamente (MENEZES *et al*, 2007).

Nos últimos anos, as indústrias de mineração, principalmente as de caulim e granito, vêm sendo citadas como fontes de poluição e contaminação do meio ambiente, devido à enorme quantidade de resíduos gerados e freqüentemente lançados diretamente nos ecossistemas, sem processos de tratamento prévio para eliminar ou reduzir os constituintes presentes (FARIAS *et al*, 2006), que em muitos casos são compostos por materiais potencialmente ricos para reaproveitamento e reuso.

Dois tipos de resíduos são gerados pela indústria de processamento do caulim primário, um oriundo da primeira etapa do beneficiamento, separação da areia do minério caulim, que representa cerca de 70% do total do resíduo produzido e que é gerado pelas empresas mineradoras em etapas logo após a extração. O outro resíduo origina-se na segunda fase do beneficiamento, que compreende processos de tratamento a úmido e tem o objetivo de separar a fração fina do minério, purificando o caulim, mas que geram um resíduo na forma de lama (MENEZES *et al*, 2007).

Atualmente, a disposição dos resíduos nos municípios dos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, tem um volume bastante significativo, uma vez que no processo de beneficiamento de caulim primário o rendimento é de aproximadamente 30% do total extraído da jazida, ou seja, de cada tonelada bruta, menos de um terço é aproveitado. Esse resíduo é geralmente constituído por quartzo, mica e caulinita. Para o beneficiamento de granito estima-se, hoje, que o desperdício no processo de extração pode chegar a até 40% (monólitos fora das dimensões padronizadas, lascas e pó de pedra) dos blocos. Na serragem, as perdas podem chegar a 30% na forma de costaneiras e lama abrasiva. O pó de granito proveniente da serragem do granito apresenta-se na forma de polpa e geralmente é constituído por pó de granito, cal e granalha (FARIAS *et al*, 2006). A população das regiões afetadas pelos resíduos vem crescendo consideravelmente, o que desperta a preocupação de ambientalistas e da comunidade como um todo, tendo em vista um cenário que poderá vir a causar danos ao meio ambiente e à saúde da população, já que é de conhecimento que a inalação de pós de silicatos pode causar doenças, principalmente a silicose, que segundo o dicionário Aurélio significa pneumoconíase devida à inalação de dióxido de silício, e que pode ocorrer, p. ex., pela aspiração de poeira de pedra, de areia, etc.

Pesquisas sobre a utilização de resíduos vêm sendo desenvolvidas em todo o mundo. As razões que motivam estas pesquisas são: esgotamento das matérias-primas não renováveis; redução do consumo de energia; menores emissões de poluentes; redução de custos; melhoria na saúde e segurança da população.

Assim, o aproveitamento de resíduos industriais em diversas aplicações será sempre uma meta a ser alcançada pela civilização atual, em que danos ao meio ambiente estão ameaçando significativamente a existência da vida no planeta.

Desta forma, vários resíduos estão sendo aproveitados em pesquisas experimentais, como é o caso do uso de resíduos de granito e caulim em

microconcreto reduzindo o efeito da regressão de resistência em alguns casos e alterando suas propriedades.

Com relação à área do conhecimento de microconcreto submetido a temperaturas elevadas podemos citar o termo refratário que é atribuído a um grupo de materiais, em sua maioria cerâmicas, capazes de suportar altas temperaturas sem perder suas propriedades físico-químicas e mecânicas, entre elas, resistência à compressão, baixa condutividade térmica e condutividade elétrica. Usualmente são encontrados em fornos industriais, de laboratórios de pesquisa e ensino, caldeiras, fornos domésticos e churrasqueiras (tijolo refratário), entre outras aplicações.

Dentre os produtos refratários, temos os concretos refratários que são materiais essenciais no revestimento de instalações submetidas a altas temperaturas, encontradas principalmente nas indústrias siderúrgicas e petroquímicas. Eles possuem uma extensa distribuição granulométrica, já que são compostos por uma matriz (partículas com diâmetro inferior a 100 μm - domínio dos fenômenos de superfície e interação com meio líquido) e por agregados (partículas maiores que 100 μm - domínio dos fenômenos de massa) (MARQUES *et al*, 2004). Para este trabalho especificamente o termo refratário não convém já que a temperatura estudada foi até 400°C

O uso de pozolana no microconcreto favorece o consumo do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) proveniente da hidratação do cimento Portland, resultando em fases hidratadas, como o C-S-H e aluminatos de cálcio, contribuindo assim, para o aumento da resistência mecânica e diminuição da permeabilidade e porosidade do microconcreto, ou seja, favorece a formação de materiais mais estáveis aos meios agressivos. Uma desvantagem da reação pozolânica refere-se à redução da alcalinidade, pois o hidróxido de cálcio gerado no processo de hidratação do cimento Portland será consumido parcialmente, o que possivelmente provocará a despassivação das armaduras de aço e, conseqüentemente, o processo de corrosão de origem eletroquímica será favorecido (TAYLOR, 2003). Outra desvantagem da reação pozolânica também ligada à redução do teor de hidróxido de cálcio refere-se a sua função

como substância estabilizante do C-S-H, dando-lhe condições termodinâmicas de estabilidade (TAYLOR, 2003). Mesmo assim, a quantidade de hidróxido de cálcio restante juntamente com o C-S-H formado na reação pozolânica ainda é suficiente para que esta reação seja efetuada, quando se quer o aumento da durabilidade de materiais cimentícios.

Além das desvantagens citadas, o emprego de pozolanas também pode aumentar a porcentagem de água (não é necessário esse aumento se for misturado ar ao concreto) com subsequente aumento da retração pela secagem. As pozolanas podem ser divididas em dois grupos: a) pozolanas naturais e b) pozolanas artificiais (SANTOS, 1992).

Ainda segundo Santos (1992), as propriedades pozolânicas são desenvolvidas por calcinação acerca de 500°C, sendo as temperaturas ótimas entre 700°C e 800°C. A atividade pozolânica é reduzida por calcinação em temperaturas mais elevadas e torna-se praticamente inativa em temperaturas de 900°C a 1000°C, devido à formação de compostos cristalinos sem atividade pozolânica.

A calcinação é o processo de queima de uma substância a altas temperaturas, sem, contudo, atingir seu ponto de fusão, de forma a conseguir sua decomposição química e conseqüente eliminação dos produtos voláteis. A calcinação também é usada para a eliminação da água de cristalização, operação conhecida como queima e na oxidação de substâncias poluidoras presentes em resíduos, buscando a eliminação de sua toxidez, ou seja, é um processo em que se oxidam as substâncias presentes em uma dada amostra na forma de óxidos usando calor. Faz-se isso no laboratório com uso de um forno elétrico chamado mufla, e na indústria em fornos aquecidos por óleo, como na produção de cimento. Esse sistema é usado em análises químicas de substâncias complexas. Normalmente, as calcinações ocorrem em temperaturas da ordem de 1000°C.

Segundo Brunauer e Copeland (*apud* MEHTA e MONTEIRO, 1994), o material mais usado em construção é o concreto, o homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, a não ser a água. A sua utilização é muito abrangente, ninguém pensaria em usar madeira em uma barragem, aço em pavimentação ou asfalto em estruturas de edifícios, mas o concreto é usado para cada uma dessas e em muitas outras utilizações em lugar de outros materiais de construção.

Comparado a alguns materiais de engenharia, a produção do concreto requer consideravelmente menor consumo de energia. Além disso, grande quantidade de restos industriais podem ser reciclados no concreto, substituindo o material cimentante ou os agregados. Daí a importância de estimular pesquisas que contemplem o uso de materiais alternativos que venham favorecer as propriedades do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

É pertinente lembrar que o aproveitamento de resíduos deve ser encarado com uma atividade complementar que poderá contribuir muito na redução de custos finais de produção, permitindo a adição de algum valor ao resíduo. Os depósitos de resíduos devem ser vistos como mais uma fonte de renda e não apenas simples armazenadores de resíduos (CASTRO, 2008).

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a incorporação de resíduos de caulim (oriundo do beneficiamento de caulim) e granito (oriundo da serragem do granito) em substituição parcial da areia empregada no traço de um microconcreto convencional, quando este for submetido a temperaturas de 30°C, 100°C, 120°C, 180°C, 230°C, 300°C, 350°C e 400°C.

Para que o objetivo geral possa ser atingido são necessários que sejam estabelecidos alguns objetivos específicos, tais como:

- caracterizar física, química e mineralogicamente as matérias-primas convencionais e alternativas;
- avaliar a perda de massa do microconcreto estudado;

- avaliar o comportamento mecânico (resistência a compressão simples) do microconcreto;
- identificar o microconcreto que terá um melhor desempenho quanto à resistência a compressão simples, assim como a respectiva temperatura;
- avaliar se a incorporação de resíduos do caulim e do granito no microconcreto, quando este foi submetido a temperaturas elevadas, contribuiu para reduzir o fenômeno de regressão de resistência, já que o cimento Portland em si não retrata características típicas de anti-regressão;
- caracterizar o microconcreto através de DRX e MEV, identificando quais os produtos hidratados do cimento Portland, quando o microconcreto for submetido as temperaturas estudadas neste trabalho.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Microconcreto / Material compósito

Microconcreto significa uma mistura de materiais, entre eles o *grout*, alguns tipos de argamassa e o concreto elaborado com agregados de pequena dimensão (até 9,5 mm), que pode ser chamado de pedrisco. Os padrões de qualidade para o processo de dosagem e aplicação para estes materiais devem ser os mesmos para os demais concretos. O traço é mais econômico à medida que se aumente a dimensão dos agregados e a variedade da sua granulometria, portanto o microconcreto deve ser utilizado preferencialmente para reparos, peças de pouca espessura, ou peças densamente armadas. A argamassa é uma mistura composta basicamente por cimento, areia, cal hidratada e água, podendo variar a sua composição de acordo com a região geográfica, utilizando materiais como barro, caulim, saibro, etc. Um tipo de argamassa é o *grout*, composto por cimento, areia, pó de quartzo no lugar da cal, água e aditivos especiais, destacando-se na elevada resistência mecânica. (www.portal do concreto. com.br)

Compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais materiais distintos que mantêm as suas propriedades individuais e sem que haja interação química intencional entre eles. Estes materiais são constituídos por uma matriz e uma fase dispersa ou reforço. A matriz é responsável pela aparência do produto e de suas características superficiais e tem por função envolver, separar e proteger o reforço de ataques externos e de transmitir as tensões aplicadas no compósito para o reforço, que tem uma função estrutural e é a responsável pela resistência do compósito (CARVALHO, 2007).

Ainda segundo Carvalho (2007), as propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases constituintes, suas proporções, porosidade, interações, forma, razão de aspecto, aspecto superficial, tamanho, distribuição e o grau de orientação da fase dispersa (fibras contínuas ou curtas, cargas, etc).

O concreto é um compósito comum de partículas grandes no qual as fases tanto a matriz quanto a dispersa são materiais cerâmicos. De vez que os termos "concreto" e "cimento" são às vezes incorretamente usados como se fossem sinônimos, talvez seja apropriado fazer uma distinção entre eles. Em um sentido amplo, concreto implica um material compósito consistindo de partículas agregadas que são interligadas num corpo sólido por algum tipo de meio ligante, isto é, um cimento (CALLISTER, 2002).

Portanto, os materiais compósitos são fabricados com o objetivo de se alcançar melhores propriedades de engenharia (rigidez, peso, resistência mecânica; resistência química, propriedades térmicas e elétricas) em relação aos materiais em relação aos demais materiais.

2.2 Resíduos

São várias as definições apresentadas sobre o termo resíduo, todavia, fica evidenciado que todas as atividades desenvolvidas na construção civil (construção, recuperação, restauração, reparos) e no beneficiamento do granito e mármore são fontes geradoras de resíduo sólido (FARIAS, 2007).

A norma da ABNT NBR 10004 (2004) define resíduos como aqueles nos estado sólido e semi-sólido que “resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Resíduos sólidos podem ser entendidos, como materiais resultantes de processos de produção, transformação, utilização ou consumo, oriundos de atividades humanas, de animais ou resultantes de fenômenos naturais, cuja destinação deverá ser ambiental e sanitariamente adequada.

De acordo com Farias (2007), os resíduos da construção civil podem ser definidos como sendo um conjunto de restos de materiais, tais como: tijolos, argamassas, concretos, aços, madeiras, gesso, etc., provenientes do desperdício na construção, reforma, demolição ou restauração de construção civil e do corte de granito e mármore. É, talvez, o mais heterogêneo dentre os resíduos industriais. Esse pode ser gerado, muitas vezes, por deficiência no processo de construção ou produção. Praticamente todas as atividades desenvolvidas no setor da construção civil são geradoras de resíduos.

Impacto ambiental pode ser definido como sendo uma alteração da qualidade ambiental resultante da modificação de processos naturais ou sociais provocada pela ação humana (NEVES, 2002).

2.3 Caulim

O caulim é uma argila constituída principalmente por caulinita e haloisita. O termo caulim ou “china clay” deriva da palavra chinesa Kauling (colina alta) e se refere a uma colina de Jauchau Fu, ao norte da China, em que o material foi originalmente obtido. É um material inorgânico, atóxico, incombustível, insolúvel em água, imputrescível, neutro, imune ao ataque de microorganismos e mudanças bruscas de temperatura (MELO, 2007).

Processos de formação e decomposição de rochas no passado geológico levaram a concentrações naturais que constituem o que se chama de caulim residual ou primário, de formação hidrotermal, e por intemperismo e como caulim transportado ou sedimentar. Os caulins, quaisquer que seja a sua origem geológica, variam não somente na natureza de seus componentes minerais, mas principalmente, quanto ao teor de argilominerais na respectiva granulometria, no grau de cristalinidade e na área específica (SANTOS, 1992).

Os caulins secundários são classificados em três grupos: caulins sedimentares, areias caulínicas e argilas plásticas, refratárias e silicosas. Os caulins secundários apresentam teores mais baixos de quartzo e mica, no entanto, ocorrem contaminados com óxidos de ferro e minerais de titânio, que

podem alterar a sua cor branca original. Outra característica que merece registro é a granulometria mais fina dos argilominerais. (BRISTOW, 1987).

Caulim é o nome comercial dado a uma argila branca ou quase branca, constituída essencialmente de caulinita. Há mais de três mil anos, os chineses já usavam o caulim para fazer porcelana. Caulim é uma rocha constituída de material argiloso, com baixo teor de ferro e cor branca (CASTRO, 2008).

A primeira utilização industrial do caulim foi na fabricação de artigos cerâmicos e de porcelana há muitos séculos. Somente a partir da década de 1920 é que se teve início a aplicação do caulim na indústria de papel, sendo precedida pelo uso na indústria da borracha. Posteriormente, o caulim passou a ser utilizado em plásticos, pesticidas, rações, produtos alimentícios, farmacêuticos, fertilizantes e outros, tendo atualmente uma variedade muito grande de aplicações nas indústrias. Os principais usos industriais do caulim são: papel; tinta; cerâmica; refratários; catalisadores; louças de mesa; peças sanitárias; cimento branco; borracha; plástico; adesivos; vidros; cosméticos e pesticidas (SILVA, 2001).

O Brasil possui grandes reservas de caulim, sendo os estados de Amapá, Pará, São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, responsáveis por mais de 99,0% da oferta de caulim beneficiado. Em 2004, só os Estados do Amapá e do Pará produziram 84,0% da oferta nacional. Já os estados Bahia, Paraíba e Paraná também aparecem como produtores de caulim beneficiado em pequena escala (CASTRO, 2008).

Nos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte existem várias beneficiadoras de caulins primários para uso em uma vasta gama de produtos destacando-se a indústria cerâmica e a indústria de papel. Esses caulins primários são oriundos da Província Pegmatítica da Borborema. O caulim é um mineral amplamente utilizado nos diversos setores industriais cabendo destacar o de papel, que consome cerca de 47% da produção mundial, sendo 33% para revestimento ou cobertura *coating* e 14% para carga *filler* (CASTRO, 2008).

Ainda segundo Castro (2008), para o aproveitamento do caulim “bruto”, é necessário o seu beneficiamento, que pode ser pelo processo a seco ou pelo processo úmido. O beneficiamento a seco é usado para caulins que já possuam qualidades desejadas de alvura, com pouco quartzo e distribuição granulométrica adequada de partículas. Como a maioria dos caulins não atende a essas especificações, o seu beneficiamento é feito a úmido.

A exploração do recurso natural caulim vem gerando impactos ambientais, como é o caso de seu armazenamento em ambientes impróprios resultando em problemas para o meio ambiente e para a população em geral (Figura 1).



Figura 1. Impacto ambiental causado pelo resíduo de caulim (CASTRO, 2008).

No período de 1988 a 2006, a produção bruta brasileira de caulim passou de 2,1 milhões para 6,6 milhões de toneladas, registrando um aumento de 214,3%, enquanto que a beneficiada passou de 796 mil para 2,3 milhões de toneladas, acusando um aumento de 188,9%. As reservas mundiais de caulim são bastante abundantes e de ampla distribuição geográfica. Porém, apenas quatro países detêm cerca de 95,0% de um total estimado de aproximadamente 14,2 bilhões de toneladas: Estados Unidos (53,0%), Brasil (28,0%), Ucrânia (7,0%) e Índia (7,0%). Segundo o Anuário Mineral Brasileiro (2006), as reservas brasileiras de caulim atingiram, no ano de 2005, um total em torno de 4,9 bilhões de toneladas, das quais 2,7 bilhões são medidas. O somatório destas com as reservas indicadas atingiram 4,4 bilhões de

toneladas, correspondendo a 89,8% das reservas totais. Os Estados do Amazonas, Pará e Amapá são as Unidades da Federação com maior destaque, participando, respectivamente, com 68,25%, 16,72% e 8,06% do total das reservas. O Estado da Paraíba aparece na 15ª posição com reservas de caulim, sendo Junco do Seridó e Salgadinho os principais municípios produtores. Nos municípios de Assunção e Tenório, da Paraíba, também podem ser encontradas jazidas de caulim primário (CASTRO, 2008). Na Tabela 1 estão apresentadas as reservas de caulim distribuídas no Brasil.

Tabela 1. Reservas de Caulim – 2005.

UF	Minério			Total
	Medida*	Indicada**	Inferida***	
AM	1.924.282.431	1.218.157.624	263.406.700	3.405.846.755
PA	304.867.267	312.101.899	217.473.178	834.442.344
AP	272.187.823	130.124.000	-	402.311.823
SC	62.327.870	8.562.387	5.858.867	76.749.124
GO	8.513.520	11.048.871	41.838.500	61.400.891
PR	22.872.487	11.560.302	19.602.496	54.035.285
SP	31.629.817	16.227.012	6.118.736	53.975.565
RS	22.850.316	17.335.287	8.902.642	49.088.245
MG	16.169.460	10.087.208	2.104.215	28.360.883
BA	6.814.516	2.649.550	2.651.598	12.115.664
ES	25.000	6.818.013	-	6.843.013
PE	1.761.467	-	-	1.761.467
PI	754.292	337.907	448.256	1.540.455
MA	364.901	252.800	-	617.701
PB	190.924	166.037	64.673	421.634
RN	271.389	19.676	-	291.065
RJ	229.436	28.762	-	258.198

Fonte: Castro, 2008.

***Reserva medida:** a tonelagem de minério computado pelas dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, galerias, trabalhos subterrâneos e [sondagens], e na qual o teor é determinado pelos resultados de amostragem pormenorizada, devendo os pontos de inspeção, amostragem e medida estar tão proximamente espaçados e o caráter geológico tão bem definido que as dimensões, a forma e o teor da substância mineral possam ser perfeitamente estabelecidos.

****Reserva indicada:** a tonelagem e o teor do minério são computados parcialmente de medidas e amostras específicas, ou de dados da produção, e parcialmente por extrapolação até distância razoável com base em evidências geológicas.

*****Reserva inferida:** estimativa feita com base no conhecimento das características geológicas do depósito mineral, havendo pouco ou nenhum trabalho de pesquisa.

Embora o mineral caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) seja o principal constituinte do caulim, podem ocorrer outros minerais do grupo da caulinita com outras substâncias sob a forma de impurezas, tais como areia, quartzo, mica, feldspato, óxidos de ferro e titânio, etc. A fórmula química dos minerais do grupo da caulinita é $\text{Al}_2\text{O}_3\text{mSiO}_2\text{nH}_2\text{O}$, em que m varia de 1 a 3 e n de 2 a 4 (MELO, 2007).

O resíduo obtido quando do beneficiamento do caulim é constituído essencialmente de sílica, mica e feldspato, cujas granulometrias geralmente são mais grosseiras quando comparadas com as matérias-primas naturais (RAMALHO *et al*, 2005).

Ainda segundo Ramalho *et al* (2005), o que diferencia o resíduo de beneficiamento do caulim dos depósitos naturais de argila caulinítica é que, enquanto os depósitos naturais podem possuir quantidades elevadas de quartzo, o resíduo do beneficiamento de caulim depositado nas lagoas, além de ser extremamente fino, apresenta traços de quartzo por causa do desaparecimento, etapa do beneficiamento que separa o quartzo da caulinita.

As pozolanas são materiais de composição silicosa ou sílico-aluminosa que não sendo cimentícias, reagem com hidróxido de cálcio na presença de umidade e a temperatura ambiente, resultando em compostos com propriedades cimentícias (MONTANHEIRO, 2002).

As pozolanas artificiais são obtidas através do beneficiamento industrial ou originário de um subproduto industrial, que passaram por processos e modificações químicas e mineralógicas, acentuando o potencial pozolânico. Um deles é a metacaulinita obtida pela calcinação de argila caulinítica (caulim), pura ou refinada, a temperaturas entre 600°C e 850°C, e que, quando moída até a finura de 7 000cm²/g ou 9 000 cm²/g, resulta em um material de grande pozolanicidade (CASTRO, 2008).

A seleção de um bem mineral para ser usado na indústria depende de uma série de critérios: tamanho e forma das partículas, composição química,

área específica, energia de superfície, alvura, opacidade, viscosidade da suspensão, índice de refração, compatibilidade com a polpa e com aditivos químicos tais como ligantes e auxiliares de retenção (CASTRO, 2008).

2.4 Granito

Denomina-se pedra de construção toda classe de rochas naturais que pode ser empregada na construção. As pedras naturais constituem, juntamente com as madeiras, a mais importante classe de materiais que pode ser utilizada em obras de engenharia, sem alteração do seu estado natural. As rochas podem ser classificadas de acordo com a sua posição geológica, estrutura física e composição química. Então, o granito pode ser classificado:

- a) geologicamente, como rocha de profundidade ou plutônica, oriunda da solidificação do magma no seio da crosta terrestre;
- b) segundo a sua estrutura física é uma rocha não estratificada, isto é, que não se forma em camadas. Tem, usualmente, estrutura cristalina;
- c) de acordo com a sua composição química, é uma rocha silicosa, na qual predomina a sílica.

O granito é utilizado na construção civil depois da realização do desdobramento das rochas em blocos e chapas brutas, que são serradas em peças menores e sofrem um processo de polimento resultando em produtos acabados para o mercado. Este processo de desdobramento e serragem gera um volume considerável de resíduos na forma de lama.

Na Figura 2 está apresentada a extração dos blocos de granito e na Figura 3 a deposição do resíduo de granito na forma de lama.



Figura 2. Extração dos blocos de granitos (FARIAS, 2007).



Figura 3. Lagoa de deposição de resíduo (lama) (FARIAS, 2007).

A lama obtida geralmente é constituída de pó de rochas, que corresponde à cerca de 20% a 25% do bloco beneficiado, além de outros acessórios como granalha metálica, cal e água (MOREIRA et al., 2003). A lama quando seca torna-se um resíduo sólido não biodegradável classificado como resíduo classe III – inerte. Entretanto, quando este resíduo não é descartado de forma correta pode alcançar rios, lagoas, córregos e até mesmo os reservatórios naturais de água, provocando problemas de assoreamento, causando danos ao meio ambiente e à saúde humana (RAMALHO et al, 2005).

Na Figura 4 é possível verificar a lama gerada no beneficiamento do granito quando ele se encontra ainda na indústria.



Figura 4. Lama gerada no beneficiamento do granito (ainda na indústria) (FARIAS, 2007).

A Figura 5 apresenta a forma aparente da “lama” após a evaporação do excesso de água usada no beneficiamento, constituindo-se, a partir de então, um pó rico em sílica cristalina.



Figura 5. Pó resultante do beneficiamento do granito (FARIAS, 2007).

Os resíduos provenientes do beneficiamento (corte, polimento e acabamento) de granito e mármore pelas serrarias, em cerca de 2 00.000 t/ano, necessitam de local adequado para armazenamento para evitar, assim, maiores agressões ao meio-ambiente (FARIAS, 2007).

A utilização do resíduo de granito na composição de microconcreto pode contribuir para um maior aproveitamento dos recursos naturais, assim

como promover melhorias no progresso da sociedade, favorecendo o desenvolvimento sustentável.

2.5 Cimento Portland

O cimento (derivado da palavra latina *cæmentu*) é um material cerâmico que, em contato com a água, produz reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, ganhando, assim, resistência mecânica. É o principal material de construção usado como aglomerante. É uma das principais *comodities* mundiais, servindo até mesmo como indicador do desenvolvimento econômico dos países.

Diz-se que o cimento Portland é um cimento hidráulico, pois sua natureza se desenvolve através de reações químicas com água. Ele é usado principalmente em argamassa e em concreto para aglutinar, na forma de uma massa coesa, agregados de partículas inertes (areia e cascalho) (CALLISTER, 2002).

Já no Antigo Egito era utilizado um material feito de gesso calcinado como aglomerante. Entre os gregos e romanos, eram usados solos vulcânicos das proximidades de *Pozzuoli* ou da ilha de *Santorini*, que endureciam depois de misturados com água e cal.

Em 1756 o inglês John Smeaton criou uma mistura resistente através da calcinação de calcários argilosos e moles, em que utilizou na construção do farol de Edystone, na Inglaterra. Esse é o marco da criação do cimento artificial (VARGAS *et al*, 1977). Tempos depois, em 1824, o construtor, também inglês, Joseph Aspdin produziu um pó muito fino a partir de pedras calcárias e argila que, depois de misturado à água e seco, produzia um material muito rígido, tanto quanto as pedras naturalmente empregadas na construção. Ele batizou esse material de cimento Portland, em homenagem à ilha de Portland, local onde existiam rochas semelhantes a esse cimento. Desde então, esse é o principal tipo de cimento utilizado em todo o mundo.

Os cimentos tipo Portland são fabricados a partir de misturas de calcário, argila e outros compostos de menor importância de acordo com a finalidade que se deseja. No final do processo, o cimento Portland anidro (termo utilizado para instituir uma substância de qualquer natureza que não contém, ou quase não contém, água na sua composição) apresenta quatro fases cristalinas principais, que são apresentadas na Tabela 2 (BEZERRA, 2006):

Tabela 2. Componentes do cimento Portland.

Fase Cristalina	Fórmula Química	Simbologia da indústria do cimento	Massa Específica [kg/m ³]	Volume Molar [m ³ /Mmol]
Silicato tricálcico	3CaO SiO ₂	C ₃ S (alita)	3 210,0	71,0
Silicato dicálcico	2CaO SiO ₂	C ₂ S (belita)	3 280,0	52,4
Aluminato tricálcico	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A (celita)	3 030,0	89,1
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF (ferrita)	3 730,0	128,0

Bezerra (2006) comenta que em termos de propriedades físicas e composição mineralógica, a diferença entre os diversos tipos de cimento Portland está relacionada ao seu grau de finura e aos teores dos seus quatro compostos principais. É evidente que a termodinâmica envolvida no processo de fabricação do clínquer influencia nas propriedades do cimento Portland resultante, mas as duas características primeiras mostram-se como as mais significativas na indústria cimenteira. Um cimento com baixo grau de moagem, ou seja, pequena superfície específica apresentará pega lenta, pois a cinética de hidratação será, também, mais lenta; um cimento com alto teor de C₃A apresentará rápida cinética de hidratação, etc.

Ainda segundo Bezerra (2006), não são compostos diferentes que determinam as propriedades do cimento Portland, mas a finura e a proporção de cada uma de suas quatro fases principais. No entanto, não se pretende dizer que adições e aditivos incorporados ao cimento Portland não são capazes

de modificar suas propriedades, eles podem até ser utilizados, mas geralmente o são com a finalidade de otimizar alguma propriedade desejada.

2.5.1 Hidratação do cimento Portland

Os compostos presentes no Portland são anidros, e quando postos em contato com a água, reagem com ela, formando produtos hidratados. A hidratação do cimento consiste na transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis. Na hidratação, há formação de uma camada de gel em torno dos grãos dos compostos anidros, de maneira que, na zona de transição (zona intermediária entre o cristal primário e o gel) – não confundir com o conceito de zona de transição definido como sendo a interface entre a pasta de cimento e o agregado – a solução é supersaturada em relação aos compostos hidratados. As variações de concentração de soluto e água fazem com que se gere um gradiente de concentração, originando uma pressão osmótica que vai trazer a ruptura do gel, expondo novas áreas do composto anidro à ação da água. Os silicatos hidratados são os compostos mais importantes do concreto endurecido (PETRUCCI, 2005).

O cimento Portland foi desenvolvido, acidentalmente, para ser empregado em temperaturas próximas à temperatura ambiente (5°C a 40°C). Sob tal condição, ou seja, temperatura ambiente, o cimento Portland se hidrata e gera os produtos constantes da Tabela 3 (BEZERRA, 2006):

Tabela 3. Produtos da hidratação do cimento Portland.

Fase	Simbologia da indústria do cimento	Massa específica [g/cm ³]	Volume molar [cm ³ /Mmol]
Silicato cálcico hidratado	C-S-H	1,85	124,0
Hidróxido de cálcio	CH	2,24	33,1
Etringita	C ₆ AS ₃ H ₃₂	1,75	715,0
Monossulfato	C ₄ ASH ₁₂	1,99	313,0
Hidrogranada	C ₃ AH ₆	2,52	150,0
Hidróxido de ferro	FH ₃	2,20	95,2

Os produtos gerados na hidratação do cimento Portland em temperaturas elevadas ainda não são totalmente conhecidos, o que instiga o desenvolvimento de novas pesquisas para que seja possível conhecer tais produtos hidratados.

Morelli (2001) afirma que a quantidade de água necessária para se hidratar completamente o cimento Portland varia de 35% a 40% (fator – água/cimento de 0,35 a 0,40) em relação à massa de cimento anidro.

No que se refere ao ganho de resistência, pode-se dizer que, até os três primeiros dias, o ganho de resistência é assegurado pela hidratação dos aluminatos e do C_3S . Entre três e sete dias, o ganho de resistência é assegurado pela hidratação do C_3S , o que se processa até os 28 dias com pouca participação do C_2S . A partir dos 28 dias, o aumento de resistência é devido à hidratação do C_2S (MEIRA, 2003).

Conforme Meira (2003), O C_3S é o composto essencial do cimento Portland. Este composto é responsável pela resistência inicial dos cimentos. Reage poucas horas em contato com a água, liberando grande quantidade de calor de hidratação. A alta reatividade do C_3S se deve a uma estrutura com grandes vazios estruturais, com arranjo irregular dos íons de oxigênio em torno dos íons de cálcio.

Ainda segundo Meira (2003), o C_2S possui pega lenta, com fraca resistência até os 28 dias. Ao final do primeiro ano, chega a equivaler à resistência do C_3S . Este composto apresenta baixo calor de hidratação. A sua menor reatividade se deve ao fato de ter uma estrutura muito mais regular que a anterior. Enquanto que, O C_3A possui pega instantânea, desenvolvendo altíssimo calor de hidratação. Tem baixa resistência e não resiste à ação de águas sulfatadas. Evidentemente, sua quantidade deve ser pequena, devido aos inconvenientes citados. No entanto, a presença de alumina é importante na fase de produção do cimento, pois ela age como fundente, facilitando, desta forma, a formação de clínquer a temperaturas mais baixas.

O ataque por sulfatos é uma das principais fontes de degradação do concreto, já que ocorrem reações envolvendo a formação de produtos expansivos. Os sulfatos provenientes de fontes externas reagem com as fases hidratadas do cimento, portadoras de alumina, formando etringita, que está associada à expansão, devido ao esforço de pressão causado pelo crescimento de seus cristais, bem como da adsorção de água em uma estrutura pouco cristalina.

A qualidade do concreto é o melhor meio de proteção contra o ataque por sulfatos, ou seja, um concreto com baixa permeabilidade retarda a entrada de sulfatos no concreto e os seus efeitos. Outra solução é o emprego de cimentos resistentes a sulfatos, o que reduzem a formação de etringita e os seus efeitos deletérios, devido aos baixos teores de C₃A.

O C₄AF possui pega rápida, porém não instantânea como a do C₃A. Sua desvantagem é a baixa resistência, mas em compensação possui o Fe₂O₃ que trabalha como fundente e também fixa parte da alumina, melhorando o desempenho do cimento ao ataque de águas sulfatadas. A estrutura do C₃A e a estrutura do C₄AF são caracterizadas por grandes vazios e, conseqüentemente, uma elevada reatividade. Por terem uma estrutura muito aberta, geralmente incorporam impurezas como magnésio, sódio, potássio e sílica.

Segundo Petrucci (2005), o aluminato de cálcio hidratado reage com o sulfato de cálcio e forma um sulfoaluminato conhecido pelo nome de sal de Candlot.



A cristalização desse sal se dá com fixação de muita água. Havendo cal dissolvida na água de embebição, o aluminato não está dissolvido e forma-se nos poros da massa uma quantidade de sulfoaluminato maior do que eles podem conter, o que provoca a expansão e a desagregação do material.

Em caso contrário, isto é, formando-se o sulfoaluminato a partir do aluminato dissolvido, a cristalização do sal não ocupa um volume maior que o dos três componentes (água – aluminato – sulfato), o elemento sólido se aloja nos poros e a massa se torna mais compacta.

Dos compostos resultantes, o único solúvel em água é o hidróxido de cálcio, sendo esta solubilidade a principal causa de degradação do cimento endurecido.

Nos cimentos Portland comuns formam-se de 13% a 17% de Ca(OH)_2 . A alta resistência do cimento se obtém pela melhor moagem ou pelo aumento de C_3S (aumentando o CaO), mas isto ocasiona aumento de hidróxido, isto é, a melhoria de resistência é acompanhada de menor estabilidade química.

O Ca(OH)_2 dissolve-se até na água absorvida da umidade do ar e, vindo à superfície e em contato com o CO_2 do ar, resulta na formação de CaCO_3 . Este carbonato insolúvel dá eflorescências brancas.

Na água do mar, o sulfato de magnésio reage com Ca(OH)_2 e resulta CaSO_4 , com conseqüente depósito de hidróxido de magnésio. Este sulfato de cálcio ocasiona expansão na massa do cimento e, juntamente com o existente na água do mar, combina-se com a alumina e dá o sal de Candlot (sulfoaluminato de cálcio insolúvel), o que agrava com o tempo a fragmentação do cimento. A limitação da quantidade de gesso é feita pelo teor de SO_3 ; quantidades excessivas podem dar lugar a cimentos expansivos (Sal de Candlot).

Quando submetido a temperaturas superiores a 110°C , o cimento Portland hidratado apresenta perda significativa de resistência à compressão. Este fenômeno é conhecido por retrogressão de resistência (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O principal e mais abundante composto responsável pela conhecida resistência mecânica à compressão do cimento Portland endurecido é o C-S-H, que apresenta estrutura parcialmente cristalina (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O outro composto mais abundante é o CH (também

conhecido por Portlandita). A problemática envolvida na hidratação do cimento Portland diante de temperatura elevada refere-se às mudanças de fase que ocorrem no C-S-H e que são responsáveis pelo fenômeno da retrogressão de resistência.

2.5.2 Hidratação do cimento Portland em altas temperaturas

Estudos sobre os processos de hidratação do cimento Portland em temperaturas próximas da ambiente são limitados. Em temperaturas elevadas, acima de 40°C, o conhecimento se torna mais difícil, visto quão variável são as respostas deste material quando suas condições de cura são modificadas.

O principal e mais abundante composto responsável pela conhecida resistência mecânica à compressão do cimento Portland endurecido é o C-S-H que apresenta estrutura parcialmente cristalina (MEHTA e MONTEIRO, 1994 *apud* BEZERRA, 2006), O outro composto mais abundante é o CH (também conhecido por Portlandita).

Quando submetido a temperaturas superiores a 110°C, o cimento Portland hidratado apresenta perda significativa de resistência à compressão. Este fenômeno conhecido por regressão da resistência, (MEHTA E MONTEIRO, 1994 *apud* BEZERRA, 2006) ou retrogressão de resistência, ainda não é bem conhecido e é tema de muitos trabalhos sobre o seu mecanismo de atuação.

A problemática envolvida na hidratação do cimento Portland diante de temperatura elevada refere-se às mudanças de fase que ocorrem no C-S-H e que são responsáveis pelo fenômeno da retrogressão de resistência. Para minimizar os efeitos da retrogressão de resistência, é possível adicionar sílica cristalina em substituição ao cimento com o objetivo de incrementar a reação pozolânica (NELSON *et al*, 1990 e HEWLETT *et al*, 2004 *apud* BEZERRA, 2006).

A estrutura cristalina do C-S-H assemelha-se ao gel de tobermorita. No entanto, estes compostos não podem ser confundidos, pois suas propriedades

mecânicas e físico-químicas são distintas. Ao ser aquecido, o C-S-H é convertido em várias outras fases de acordo com o valor da temperatura. Entre 110°C e 120°C ele é convertido na fase α -silicato dicálcico hidratado (α -C₂S ou [Ca₂(HSiO₄)OH]), que possui estrutura cristalina, massa específica alta, elevada permeabilidade e baixa resistência mecânica à compressão. Em torno de 202°C, o C-S-H também pode ser convertido em silicato tricálcico hidratado (C₃S ou [Ca₆Si₂O₇(OH)₆]), que possui características semelhantes ao α -C₂S. Observe-se que o aumento da temperatura provoca, na realidade a desidratação do cimento Portland, com a geração de compostos semelhantes aos compostos originais.

A adição de sílica cristalina, na forma de pó de sílica (*silica flour*) ou na forma de areia de sílica (*silica sand*) modifica a trajetória deste processo natural de conversão e transforma o C-S-H, na temperatura de 120°C, em tobermorita [Ca₅(H₂Si₆O₁₈) 4H₂O], que apresenta baixa permeabilidade e alta resistência à compressão. Com o aumento da temperatura, novas transformações ocorrem a 150°C, com a conversão da tobermorita em xonotlita [Ca₆Si₆O₁₇(OH)₂] e gyrolita [Ca₈(Si₄O₁₀)₃(OH)₄ ~ 6H₂O], que são fases que apresentam permeabilidade e resistência à compressão semelhantes às da tobermorita. Elevando-se a temperatura para 250°C, a gyrolita é convertida em truscotita [Ca₇(Si₄O₁₀)(Si₈O₁₉)(OH)₄ H₂O], esta apresenta permeabilidade superior e resistência à compressão inferior em relação à tobermorita. Outras fases podem surgir, como é o caso da pectolita [NaCa₂HSi₃O₉] e da scawtita [Ca₇(Si₆O₁₈)CO₃ 2H₂O]. A pectolita é formada quando a tobermorita é exposta a soluções salinas de sódio na temperatura de 150°C, havendo redução, portanto, de xonotlita e gyrolita. A pectolita apresenta alta permeabilidade em relação à xonotlita, mas resistência à compressão da mesma ordem de grandeza (HEWLETT *et al*, 2004 *apud* BEZERRA, 2006). O CH (hidróxido de cálcio ou Portlandita) que não foi consumido na reação pozolânica é convertido em CaO e água (BAZANT *and* KAPLAN, 1996 *apud* BEZERRA, 2006).

É importante lembrar que estas conversões não seguem um único sentido, ou seja, a tobermorita não é convertida, necessariamente, em

xonotlita, gyrolita e truscotita, alguns autores, como o próprio TAYLOR (LUKE *et al*, 1981), relatam experiências em que se observou a conversão da truscotita em xonotlita, ou seja, um processo inverso ao mais comum, evidentemente, para que isto ocorra, as condições de cura e temperatura são necessariamente diferentes. Estes autores relatam que a presença de CaO livre em detrimento de sílica favorece a formação primeira da xonotlita, enquanto que sílica livre em detrimento da CaO livre favorece a formação primeira da truscotita (LUKE *et al*, 1981 *apud* BEZERRA, 2006).

No caso do cimento Portland sem adição de sílica, segundo LANKARD (1970 *apud* BAZANT and KAPLAN, 1996) observam-se duas mudanças exotérmicas de fase importantes; uma a 105°C, correspondente à conversão do C-S-H em tobermorita e outra a 550°C, correspondente à conversão do CH em C. BAZANT e KAPLAN (1996) também citam a conversão do C-S-H em β -wollastonita a partir de 105°C.

As fórmulas químicas destes compostos não são exatamente conhecidas, por exemplo, a tobermorita pode apresentar variações como $[\text{Ca}_4(\text{H}_2\text{Si}_5,5\text{O}_{17}) \text{Ca} 4\text{H}_2\text{O}]$ (TAYLOR, 2003), ou pode haver incorporação de alumínio e sódio na rede cristalina apresentando defeitos intersticiais. O importante, entretanto, é que estas variações de fases apresentam comportamento mecânico e permeabilidades semelhantes; além disso, CAO e DETWELLER (1995) também relatam que a rede de poros intersticiais vai aumentando à medida que a temperatura de cura aumenta.

Existem ainda outros compostos secundários que são formados quando o cimento Portland hidratado, previamente aditivado com sílica ou não, é aquecido, tais como a *foshagite*, *hillebrandite*, *jaffeite*, *afwillite*, *calciochondrodite*, *reyerite* (esta fase não deve ser confundida com a truscotita, pois possui alumínio e álcalis LUKE *et al*, (1981), *kilchoanite*, *rankinite*, etc.

Ao todo são reportadas 22 fases conhecidas que podem ser formadas com o aumento da temperatura, não significando que não possam existir outras. A Figura 6 mostra, possivelmente, a melhor forma de apresentação da

retrogressão de resistência e outros fenômenos relacionados às mudanças de fases que podem ocorrer quando o cimento Portland hidratado é aquecido (NELSON *et al*, 1990 e HEWLETT *et al*, 2004 *apud* BEZERRA, 2006).

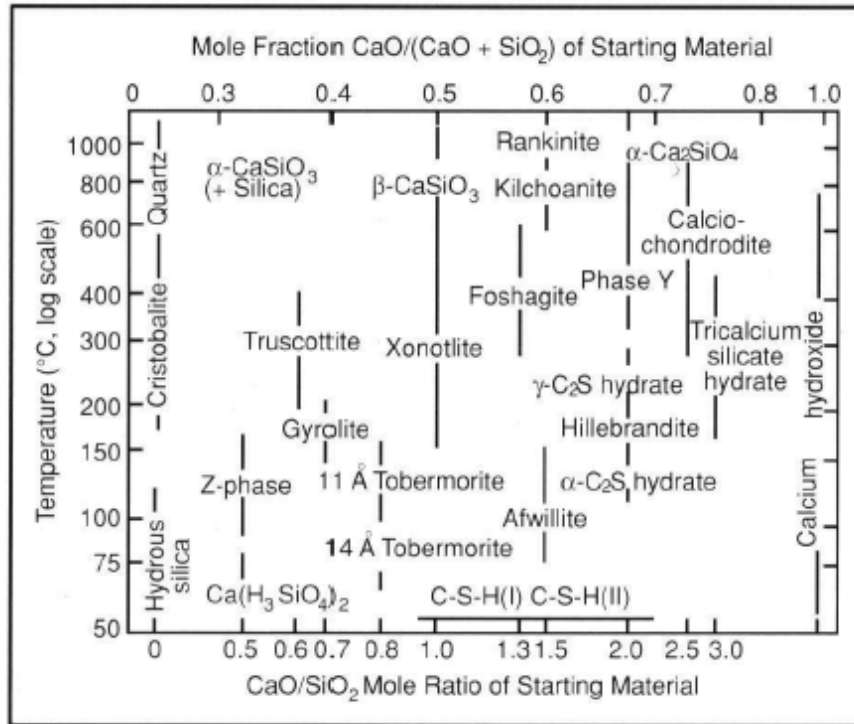


Figura 6. Representação de mudanças de fases do cimento Portland aquecido em função da fração C/S (BEZERRA, 2006).

A adição da sílica pode ser entendida pela formação da tobermorita, esta fase possui seis moléculas de SiO_2 e cinco de CaO , enquanto que aquela geralmente possui duas moléculas de SiO_2 e três de CaO . Assim, é sempre necessário mais SiO_2 (3,00 vezes mais) do que CaO (1,67 vez mais) para a formação da tobermorita. A diferença entre o pó de sílica e a areia de sílica está em sua granulometria. Enquanto o pó de sílica apresenta partículas inferiores a $75 \mu\text{m}$ (equivalente à peneira número 200), a areia de sílica apresenta partículas entre $75 \mu\text{m}$ e $210 \mu\text{m}$. Como visto, o emprego de sílica apresenta implicações diretas na formação da tobermorita (HEWLETT *et al*, 2004). Partículas grandes de sílica (areia de sílica) reagem com o C-S-H da

forma descrita anteriormente formando a tobermorita, mas partículas menores são convertidas juntamente com o C-S-H em gyrolita e truscotita sem passar pela fase tobermorita, isto causa redução de variações de fases e preservação de uma microestrutura com poucas modificações e, portanto, mais estável do ponto de vista mecânico.

A sílica também pode ser utilizada na forma de sílica ativa (fumos de sílica ou sílica volatilizada) com partículas ainda mais reduzidas (0,10 μm e superfície específica compreendida entre 20 000 m^2/kg e 25 000 m^2/kg). Esta solução pode ser viável apenas para aquelas cimentações em que são necessárias pastas mais leves com massas específicas inferiores a 1 800 kg/m^3 , pois a alta superfície específica da sílica ativa exige fator água/cimento elevado para permitir o bombeio (bombeamento, observação nossa) das pastas.

Sobre os aluminatos celita e ferrita, ainda não se tem muito conhecimento sobre os seus comportamentos diante de temperaturas elevadas (HEWLETT *et al*, 2004). Geralmente os silicatos são mais importantes, pois representam em torno de 80% do cimento Portland, além disso, quando o cimento Portland é aditivado por alguma forma de sílica (até 40%), esta quantidade passa para quase 90%, o que determina o comportamento do cimento Portland diante de temperaturas elevadas (BEZERRA, 2006).

Através de caminho oposto a estes pesquisadores citados, WU *and* PENG, (2003) analisaram a evolução de pasta do cimento Portland especificamente para poços submetidos à injeção de vapor e observaram incremento da resistência à compressão a medida que a temperatura foi aumentando, o que soa estranho face aos resultados geralmente relatados na literatura, esta pesquisa menciona incremento de resistência para temperatura de até 180°C e declínio só a partir deste valor. Na pesquisa não foram utilizadas a *silica sand* nem a *silica flour*, mas pozolanas comuns, como a cinza da casca de arroz e a sílica ativa, talvez por isto os resultados tenham sido diferentes, entretanto, a partir da temperatura de 180°C o comportamento da

resistência à compressão volta a ser o relatado na literatura por meio do fenômeno da retrogressão de resistência.

2.6 Cimento Portland pozolânico

O Cimento Portland pozolânico é um aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland (produto constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas) e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou em separado (NBR-5736, 1991).

Os cimentos Portland pozolânicos devem atender à composição compreendida entre os limites fixados na Tabela 4 e às exigências químicas indicadas na Tabela 5.

Tabela 4. Teores dos componentes do cimento Portland pozolânico.

Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)		
		Clínquer + sulfato de cálcio	Material Pozolânico	Material carbonático
	25			
CP IV	32	85-45	15-50	0-5

Tabela 5. Exigências químicas para o cimento Portland pozolânico.

Determinações químicas	Limites (% da massa)
Perda ao fogo (PF)	4,5
Óxido de magnésio (MgO)	6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	4,0
Anidrido carbônico (CO ₂)	3,0

As Tabelas 6 e 7 apresentam as exigências físicas e mecânicas que devem ser respeitadas para o cimento Portland pozolânico.

Tabela 6. Exigências físicas e mecânicas para o cimento Portland pozolânico.

Características e propriedades	Unidade	Limites	
		CP IV-25	CP IV-32
Finura (resíduo na peneira 75 µm)	%	8,0	8,0
Tempo de início de pega	H	1	1
Expansibilidade a quente	Mm	5	5
Resistência à compressão 3 dias de idade	MPa	8,0	10,0
Resistência à compressão 7 dias de idade	MPa	15,0	20,0
Resistência à compressão 28 dias de idade	MPa	25,0	32,0

Tabela 7. Exigências físicas e mecânicas (facultativas) para o cimento Portland pozolânico.

Características e propriedades	Unidade	Limites	
		CP IV-25	CP IV-32
Resistência à compressão aos 91 dias de idade	MPa	32,0	40,0
Tempo de fim de pega	h	12	
Expansibilidade a frio	mm	5	

2.7 Concreto

O concreto de cimento Portland é um material composto aplicado em grande escala na indústria da construção civil. O concreto é o resultado de uma mistura devidamente proporcional entre um meio contínuo aglomerante, agregado miúdo e graúdo (material granular sem forma e volume definido, geralmente inerte), água e possivelmente aditivos.

Agregado é o material granular, tal como areia, o pedregulho, a pedra britada ou escória de alto forno. Agregado graúdo se refere a partículas

maiores do que 4,8mm (peneira nº 4), e o agregado miúdo se refere a partículas menores que 4,8mm, porém maiores que peneira ABNT N° 200 (0,074 mm) (MEHTA, 1994).

De acordo com Mehta (1994), comparado com outros materiais a estrutura do concreto não é uma propriedade estática. Isto é porque dois dos três componentes da estrutura – a pasta de cimento e a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento – continuam a se modificar com o tempo. Neste aspecto, o concreto se assemelha à madeira e a outros seres vivos. De fato, a palavra concreto vem do latim “concretus”, que significa crescer. A resistência e outras propriedades do concreto dependem dos produtos de hidratação do cimento, que continuam a se formar por muitos anos. Embora os produtos sejam relativamente insolúveis podem se dissolver vagarosamente e se recristalizar em ambientes úmidos, permitindo que o concreto sele suas microfissuras.

Na constituição do concreto é importante ter conhecimento das substâncias formadas quando o cimento Portland reage, pois o cimento em si não é cimentante, os seus produtos de hidratação sim, têm propriedades aglomerantes. Dentre os intervenientes que afetam a vida útil do concreto, é imprescindível ter cuidados com a sua resistência, cura, durabilidade e efeitos da temperatura.

2.7.1 Resistência do concreto

Geralmente a resistência, que é a medida de tensão exigida para romper material, é considerada como a propriedade mais importante do concreto, embora, em muitos casos práticos, outras características, como a durabilidade e a permeabilidade sejam, de fato mais importantes. Não obstante, a resistência dá uma idéia geral da qualidade do concreto, pois ela está diretamente relacionada com a estrutura da pasta do cimento hidratada.

Na prática da engenharia, considera-se que a resistência de um concreto a uma certa idade, curado em água a uma temperatura estabelecida,

depende de apenas dois fatores: a relação água/cimento e o grau de adensamento. Quando o concreto está plenamente adensado, considera-se sua resistência como inversamente proporcional à relação água/cimento. Deve ser lembrado que a relação água/cimento determina a porosidade da pasta de cimento endurecida em qualquer estágio da hidratação. Assim, tanto a relação água/cimento como o grau de adensamento têm influência sobre o volume de vazios do concreto (NEVILLE,1977).

2.7.2 Cura do concreto

Para se obter um bom concreto, o lançamento de uma mistura adequada deve ser seguido pela cura em ambiente apropriado durante as primeiras fases do endurecimento. Cura é a denominação dada aos procedimentos a que se recorre para promover a hidratação do cimento e consiste em controlar a temperatura e a saída e entrada de umidade para o concreto.

Mais especificamente, o objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível de saturado, até que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, tenham sido preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento até uma condição desejável. Existem duas grandes categorias de métodos de cura, a por molhagem e a cura por membrana.

É fundamental que a água de cura seja isenta de substâncias que possam atacar o concreto endurecido. A temperatura da água não deve estar muito abaixo da temperatura do concreto para evitar choque térmico ou gradientes acentuados de temperatura; o ACI 308-92 recomenda que a diferença não ultrapasse 11°C (NEVILLE,1977).

2.7.3 Durabilidade do concreto

A durabilidade ou a capacidade que o material tem de resistir aos agentes destrutivos, quer mecânicos, quer químicos é um fator determinante para a definição da futura aplicação deste material.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) é importante no estudo da durabilidade do concreto observar-se o comportamento deste em relação à água, visto que a água é um agente primário que tem capacidade de criar mecanismos para degradar materiais da natureza. A água funciona como veículo de transporte dos íons agressivos, isto é, ela funcionará como causa de muitos processos físicos de degradação ou como fonte de processos químicos. Portanto, pode e deve ser considerado como fator importante para a maioria dos problemas de durabilidade do concreto.

Segundo Farias (2007), no estudo da durabilidade é fundamental o conhecimento do significado dos seguintes termos:

- degradação: processo através do qual o material sofre transformações irreversíveis que provocam perda de qualidade ou valor;
- agentes ou fatores de degradação: agentes químicos ou biológicos e ações físicas que provocam a degradação do material;
- mecanismo de degradação: formas pelas quais os agentes provocarão perdas nas propriedades previamente esperadas ou existentes do material; e
- indicadores de degradação: parâmetros utilizados para quantificar os mecanismos de degradação. São propriedades mensuráveis, as quais expressam a variação nas propriedades ou desempenho do produto durante sua utilização ou avaliação. A manutenção das propriedades é indispensável para justificar o desempenho do material ao longo de sua vida útil.

É essencial que as peças de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto ou, pelo menos, razoável. Portanto, o concreto deve poder suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido. Nessas condições, o concreto é considerado durável.

Durabilidade do concreto não significa vida indefinida, nem significa suportar qualquer tipo de ação. Além disso, hoje se considera, embora não fosse bem assim no passado, que em muitas situações, seja necessária uma manutenção de rotina do concreto.

A durabilidade inadequada se manifesta por uma deterioração que pode ser originada por fatores externos ou por causas internas no interior do próprio concreto. As diferentes formas de ação podem ser físicas, químicas ou mecânicas. As causas da deterioração mecânica podem ser impacto, abrasão, erosão ou cavitação. As causas químicas de deterioração podem incluir as reações álcali-sílica e álcali-carbonato. O ataque químico externo ocorre principalmente pela ação de íons agressivos, como cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono e muitos líquidos e gases naturais ou industriais. As causas físicas compreendem os efeitos de altas temperaturas ou de diferenças de coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento hidratado.

O transporte de fluídos no concreto também afeta na durabilidade deste. São três os principais fluidos importantes que podem ingressar no concreto: água, pura ou com íons agressivos, dióxido de carbono e oxigênio. Eles podem se deslocar através do concreto através de três modos diferentes, mas todo deslocamento depende basicamente da estrutura da pasta de cimento hidratado.

A permeabilidade é quem vai favorecer o ingresso desses fluidos no concreto. A rigor, permeabilidade se refere ao escoamento de um fluido através de um meio poroso. No caso do concreto, o deslocamento dos diversos fluidos se efetua não somente por escoamento através do meio poroso, mas também por difusão e adsorção, de modo que o que interessa realmente é a penetrabilidade do concreto.

Os poros importantes para a permeabilidade são aqueles com diâmetro de, pelo menos, 120 nm ou 160 nm. Esses poros devem ser contínuos. Poros que não são efetivos para o escoamento, isto é, para a permeabilidade,

compreendem, além dos descontínuos, aqueles que contêm água adsorvida e aqueles que, embora grandes, tenham uma entrada estreita (NEVILLE, 1977).

No que diz respeito à facilidade de deslocamento de fluidos através do concreto, que mencionamos como permeabilidade devem ser distinguidos três mecanismos: **permeabilidade** se refere a escoamento sob diferencial de pressão. Temos a **difusão** que é o processo no qual o fluido se desloca por efeito de uma diferença de concentração; a propriedade importante do concreto é a **difusividade**. Os gases podem se difundir através de um espaço preenchido com água ou com ar.

A carbonatação também é um processo que interfere na durabilidade do concreto. A discussão do comportamento do concreto em geral se baseia na hipótese de que o meio ambiente é ar que não reage com a pasta de cimento hidratado. No entanto, na realidade o ar contém CO_2 que, na presença de umidade, reage com a pasta de cimento hidratada; o agente é o ácido carbônico, pois o CO_2 gasoso não é reativo.

Dos componentes da pasta de cimento, o que reage mais rapidamente com o CO_2 é o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultando CaCO_3 , mas outros componentes também são decompostos produzindo-se sílica, alumina e óxido férrico hidratados.

A carbonatação em si mesma não causa deterioração do concreto, mas tem efeitos importantes. Um desses efeitos é a retração por carbonatação. Com relação à durabilidade a importância da carbonatação reside no fato de que ela reduz o pH da água dos poros da pasta de cimento de valores entre 12,6 e 13,5 para cerca de 9. Quando todo o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se carbonata, o pH é reduzido a 8,3.

O fator fundamental que controla a carbonatação é a difusividade da pasta de cimento hidratada. A difusividade é uma função do sistema de poros da pasta de cimento durante o período em que ocorre a difusão do CO_2 .

Quanto ao ataque químico do concreto ocorre pela decomposição de produtos da hidratação e formação de outros produtos que, se forem solúveis,

podem ser lixiviados, e se insolúveis podem se expandir no próprio local onde se formam. Os compostos agressivos devem estar dissolvidos. O produto de hidratação mais vulnerável é o Ca(OH)_2 , mas também o C-S-H pode ser atacado. Os agregados calcários também são vulneráveis.

Os sais na forma de sólidos não atacam o concreto, mas quando dissolvidos, podem reagir com a pasta de cimento hidratado. São particularmente comuns os sulfatos de sódio, potássio, magnésio e cálcio, que se encontram em solos ou em águas freáticas. Como é pequena a solubilidade do sulfato de cálcio. A importância disso reside no fato de que esses produtos reagem também com outros produtos da hidratação do cimento e não apenas com o Ca(OH)_2 (NEVILLE, 1977).

Na Figura 7 está apresentado o fluxograma das etapas fundamentais a serem alcançadas objetivando sucesso no estudo da durabilidade do resíduo

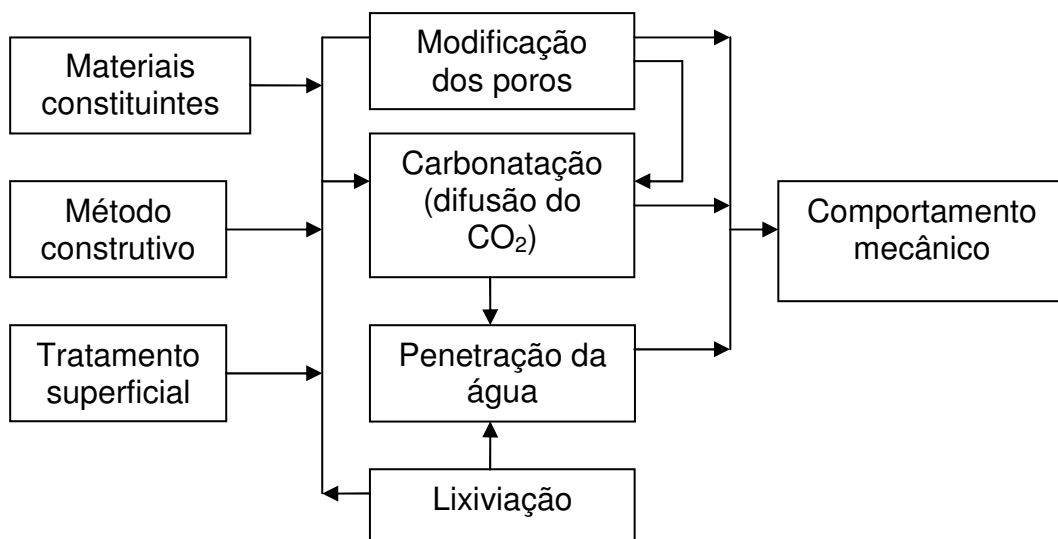


Figura 7. Fluxograma para estudo da durabilidade de concreto a partir de resíduos de construção civil reciclados. (FARIAS, 2007).

de construção.

Ainda segundo Farias (2007), para quantificar a durabilidade são empregados métodos que expõem o material a condições que simulam sua utilização na vida útil e, assim, se pode avaliar a degradação do material. Os

métodos mais conhecidos são: i) ensaio de durabilidade natural; ii) ensaios de durabilidade em uso; e, iii) ensaio durabilidade acelerada.

- ensaio de durabilidade natural - neste tipo de ensaio os materiais são expostos a condições que serão submetidos durante o uso. Tem como vantagem a proximidade das condições de uso do material. Porém, por ser um ensaio lento, necessita de longo tempo de exposição aos fatores de degradação para que os agentes possam agir sobre o material.
- ensaio de durabilidade em uso - este ensaio é o mais eficiente na avaliação da durabilidade do material, visto que além de submeter o material às condições de exposição real. A vantagem de utilizar esse tipo de ensaio consiste na utilização do material com a conformação e detalhes característicos do seu emprego, tais como: a fixação, a interação com outros sistemas, etc. Assim como o ensaio de envelhecimento natural requer longo tempo obtenção de respostas. Ao contrário dos ensaios naturais, quando empregados em material de construção, este ensaio utiliza o componente interagindo com outros sistemas construtivos, permitindo a avaliação sistemática do material no desempenho de sua função.
- ensaio de durabilidade acelerado - a durabilidade acelerada consiste em simular condições de exposição o mais próximo possível do uso, provocando uma variação de temperatura e umidade relativa no ambiente, reproduzindo um ambiente favorável ao transporte através dos poros dos corpos de prova, dos sulfatos e materiais cimentantes. Tem como principal vantagem a rapidez, possibilitando a obtenção de resposta em curto espaço de tempo sobre o comportamento do material. Esse tipo de ensaio baseia-se na simulação de condições de exposição do material com elevada intensidade aos agentes de degradação. Apesar de rapidez nas respostas, podem fornecer respostas imprecisas, em função de mecanismos paralelos ocorridos. A simulação da degradação de materiais de construção convencionais ou não convencionais pode ser realizada através da carbonatação acelerada do material e do uso de ciclos de molhagem e secagem do material.

2.7.4 Efeitos da temperatura sobre concreto

É fato que uma elevação da temperatura acelera as reações químicas de hidratação favorecendo as resistências iniciais do concreto. Uma temperatura mais alta durante e depois do contato inicial entre o cimento e água reduz a extensão do período de latência de modo que a estrutura total da pasta de cimento hidratada se define mais cedo.

Embora aumente as resistências logo às primeiras idades, uma temperatura mais alta pode prejudicar a resistência após os sete dias de idade. A explicação é que a hidratação inicial rápida aparentemente forma produtos com uma estrutura fisicamente mais pobre, provavelmente mais porosa, de modo que uma fração dos poros permanecerá sempre não preenchida. Segue da regra da relação gel/espaco, que isso resulta uma resistência menor, se comparada com a de uma pasta de cimento menos porosa, embora se hidratando mais lentamente, na qual eventualmente seja alcançada uma relação gel/espaco alta.

As propriedades térmicas do concreto apresentam interesse por vários motivos, dos quais se dão alguns exemplos a seguir. A condutividade e a difusividade térmicas são importantes para o desenvolvimento de gradientes de temperatura, deformações térmicas, empenamento e fissuração logo nas primeiras idades do concreto, bem como para a isolamento térmica. A condutividade térmica é a característica que mede a capacidade de o material conduzir calor e é definida como a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura.

A condutividade é pouco influenciada pelas temperaturas ambientes. Para temperaturas mais altas, a variação da condutividade é complexa. Ela aumenta pouco com o aumento de temperatura chegando a um valor máximo entre 50°C e 60°C. Com a perda de água do concreto e com o aumento da temperatura até 120°C, a condutividade diminui rapidamente. Para temperaturas acima de 120°C a 140°C o valor da condutividade tende a se estabilizar, a 800°C ela chega à cerca de metade do valor que tinha aos 20°C.

A condutividade térmica é usualmente calculada a partir da difusividade. A difusividade representa a velocidade à qual a temperatura varia no interior de uma massa, sendo, portanto um índice da facilidade com a qual o concreto pode sofrer variações de temperatura (NEVILLE, 1977).

2.8 Concreto refratário

As propriedades características do concreto refratário incluem a capacidade de resistir a temperaturas elevadas sem fundir ou decompor, e a capacidade de permanecer não-reativo e inerte quando exposto a ambientes severos. Ademais, a habilidade para proporcionar isolamento térmico é com frequência uma consideração importante (CALLISTER, 2002).

Sabemos que os refratários são produtos fundamentais para uma vasta gama de indústrias. De modo geral, qualquer processo que envolva altas temperaturas depende do desempenho de refratários. A necessidade de melhorias de processos, aumento da eficiência e da produtividade resultam em contínuos investimentos para incrementar o nível de qualidade desses produtos. Dentre eles, os refratários monolíticos ou não pré-moldados, como os concretos, têm se destacado em relação aos moldados convencionais devido a uma série de vantagens. Tais materiais não necessitam de conformação e queima prévia, apresentam facilidade de transporte, estocagem e aplicação, apresentam maior facilidade de manutenção, menor gasto de mão-de-obra e ausência de juntas (OLIVEIRA *et al*, 2007).

Ainda segundo Oliveira *et al* (2007), a evolução tecnológica de refratários monolíticos tem resultado em materiais cada vez mais densos. Esse fato foi acompanhado por um aumento na dificuldade de secagem dos concretos, em que a aplicação de taxas de aquecimento inadequada pode levar à pressurização do vapor d'água dentro da estrutura e ocasionar a explosão do refratário; ou ainda elevar consideravelmente os gastos com energia e tempo de parada para manutenção de equipamentos. Isso ocorre devido à redução da permeabilidade desses materiais. Essa propriedade fluidodinâmica está relacionada com a quantidade e distribuição da porosidade

aberta existente na microestrutura, que atua como canal para o transporte de líquidos e gases pelo corpo. Dependendo da permeabilidade pode-se aumentar a dificuldade para que o vapor de água migre do interior do corpo para a superfície.

A fim de entender melhor a influência da porosidade em um material refratário, é importante ressaltar que a porosidade é uma variável microestrutural que deve ser controlada para se produzir adequadamente este refratário. A resistência, a capacidade de suportar uma carga e a resistência ao ataque por materiais corrosivos aumentam em função de uma redução na porosidade. Ao mesmo tempo, as características de isolamento térmico e a resistência a choques térmicos são reduzidas.

O cimento de aluminato de cálcio tem sido amplamente utilizado como ligante hidráulico em concretos refratários. Tais materiais exercem um papel fundamental no processamento dos refratários monolíticos, uma vez que atuam na formação das ligações que promovem resistência mecânica a verde nos produtos. Isso ocorre por meio do processo de hidratação das fases anidras do cimento resultando na formação de compostos hidratados responsáveis pela coesão do corpo. Embora o favorecimento desse processo resulte na elevação da resistência mecânica, a formação dessas fases acarreta em queda de permeabilidade do material dificultando a secagem.

2.8.1 Secagem do concreto refratário

Em sistemas de baixa permeabilidade, como concretos refratários ligados com cimento de aluminato de cálcio, a secagem com taxa de aquecimento contínua pode ocorrer em três estágios. O primeiro estágio de aquecimento, evaporação da água livre, consiste na retirada da água fisicamente ligada das camadas mais externas do corpo. Esse estágio ocorre em temperaturas inferiores ao ponto de ebulição do fluido a ser retirado (no caso da água, temperatura inferior a 100°C). Os estágios de secagem são consecutivos e complementares, isto é, cada etapa responde pela eliminação de uma determinada fração do total de água presente no corpo. Com o final da

evaporação, inicia-se o segundo estágio de aquecimento, denominado de ebulição. Nesta etapa, a remoção da água livre tem como força motriz a geração de vapor a partir do ponto de ebulição. O terceiro estágio se deve a decomposição dos hidratos. Esta etapa é caracterizada pela remoção da água quimicamente combinada ao ligante hidráulico utilizado. Dependendo das fases formadas, essa liberação de água ocorre em diferentes faixas de temperatura (OLIVEIRA *et al*, 2007).

Dessa forma, o presente trabalho visa oferecer uma contribuição à área, ao realizar um estudo sobre o comportamento do microconcreto convencional aditivado com resíduos de caulim e granito quando este for submetido a altas temperaturas.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para a formulação dos corpos-de-prova foram utilizadas as matérias-primas descritas abaixo:

- resíduo da serragem de granito - Empresa FUJI S/A. Mármore e Granitos. Localizada na alça sudoeste, S/N Distrito Industrial de Campina Grande-PB;
- resíduo proveniente do beneficiamento do caulim - Empresa Caulisa Indústria S/A. Localizada na Cidade de Juazeirinho-PB;
- cimento Portland Pozolânico - CPIV - fabricado pela Companhia de Cimento – Cimento Brasil. Localizada na Estrada TDR Norte, 5481, Suape, Cabo de Santo Agostinho – PE. O cimento utilizado possui as seguintes características: .Clínquer e Sulfato de cálcio (85% - 45%); Escória (0%); Material Pozolânico (15% - 50%); Material Carbonático (0% - 5%);
- areia média (Agregado miúdo) - O agregado miúdo utilizado foi uma areia oriunda do Rio Gramame.
- água potável - Água utilizada nesta pesquisa foi fornecida pela Companhia de Água e Esgota da Paraíba (CAGEPA).

3.2 Métodos

Antes da incorporação dos resíduos de caulim e de granito ao microconcreto foi necessário fazer uma caracterização física, química e mineralógica destes resíduos para então serem realizados os ensaios tecnológicos. Os métodos utilizados neste trabalho facilitaram as comparações dos resultados obtidos entre os corpos-de-prova moldados conforme os traços da Tabela 8 e rompidos nas temperaturas de 30°C, 100°C, 120°C, 180°C, 230 °C, 300°C, 350°C e 400°C.

3.2.1 Preparação das amostras

Para os ensaios de caracterização os resíduos foram inicialmente secos a uma temperatura de 110°C por 24 h e posteriormente beneficiados em moinho de galga e passados em peneira ABNT número 200 (0,074 mm). Para os ensaios tecnológicos os resíduos foram seco na mesma temperatura dos ensaios de caracterização (110°C por 24 h), e em seguida beneficiados em um moinho do tipo galga e passados em peneira ABNT número 10 (2,000 mm) e retido na peneira ABNT número 200 (0,074 mm). Em seguida foram acondicionados em recipientes plásticos e etiquetados de modo a permitir posterior identificação (Figuras 8 a e 8 b).



Figura 8 a. Resíduo de caulim



Figura 8 b. Resíduo de granito

A areia foi passada na peneira de ABNT número 10 (2,000 mm), sendo desprezado o material retido, com a finalidade de diminuir a influência da zona de transição entre o agregado e a pasta. Para ser utilizada, a areia foi seca em estufa a uma temperatura de 100° C, segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

3.2.2 Ensaio de Caracterização

A caracterização das amostras foi efetuada através dos seguintes ensaios: análise granulométrica por difração de laser (AG), análise química (AQ); análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (DTA), difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.2.2.1 Análise granulométrica por difração de laser

A análise granulométrica por difração de laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptica através de difração de laser. Neste método, é combinada a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho de partículas.

Para realização desta caracterização, as amostras de resíduos foram dispersas em 250 cm³ de água destilada em agitador Hamilton Beach N5000 a velocidade de 17 000 rpm por 10 min, em seguida esta dispersão foi colocada em um equipamento CILAS modelo 1064 em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência (Figura 9).



Figura 9. Equipamento CILAS1064.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande-PB.

3.2.2.2 Análise química

As amostras de resíduos foram submetidas à análise química semi-qualitativa, por fluorescência de raios-x, em equipamento modelo 900HS da

Marca Shimadzu. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande-PB.

3.2.2.3 Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica

As análises termogravimétrica (TG) e termodiferencial (DTA) são úteis para indicar as faixas de temperaturas em que ocorrem as perdas de massas e as temperaturas em que ocorrem transformações endo e exotérmicas. As curvas térmicas foram obtidas através de um sistema de Análises Térmicas Modelo RB - 3000 da BP Engenharia, com razão de aquecimento 12,5°C/min. A temperatura máxima para ambos os casos foi de 1000°C e o padrão utilizado na DTA foi óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.

3.2.3 Ensaios Tecnológicos

Os ensaios tecnológicos foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal de João Pessoa-PB.

Os traços para confecção do microconcreto foram divididos em quatro grupos: cimento + areia; cimento+ areia + resíduo de granito; cimento+ areia+ resíduo de caulim; e cimento + areia + resíduo de granito + resíduo caulim. Para cada combinação três amostras foram preparadas. A substituição dos resíduos por areia foi na ordem de 50%, e fator água/aglomerante de 0,40 para mistura de uma parte de aglomerante e duas partes de areia. Após mistura os corpos-de-prova foram moldados em forma cilíndrica de 50 mm x 100 mm, desmoldados com 24 h, pesados e submetidos ao forno sem ventilação por período de sete dias nas seguintes temperaturas: 30°C, 100°C, 120°C, 180°C, 230°C, 300°C, 350°C e 400°C. Em seguida foram retirados do forno e novamente pesados para verificar a perda de massa. Para a obtenção dos resultados foram moldados 96 corpos de prova, vale salientar que foram moldados 72 unidades para confirmar alguns resultados, totalizando 168 corpos de prova. Para determinação da resistência a compressão dos corpos-de-prova, utilizou-se uma máquina-prensa com capacidade para 15000 kg e

velocidade de rompimento dos corpos-de-prova de 0,3 MPa/s.

A escolha em adotar corpos-de-prova cilíndricos em vez de cúbicos nos ensaios de resistência à compressão ocorreu devido à teoria da elasticidade que mostra a influência da forma do corpo-de-prova no resultado. Assim é conhecido da literatura que a resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos é aproximadamente 25% maior que a de cúbicos, isso porque os cantos e arestas do cubo favorecem a concentração de tensões que antecipa a ruptura, importante lembrar que esta situação é para os corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos com a mesma proporção de dimensão (BEZERRA, 2006). Os traços utilizados em peso estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Composição dos traços do microconcreto em grama (g).

Material [g]	Microconcreto de referência	Microconcreto com resíduo de granito	Microconcreto com resíduo de caulim	Microconcreto com resíduos de granito e caulim
Cimento CP IV	600,0	600,0	600,0	600,0
Areia	1 200,0	600,0	600,0	600,0
Resíduo de granito	-	600,0	-	300,0
Resíduo de caulim	-	-	600,0	300,0
Água	240,0	240,0	240,0	240,0

Nas Figuras de (10a a 10f) estão apresentadas as etapas pelas quais passam os corpos-de-prova e o forno em que foi realizada a cura.



Figura 10 a. Corpos-de-prova moldados.



Figura 10 b. Fornos para a cura do microconcreto.



Figura 10 c. Corpos-de-prova desmoldados.



Figura 10 d. Rompimento dos corpos-de-prova.



Figura 10 e. Corpos-de-prova de referência rompidos.



Figura 10 f. Corpos-de-prova com resíduos de granito rompidos.

3.2.4 Ensaios de Caracterização do microconcreto

Após determinação da resistência à compressão do microconcreto foram determinadas as fases formadas através dos ensaios de DRX, microscopia eletrônica de varredura e análise de energia dispersiva.

3.2.3.1 Difração de raios X

As análises de DRX foram realizadas no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande-PB.

As amostras de resíduos foram acondicionadas em porta amostra de Al para análise por DRX, em equipamento DRX 6000 da Shimadzu (Figura 11). A radiação utilizada foi $K\alpha$ do Cu (40 kV / 30 mA); a velocidade do goniômetro foi de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ$. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões contidos no ICDD, 2003.



Figura 11. Equipamento DRX 6000 da Shimadzu.

Como citado no item 3.2.1 as amostras foram passadas em peneira ABNT Nº 200 (0,074 mm), mas o ideal seria ter utilizado a peneira ABNT número 325 (0,044 mm), porque não haveria muita diferença no 2θ apresentado na difração, bem como na intensidade relativa do pico.

3.2.3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As análises de MEV foram realizadas no Centro de Tecnologia do Gás – CTGAS, Natal-RN, com o propósito de observar as topografias da superfície das amostras, como também a verificação dos tipos especiais de contrastes existentes, verificando o crescimento e solidificação de cristais através do modo elétrons secundários. Através do equipamento de energia dispersiva (EDS) acoplado ao MEV foi possível verificar pontualmente a porcentagem dos elementos químicos presentes em cada amostra.

Como as amostras possuem baixa condutividade elétrica, para evitar cargas eletrostáticas quando do bombardeamento do feixe eletrônico, foi realizado um sombreamento metálico com Au. A deposição foi feita com α de 90° (Figuras 12 a e 12 b).



Figura 12 a. Recobrimento da amostra com ouro.



Figura 12 b. Equipamento de MEV com EDS acoplado.

Para melhor entendimento, na Figura 13 estão apresentadas as atividades realizadas nesta pesquisa.

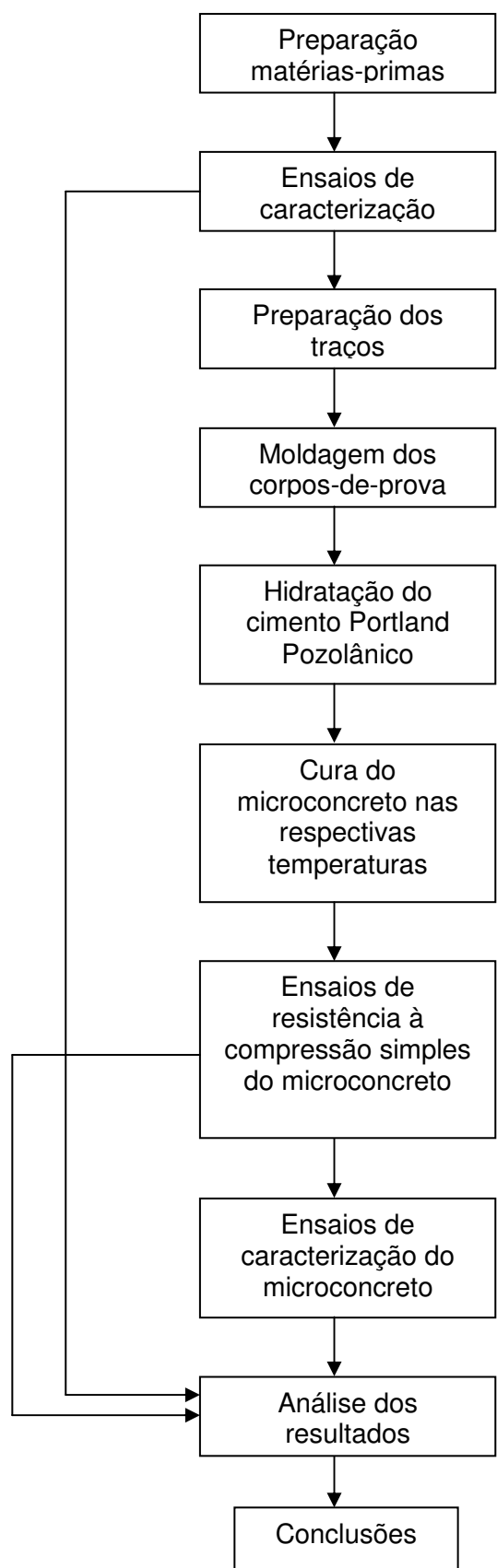


Figura 13 . Fluxograma das atividades desenvolvidas no estudo

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Matéria-prima

4.1.1 Análise granulométrica por difração de laser (AG) dos resíduos de caulim e granito

Nas Figuras 14 e 15 está apresentada a distribuição do tamanho das partículas dos resíduos granito e caulim. Pode ser verificado que o resíduo de granito apresentou curva com comportamento modal com pico em $7,00\ \mu\text{m}$ e distribuição larga de tamanho de partículas, com D_{10} de $0,89\ \mu\text{m}$, D_{50} de $5,58\ \mu\text{m}$, D_{90} , de $31,31\ \mu\text{m}$, com valor médio de $11,30\ \mu\text{m}$. O resíduo de Caulim apresentou curva com comportamento bimodal, uma distribuição larga do tamanho de partículas, com D_{10} de $5,00\ \mu\text{m}$, D_{50} de $53,00\ \mu\text{m}$, e D_{90} de $135,00\ \mu\text{m}$, com valor médio de $54,35\ \mu\text{m}$. Consegue-se perceber que o granito é mais uniforme que o caulim, já que a distribuição das partículas vai até aproximadamente $100\ \mu\text{m}$.

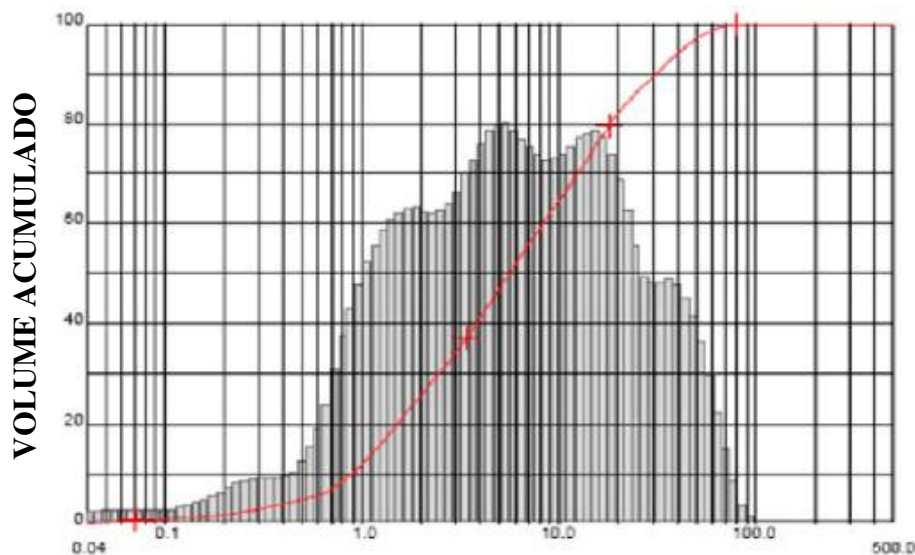


Figura 14. Distribuição do tamanho de partícula do resíduo de granito.

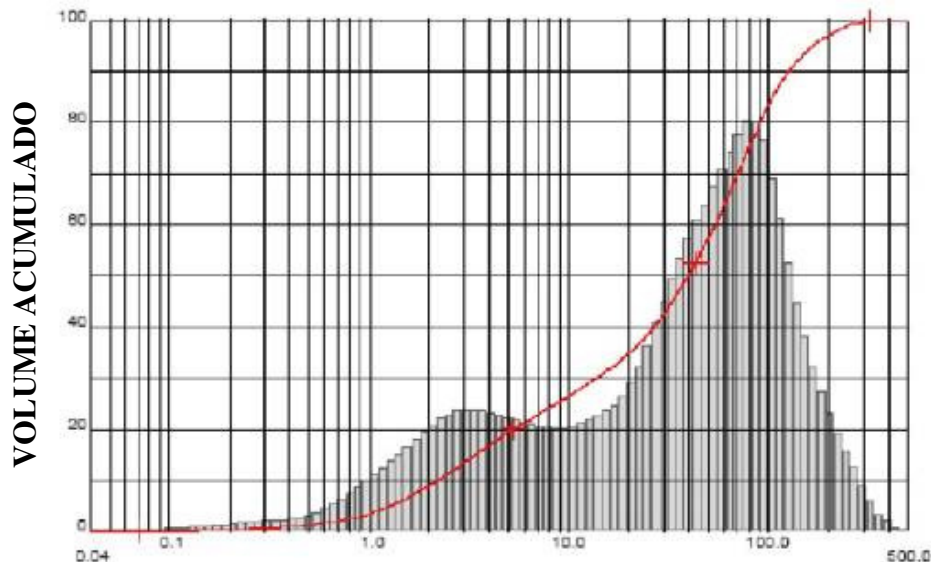


Figura 15. Distribuição do tamanho de partícula do resíduo de caulim.

4.1.2 Composição química, por fluorescência de raios X, dos resíduos de caulim e granito

Na Tabela 9 estão apresentados os valores da composição química (% em massa) dos resíduos de caulim e granito utilizados na preparação do microconcreto em estudo.

Pode-se observar que o resíduo de caulim tem grande porcentagem de sílica (>55%) e Al_2O_3 (36,00%). Estes óxidos são muito importantes nas propriedades refratárias do resíduo. O resíduo de granito tem alta quantidade de SiO_2 , mais de 60,00%, e 14,38% de Al_2O_3 . O conteúdo de Fe_2O_3 e CaO está próximo de 6,00%. A presença de Fe_2O_3 e CaO encontrada no resíduo de granito é devido ao uso de pó metálico e cal como abrasivo e lubrificante, respectivamente. Na_2O e K_2O são do feldspato e a mica do granito.

Tabela 9. Composição química dos resíduos de caulim e granito.

RESÍDUO	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	K_2O (%)	TiO_2 (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na_2O (%)
Granito	62,77	14,38	6,56	3,78	-	6,28	-	3,52
Caulim	56,50	36,00	1,00	6,14	0,13	-	-	-

4.1.3 Análise Termogravimétrica (TG) e Térmica Diferencial (DTA) dos resíduos de caulim e granito

Nas Figuras 16 e 17 estão apresentadas as curvas das análises termodiferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) dos resíduos estudados.

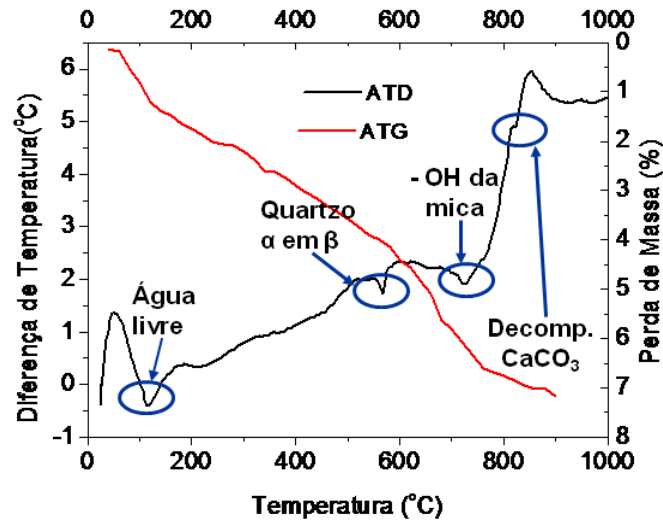


Figura 16. Análise térmica diferencial e termogravimétrica do resíduo de granito.

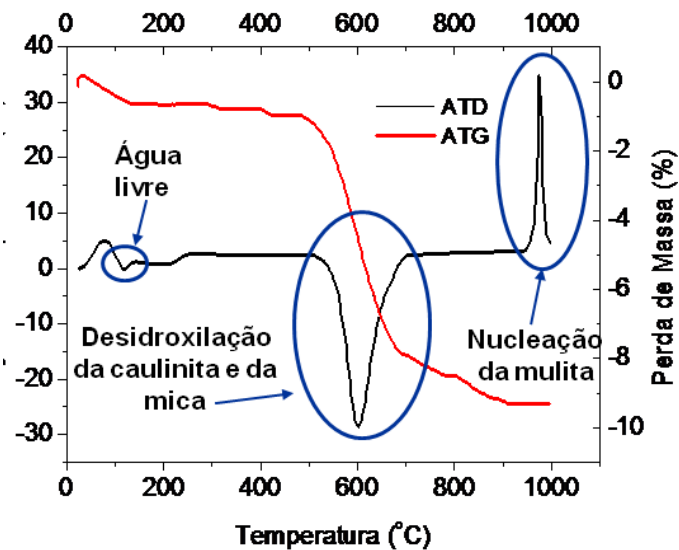


Figura 17. Análise térmica diferencial e termogravimétrica do resíduo de caulim.

Analisando a curva da análise térmica diferencial contida na Figura 16, verifica-se que resíduo de granito apresentou pico endotérmico de pequena intensidade a 110°C, o que caracteriza a presença de água livre; pico endotérmico de pequena intensidade a 556°C, correspondente à transformação de quartzo α em quartzo β ; pico endotérmico de pequena intensidade correspondente à perda de hidroxilas da mica a 740°C; pico endotérmico de pequena intensidade correspondente a recristalização da mica a 780°C e pico endotérmico de pequena intensidade correspondente a decomposição do carbonato de cálcio a 820°C.

A curva da análise térmica gravimétrica do resíduo de granito evidenciam uma perda de massa total de 7,2%, relativos à perda de água, hidroxilas da mica e correspondente a decomposição do carbonato de cálcio. Esta curva de típica do resíduo de granito (NEVES, 2002).

Analisando a curva da análise térmica diferencial contida Figura 17, verifica-se que os resíduos apresentam comportamentos térmicos distintos. Verificou-se picos endotérmicos por volta de 110°C associados a eliminação de água livre, picos endotérmicos em torno de 600°C, relacionados a desidroxilação da caulinita e da mica e picos exotérmicos por volta de 975°C - 980°C, característicos da nucleação da mulita.

A curva da análise térmica gravimétrica do resíduo caulim evidenciam uma perda de massa total de 9,2 %, sendo mais acentuada na região relacionada a desidroxilação dos argilominerais. Esta curva de típica do resíduo de caulim (MELO, 2008).

4.1.4 Análise de DRX dos resíduos de granito e caulim

Na Figura 18 está apresentado o padrão de DRX dos resíduos de caulim e granito. As fases cristalinas do resíduo de caulim são mica (espaço interplanar de 10,04 Å), caulinita (7,32 Å) e quartzo (3,34 Å). Para o resíduo de granito é observado fases cristalinas de quartzo (3,34 Å), feldspato do tipo albita de (3,19 Å), mica (10,04 Å) e calcita (3,03 Å).

As análises de DRX foram realizadas no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande-PB.

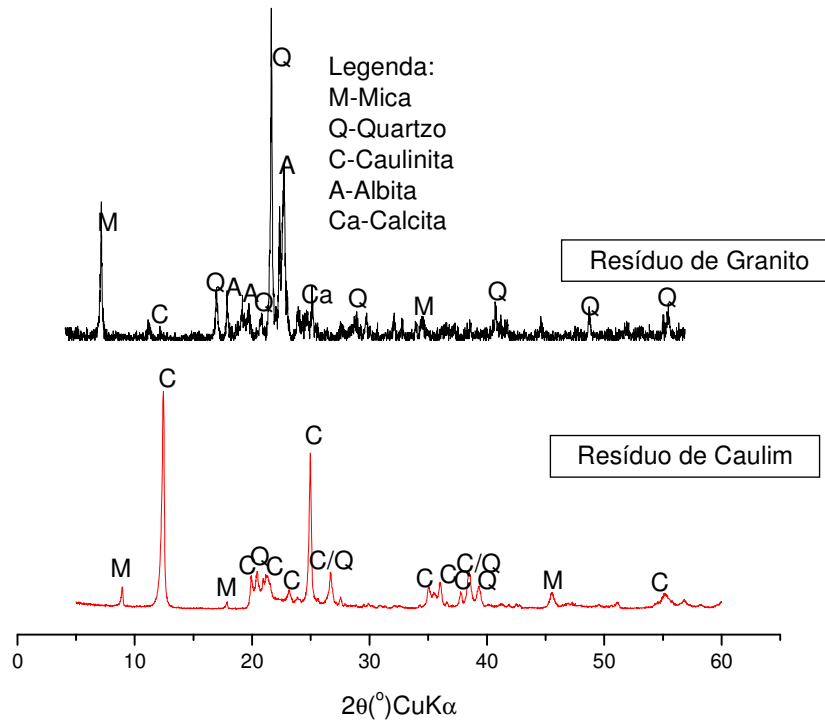


Figura 18. DRX dos resíduos estudados

4.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos resíduos de caulim e granito.

Nas Figuras 19 e 20 estão apresentadas as micrografias eletrônicas de varredura dos resíduos de caulim e granito utilizados no microconcreto.

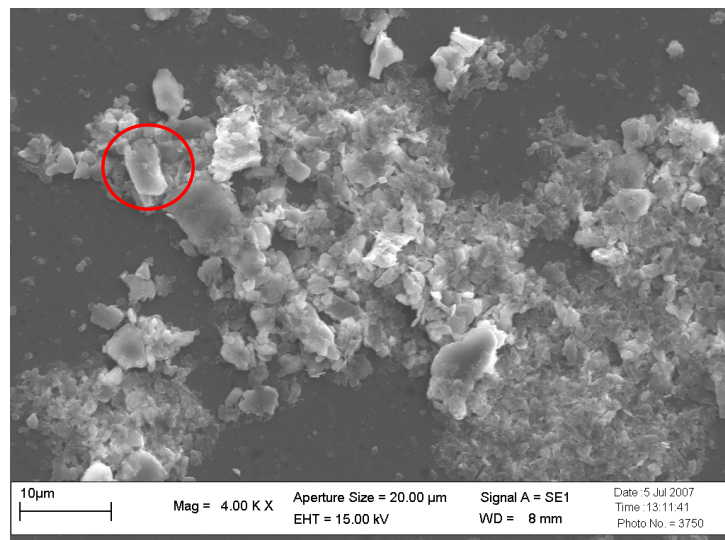


Figura 19. MEV do resíduo de caulim.

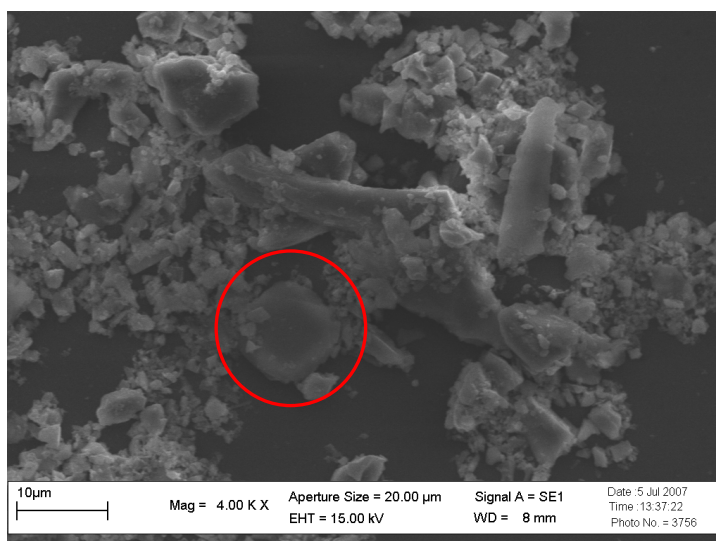


Figura 20. MEV do resíduo de granito.

Relacionando o MEV com a granulometria a laser dos resíduos de caulim e granito, pode-se verificar que a distribuição do tamanho de partículas de caulim está mais dispersa, enquanto que no granito está mais uniforme com valor médio de 11,30 μm , conforme a escala apresentada.

Analisando as micrografia das Figuras 19 e 20, verifica-se que o resíduo de caulim apresentam partículas lamelares hexagonis da caulinita na ordem de 2 μm . e aglomerados de partículas superiores a 5 μm provavelmente do quartzo ou da mica. No resíduo de granito observa-se elevado números de partículas anisométricas, com uma larga faixa de distribuição correspondente entre 2 e 5 μm provavelmente de quartzo e partículas superiores a 10 μm provavelmente da granalha presente no resíduo.

4.2 Ensaios tecnológicos do microconcreto

4.2.1 Perda de massa

A perda de massa dos corpos-de-prova foi registrada através de duas etapas de pesagem em balança eletrônica Gehaka BK 6000 com capacidade de 6100g; min.: 0,2g; divisão: 0,01g. A primeira etapa foi realizada depois da desmoldagem dos corpos-de-prova e a segunda etapa ocorreu após o sétimo

dia de permanência dos corpos-de-prova em forno a temperatura definida neste trabalho ou a temperatura ambiente no caso dos corpos-de-prova que não foram expostos ao calor intenso. Fazendo a diferença entre a primeira com a segunda leitura de pesagem foi possível mensurar a perda de massa de cada corpo-de-prova em cada condição de estudo (Tabela 10).

Tabela 10. Perda de massa do microconcreto sem e com a incorporação de resíduos de caulim e granito.

Temperatura (°C)	Perda de Massa (%)			
	Referência	Caulim	Granito	Caulim + Granito
30	1,07	1,20	0,89	1,04
100	8,48	9,18	9,23	9,90
120	9,74	11,24	10,79	10,85
180	10,02	11,22	11,60	10,53
230	9,46	10,94	10,66	10,23
300	10,46	11,27	11,43	10,48
350	10,49	12,00	11,78	12,22
400	10,56	12,67	11,83	12,24

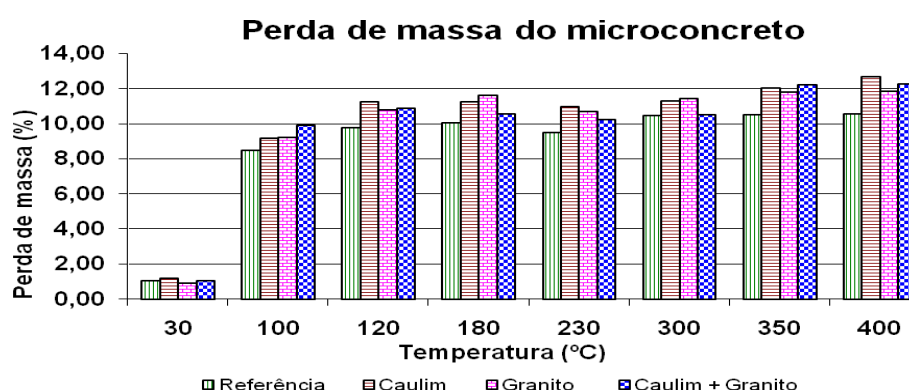


Figura 21. Perda de massa do microconcreto sem e com incorporação de resíduos de caulim e granito.

Analisando a Tabela 10 e a Figura 21 pode-se concluir que o maior percentual de perda de massa do microconcreto incorporado com resíduo foi de 12,67% para os traços com a incorporação de resíduo de caulim na temperatura de 400°C, em seguida de 12,24% para os traços incorporados com resíduo de caulim e granito na temperatura de 400°C. A menor perda de

massa foi para o microconcreto com incorporação de resíduo de granito nas temperaturas de 30°C, 120°C, 350°C, 400°C.

Na Tabela 11 estão apresentadas as porcentagens da relação entre a perda de massa na temperatura de 30°C e nas temperaturas de 100°C, 120°C, 180°C, 230 °C, 300°C, 350°C e 400°C.

Tabela 11. Relação da perda de massa do microconcreto sem e com incorporação de resíduos de caulim e granito, na temperatura de 30°C e nas demais temperaturas.

Temperatura (°C)	Relação de perda de Massa entre 30°C e as demais temperaturas (%)			
	Referência	Caulim	Granito	caulim + granito
100	12,7	12,4	10,0	10,7
120	10,9	9,8	7,9	9,5
180	10,9	9,9	7,6	9,4
230	11,2	10,2	8,3	10,1
300	10,2	11,1	7,5	10,3
350	10,2	10,5	7,1	8,7
400	10,2	9,5	7,0	8,1
Média	10,9	10,5	7,9	9,5
Média Geral			9,7	

Analisando a Tabela 11, verifica-se que a perda de massa do microconcreto submetido a 30°C correspondeu a 9,7% da perda quando submetido as demais temperaturas especificadas. Verificou-se que a menor perda de massa foi para o granito de forma decrescente para 400°C, 350°C, 300°C, 180°C, 120°C quando comparada as demais condições. À medida que a temperatura foi aumentando parte da água livre foi se combinando com os demais compostos, não havendo grande perda nas maiores temperaturas, ou seja, não evaporou. A 100°C a maior parte da água livre evaporou.

4.2.2 Propriedades mecânicas do microconcreto

As propriedades mecânicas do microconcreto foram analisadas com base na resistência à compressão simples.

4.2.2.1 Resistência à compressão simples

Na Tabela 12 estão apresentadas as resistências à compressão simples do microconcreto com e sem incorporação de resíduos de caulim e granito.

Tabela 12 - Resistência à compressão simples do microconcreto com e sem incorporação de resíduos de caulim e granito.

Temperatura (°C)	Resistência à compressão simples para cada condição (MPa)			
	Referência	Caulim	Granito	Caulim + Granito
30	14,10	5,05	7,13	5,82
100	17,41	10,32	5,10	6,96
120	15,50	12,27	10,83	9,94
180	12,23	14,63	7,43	10,53
230	8,92	11,76	6,58	7,98
300	11,21	7,43	13,50	7,01
350	15,41	6,03	11,89	6,92
400	13,42	10,06	12,91	13,93

Analisando os resultados contidos na Tabela 12 e na Figura 22, verificou-se que o microconcreto que apresentou maior resistência foi o traço incorporado com resíduo de caulim (14,63 MPa) a 180°C, (11,8 MPa) a 230°C e granito (13,5 MPa) a 300°C. Em relação aos traços de caulim e granito a 400°C a resistência mecânica foi aproximadamente aquela do traço de referência, não sendo, portanto aconselhável utilizar estes resíduos nesta temperatura.

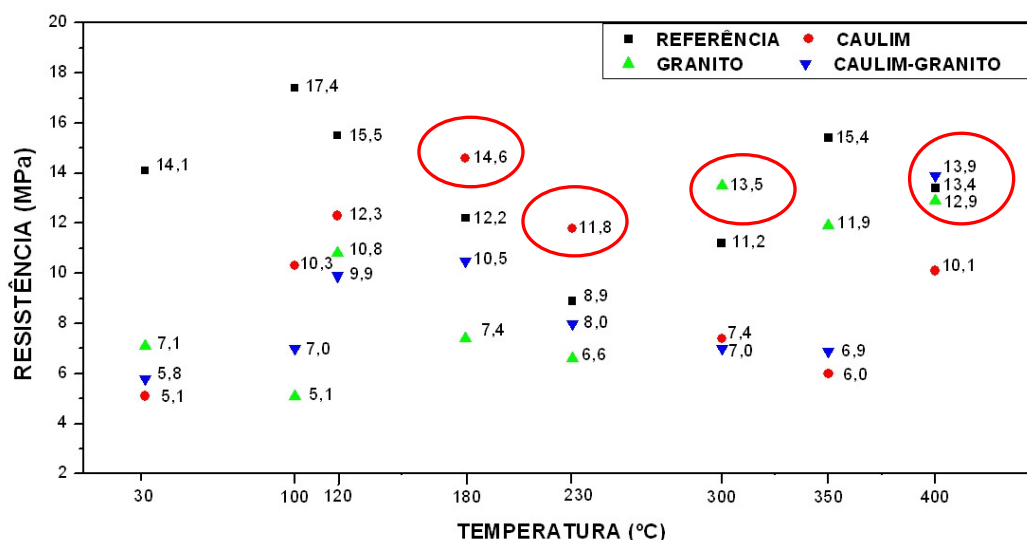


Figura 22. Resistência à compressão do microconcreto com e sem resíduos.

Na Figura 23 estão apresentados os valores de resistência à compressão do microconcreto de referência.

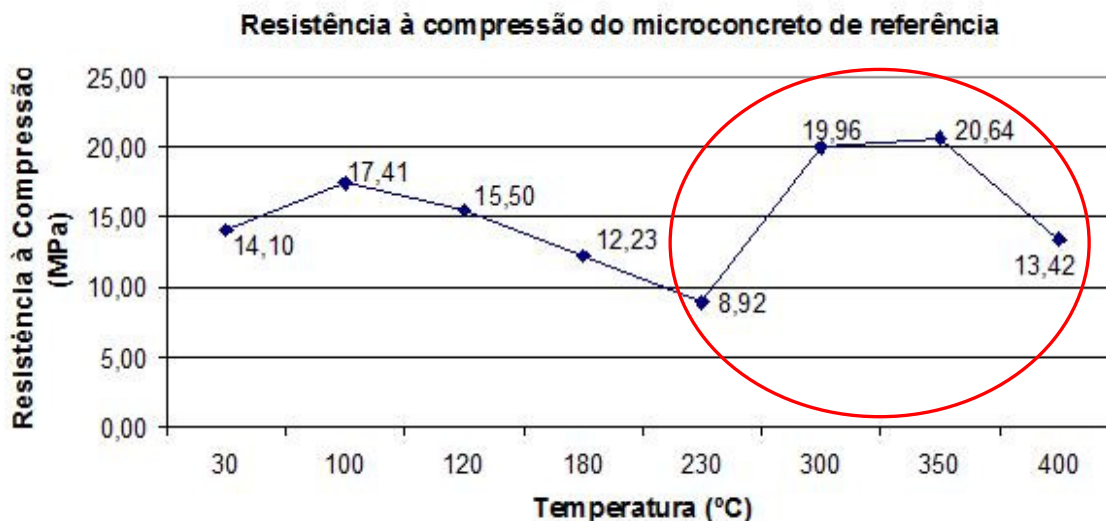


Figura 23. Resistência à compressão do microconcreto de referência.

Analisando a curva das Figuras 23 e 24, verifica-se que o comportamento do microconcreto nas primeiras temperaturas está de acordo com a literatura, ou seja, com o aumento da temperatura (entre 110°C e 120°C) a resistência mecânica à compressão diminuiu, devido a conversão do C-S-H na fase α -silicato dicálcico hidratado (α -C₂S ou [Ca₂(HSiO₄)OH]). Porém, segundo a literatura (BEZERRA, 2006), em torno de 202°C o C-S-H se converte em (C₃S ou [Ca₆Si₂O₇(OH)₆]), fazendo com que a resistência permanecesse diminuindo, porque com o aumento da temperatura o cimento Portland se desidrata gerando compostos semelhantes aos compostos originais, fato que não ocorreu neste trabalho. Portanto, fizeram-se novos ensaios de resistência à compressão entre as temperaturas de 230°C e 400°C, já que a resistência aumentou em vez de diminuir e mais uma vez este comportamento foi confirmado.

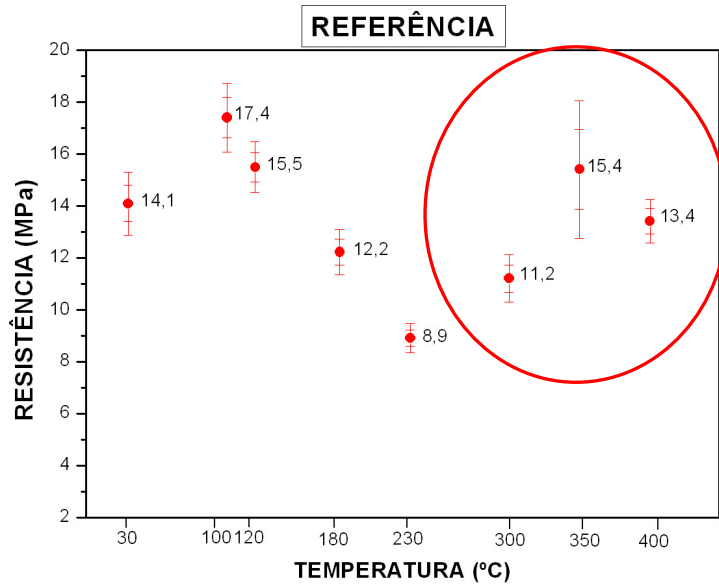


Figura 24. Confirmação da resistência à compressão do microconcreto de referência.

Na Figura 25 estão apresentadas as confirmações das resistências à compressão do microconcreto incorporado com resíduo de caulim.

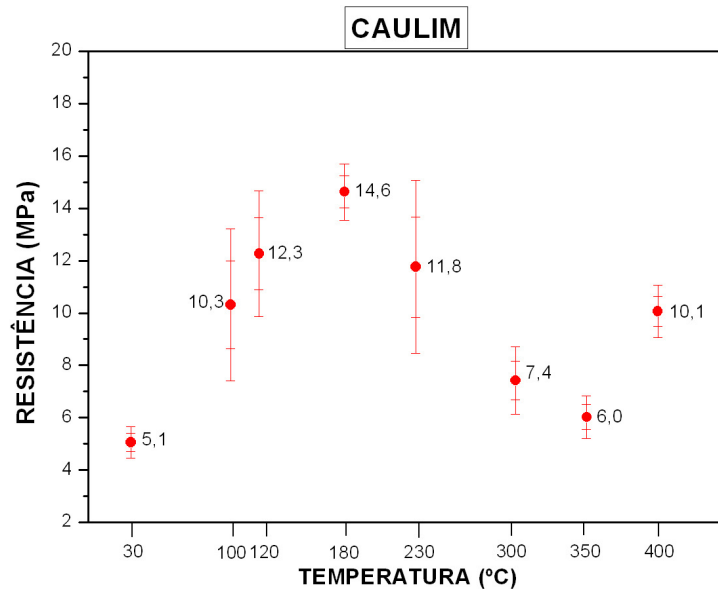


Figura 25. Resistência à compressão do microconcreto com resíduo de caulim.

Pode-se dizer que 180°C é a temperatura em que houve uma reação interessante no microconcreto aditivado com resíduo de caulim, pois a resistência aumentou, provavelmente devido ao efeito *filler* do caulim reduzindo a porosidade do microconcreto, visto que foi identificado na DRX a presença de dois tipos xonotlita ($\text{CaSi}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$ e $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$) (que é um tipo de CSH formado naturalmente a partir da conversão da tobermorita que ocorre a partir de 150°C. A DRX mostrou também a presença de caulinita, que é mais uma fase que contribuiu ao o efeito *Filler*, já que a partir dos resultados de granulometria verificou-se que a distribuição granulométrica da caulinita é vasta preenchendo os poros.

Na Figura 26 estão apresentadas às resistências à compressão do microconcreto incorporado com resíduo de granito.

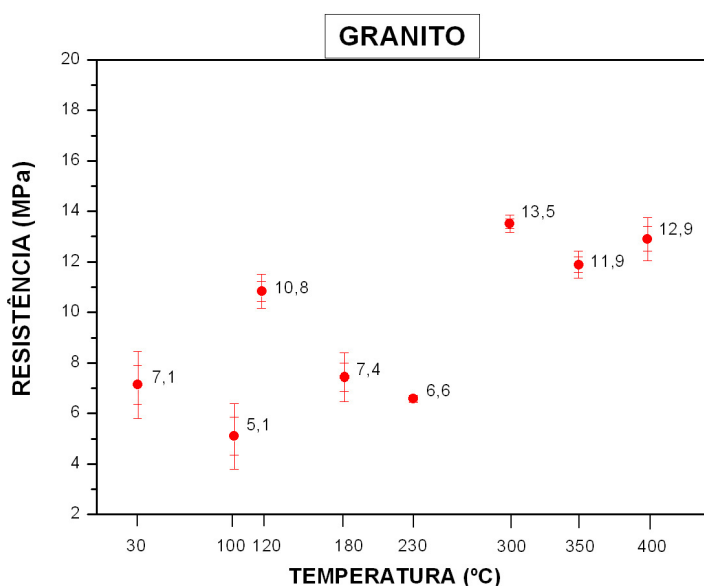


Figura 26. Resistência à compressão do microconcreto com resíduo de granito.

A resistência à compressão do microconcreto incorporado com resíduo de granito a 300°C foi maior que nas demais temperaturas possivelmente devido ao efeito pozolânico entre a sílica e o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento Portland, uma vez que foi identificada a fase xonotlita na difração de raios x.

Na Figura 27 estão apresentadas as resistências à compressão do microconcreto incorporado com resíduos de caulim e granito.

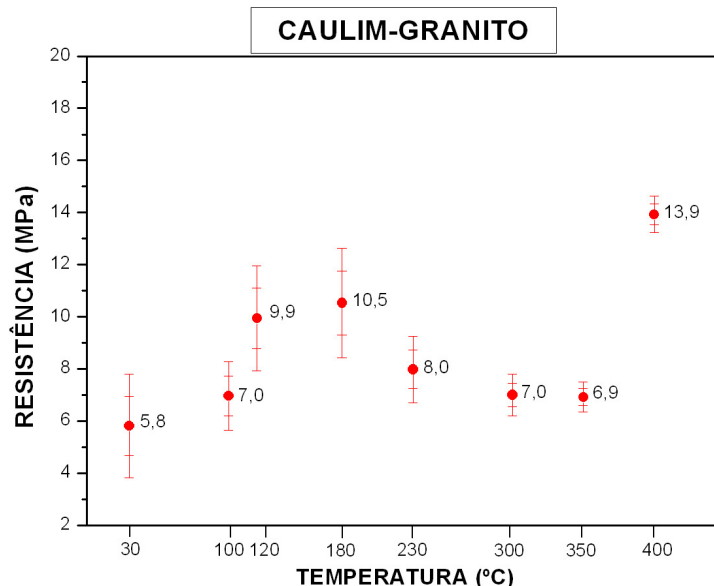


Figura 27. Resistência à compressão do microconcreto com resíduo de caulim e granito.

Na Figura 28 estão apresentados os valores da resistência à compressão simples do microconcreto incorporado com resíduos de caulim e granito, assim como a média das resistências à compressão do microconcreto incorporado com resíduo de caulim e do microconcreto incorporado com resíduo de granito.

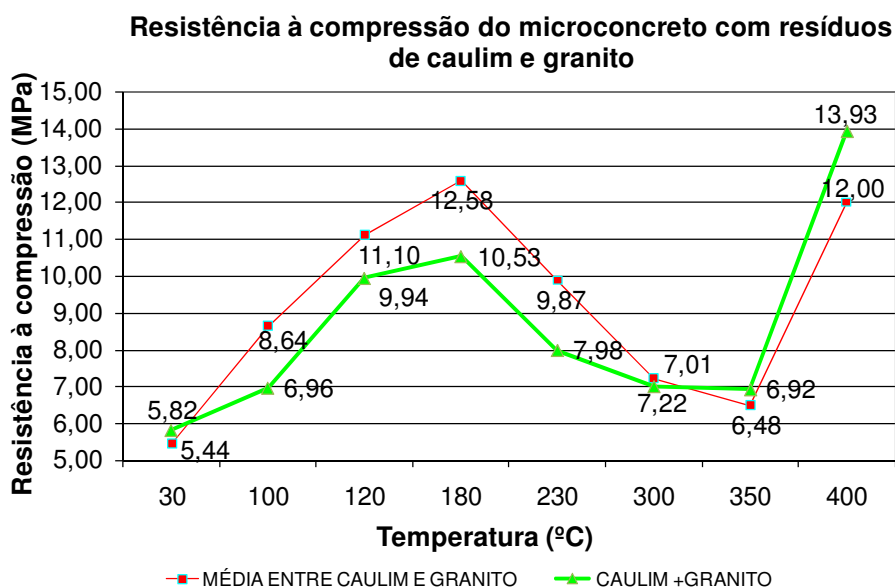
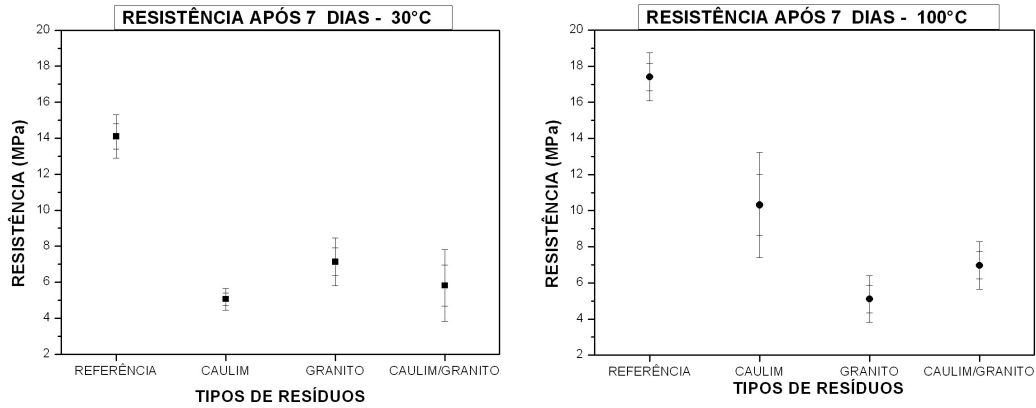


Figura 28. Resistência à compressão do microconcreto com resíduo de caulim e de granito.

Analisando a Figura 28, verificou-se que os comportamentos das duas curvas são semelhantes, ou seja, a média entre as resistências à compressão do microconcreto incorporados com resíduo de caulim e do microconcreto incorporados com resíduos de granito se aproximou aos valores encontrados para as resistências à compressão do microconcreto incorporados com 50% de cada resíduo.

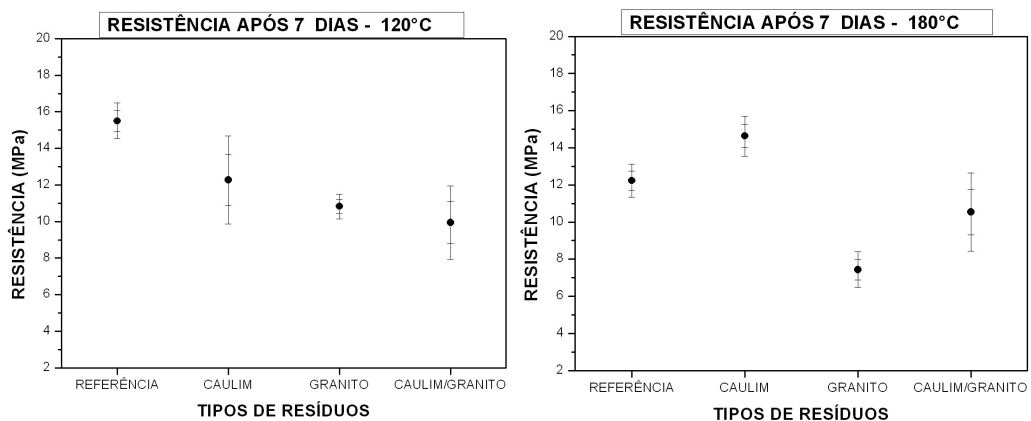
Ao avaliar o comportamento mecânico do microconcreto quando submetido às temperaturas de cura de 30°C, 100°C, 120°C, 180°C, 230°C, 300°C, 350°C e 400°C, pode-se concluir que em todos os microconcreto a resistência à compressão diminuiu da temperatura de 180°C para 230°C e voltou a aumentar, nas temperaturas acima de 230°C, exceto para os microconcreto aditivados com resíduos de caulim em que a resistência diminuiu a partir de 180°C e voltou a aumentar a partir de 350°C. Analisando conjuntamente os resultados verifica-se que as resistências à compressão do microconcreto incorporados com resíduos foram inferiores aos de referências. Esse comportamento pode ser justificado pelo fato que no microconcreto aditivado com resíduo de granito, que possui dentre os seus constituintes a sílica cristalina, houve maior representação de aumento da resistência à compressão, na temperatura de 120°C, pois, a transformação do C-S-H em tobermorita $[Ca_5(H_2Si_6O_{18}) \cdot 4H_2O]$ favoreceu este comportamento. Porém, segundo a literatura, com o aumento da temperatura, novas transformações ocorreriam a 150°C, com a conversão da tobermorita em xonotlita $[Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2]$ e gyrolita $[Ca_8(Si_4O_{10})_3(OH)_4 \sim 6H_2O]$, que são fases que apresentam permeabilidade e resistência à compressão semelhantes às da tobermorita, mas ocorreu o contrário, a partir de 120°C até 230°C a resistência à compressão diminuiu. Elevando-se a temperatura para 250°C, a gyrolita deveria ser convertida em truscotita $[Ca_7(Si_4O_{10})(Si_8O_{19})(OH)_4 \cdot H_2O]$, apresentando permeabilidade superior e resistência à compressão inferior em relação à tobermorita, sendo que com o aumento da temperatura a resistência no microconcreto aditivado com resíduo de granito aumentou até 300°C, voltando a diminuir a partir de 300°C.

Expressando os mesmos resultados em função de cada temperatura, seguem as figuras de 29 a 32b.

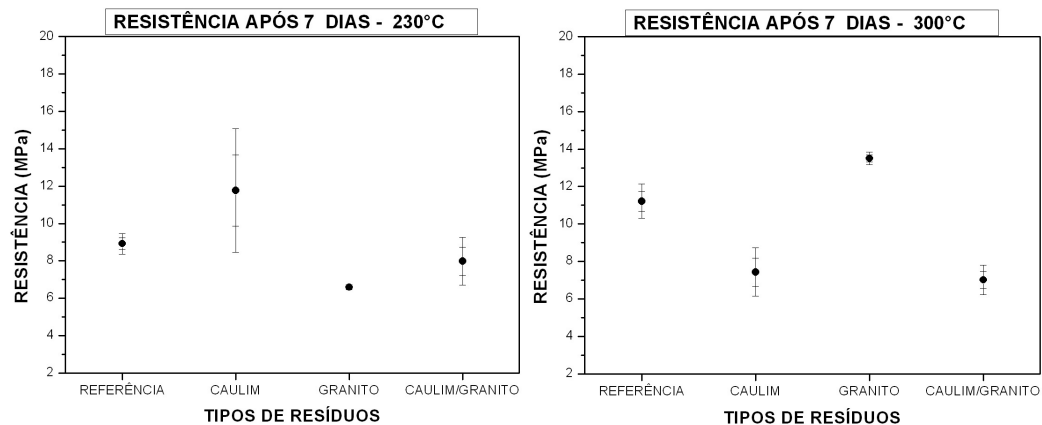


Figuras 29a e 29b. Resistência à compressão do microconcreto sem e com resíduo submetido a 30°C e 100°C.

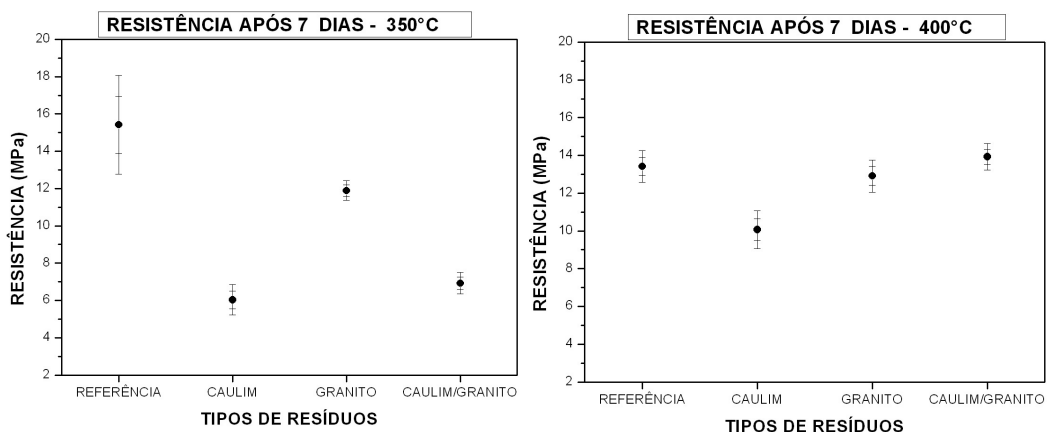
Verificou-se que a presença da mica identificada na DRX dos resíduos de caulim e granito (Figura 18) provavelmente foi a responsável pela baixa resistência mecânica do microconcreto quando submetido a 30°C. Isto pode ser confirmado na MEV, já que a morfologia em placas favorece deslizamentos de planos diminuindo a resistência mecânica.



Figuras 30a e 30b. Resistência à compressão do microconcreto sem e com resíduo submetido a 120°C e 180°C.



Figuras 31a e 31b. Resistência à compressão do microconcreto sem e com resíduo submetido a 230°C e 300°C.



Figuras 32a e 32b. Resistência à compressão do microconcreto sem e com resíduo submetido a 350°C e 400°C.

4.2.3 Caracterização do microconcreto

4.2.3.1 Análise de difração de raios X do microconcreto

Para a análise de DRX foi utilizada as seguintes fichas: Hidróxido de Silicato de Cálcio ($\text{Ca}_4\text{Si}_5\text{O}_{13.5}(\text{OH})_2$); Hidróxido de Silicato de Cálcio $\text{Ca}_7\text{Si}_{16}\text{O}_{38}(\text{OH})_2$; Hidróxido de Silicato de Cálcio $\text{Ca}_5(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_2$; Hidróxido de Silicato de Cálcio $\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_3\text{OH})(\text{OH})$; Dellaita,syn; Rosenhahnita; Reinhardbraunsita,syn; Nekoita; Okenita; Clinoptilolita; Stellerita;

Reinhardbraunsita ; Silicato de Cálcio Hidratado γ - $\text{Ca}_6(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_2$; Faujasita; Killalaita; Suolunita; Lima; Afwillita; Lima, syn; Albita; Scawtita; Wollastonita-2M; Reyerita; Truscottita; Quartzo,syn; Pectolita – 1A; Xonotlita; Kilchoanita, syn; Wollastonita 1A; Clinotobermorita; Jaffeita, syn; Sanidina, potássio, syn; Jaffeita; Rankinita; Hillebrandita; Portlandita,syn; Sulfato hidrogênio hidratado $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{H}_2\text{O})$; Foshagita, syn; Ettringita, syn; Kaolinita-1A; Hillebrandita; Gyrolita; Foshagita; Suolunita; Killalaita; Plombierita-1A; Silicato de Cálcio Hidratado $\text{CaH}_4\text{Si}_2\text{O}_7$; Jennita; Xonotlita, syn.

Analisando a DRX para todas as temperaturas, verifica-se que as fases formadas foram: quartzo (SiO_2), Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), calcita (CaCO_3) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Compostos constituintes do resíduo de caulim, como a caulinita e o quartzo, foram identificados através da DRX. Todas as amostras aditivadas com resíduo de caulim apresentaram os mesmos compostos, exceto as amostras submetidas a 180°C, 300°C e 400°C, que não foi comprovada a presença do componente (Na, K) $(\text{SiAl})\text{O}_8$.

A DRX apresentou para as amostras com incorporação de resíduo de granito a presença predominante da sílica em seus compostos, fato que comprova o bom comportamento do microconcreto aditivados com resíduos de granito para altas temperaturas. As possíveis reações pozolânicas cristalinas que possam ter ocorrido em temperaturas elevadas favoreceram a redução do fenômeno de regressão de resistência.

Para as amostras com incorporação de granito, pode-se observar que não ocorre a presença de calcita, mas houve a formação dos compostos silicato alumínio sódio potássio e albita.

Os compostos apresentados nos microconcreto incorporados com resíduos de granito e caulim foram os mesmos que se apresentaram nos microconcreto incorporados com resíduo de caulim e granito de forma independente, o que já era de se esperar.

Os picos representativos dos componentes constituintes nos microconcreto aditivados com resíduos de caulim e granito se repetem nas

diversas temperaturas. Apenas na temperatura de 400°C não foi possível verificar a presença de $(Na, K)(Si_3Al)O_8$ e $Na(SiAl)O_8$. A temperatura de 30°C foi a única em que não foi possível verificar o composto $CaSi_2$.

Fazendo a correlação com as resistências apresentadas na figura 22 e as morfologias apresentadas no MEV, identificou-se as fases do C-S-H apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Identificação das fases encontradas nas fichas da DRX.

IDENTIFICAÇÃO DAS FASES ENCONTRADAS NAS FICHAS DA DRX				
Temperatura (°C)	Referência	Caulim	Granito	Caulim + Granito
30	C-S-H Tipo I	NEKOITA	C-S-H não identificado	C-S-H não identificado
180	XONOTLITA	XONOTLITA	REYERITA	XONOTLITA
300	C-S-H não identificado	NEKOITA	XONOTLITA	Amostra perdida
350	STELLERITA	NEKOITA	SCAWTITA	C-S-H não identificado
400	REINHARDBRAUNSITE	NEKOITA	SCAWTITA	XONOTLITA

4.2.3.1.1 Microconcreto submetido a 30°C

Para que a reação pozolânica ocorra é necessária a presença do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) proveniente da hidratação do cimento Portland, que será consumido para formar fases hidratadas o C-S-H e aluminatos de cálcio. Verificou-se nas análises a presença do hidróxido de cálcio, assim como a presença do C-S-H, o que possivelmente comprova a ocorrência desta reação pozolânica para a temperatura de 30°C em todas as condições de ensaio.

Na Figura 33 está apresentado o difratograma do microconcreto submetido a temperatura de 30°C. Através dos resultados obtidos pela DRX, conclui-se que foram formadas fases típicas da hidratação do cimento Portland para os microconcreto sem a incorporação de resíduos. As fases identificadas foram: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), quartzo (SiO_2) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Observa-se também a repetição dos picos referentes ao C-S-H, componente principal para um bom desempenho da resistência mecânica à compressão do microconcreto.

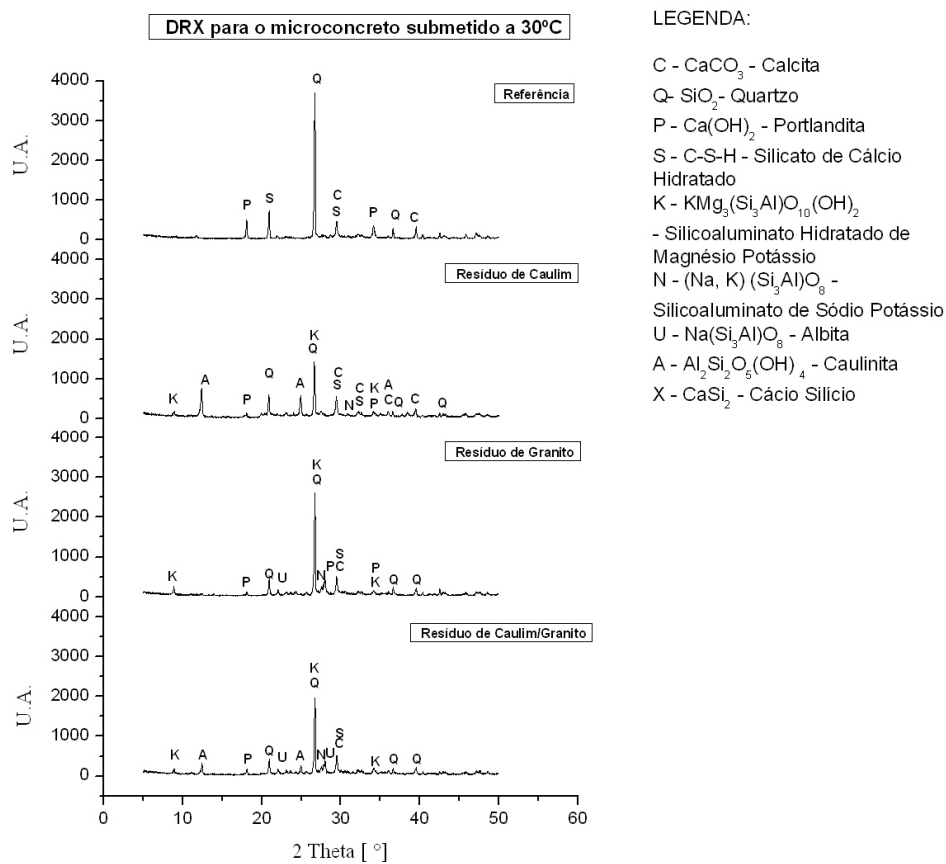


Figura 33. DRX para o microconcreto submetido a 30°C.

De acordo com as fichas citadas no item 4.2.3.1, foi encontrada no microconcreto aditivado com resíduo de caulim, quando submetido a 30°C, a fase denominada Nekoita, que pode ser responsável pela sua baixa resistência mecânica. É provável que o C-S-H identificado no microconcreto de referência a 30°C seja do tipo 1, favorecendo uma alta resistência mecânica.

4.2.3.1.2 Microconcreto submetido a 180°C

No microconcreto submetido à temperatura de 180°C houve a formação dos mesmos compostos apresentados a 30°C, como também silicatos de cálcio (CaSi_2) (Figura 34).

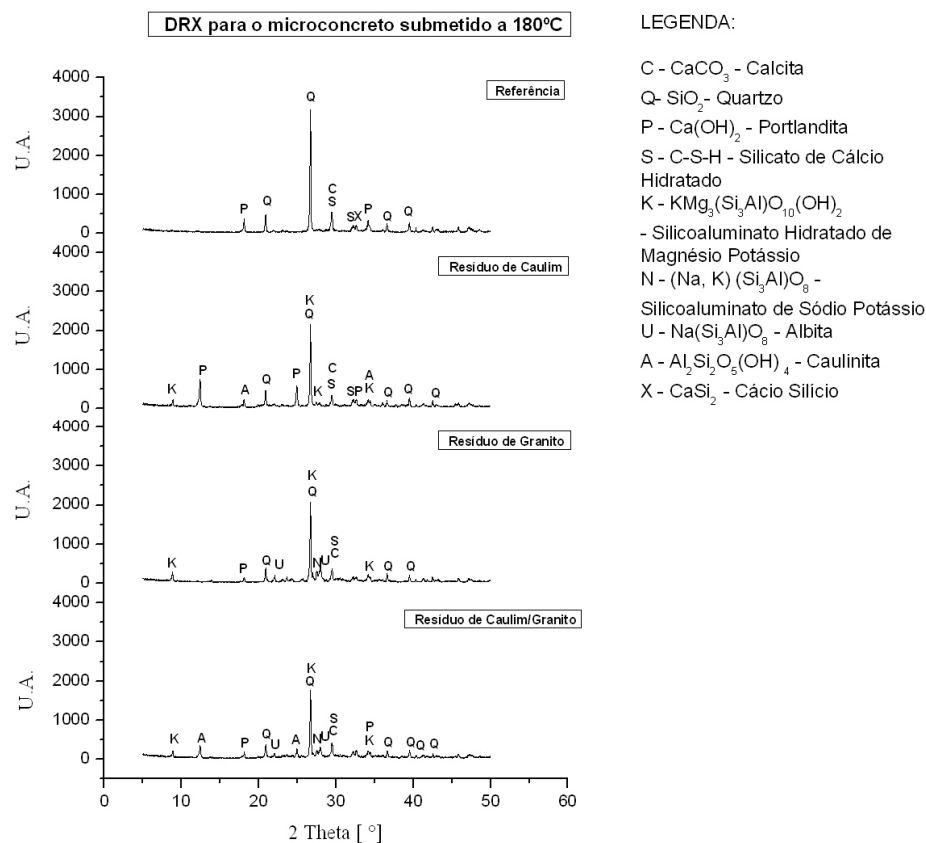


Figura 34. DRX para o microconcreto submetido a 180°C.

De acordo com as fichas o C-S-H identificado no microconcreto aditivado com resíduo de granito a 180°C se refere provavelmente a fase Reyerita, subtende que esta fase resulta em baixa resistência mecânica, conforme o gráfico de resistência. A explicação é que a fase Reyerita, por possuir potássio e sódio em sua composição química, pode desencadear a reação álcali-sílica quando em contato com alguma sílica cristalina deformada. Para as demais condições a fase encontrada para identificar o C-S-H foi a xonotlita, apresentando uma maior resistência mecânica, principalmente o microconcreto incorporado com resíduo de caulim (Figura 22).

4.2.3.1.3 Microconcreto submetido a 300°C

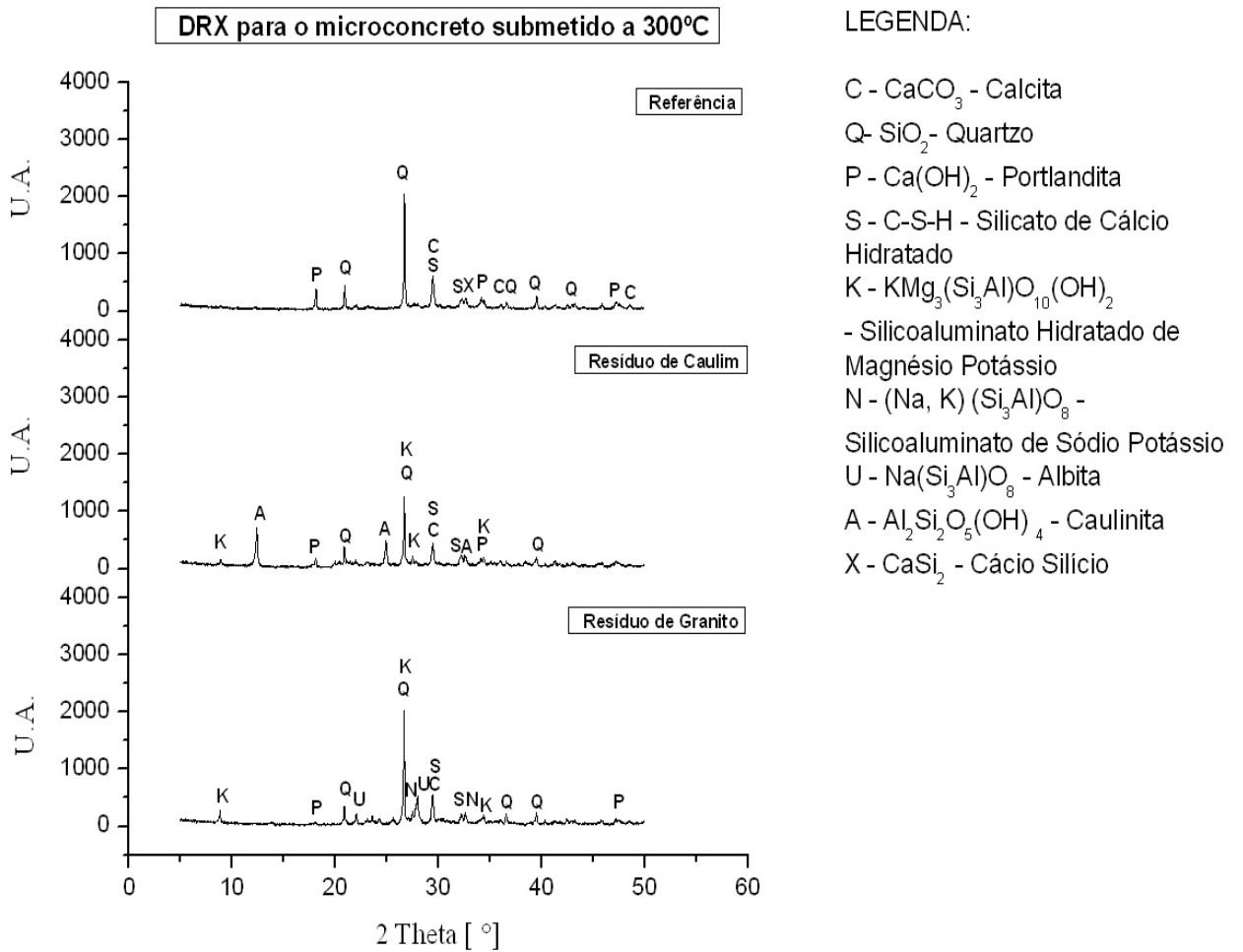


Figura 35. DRX para o microconcreto submetido a 300°C.

4.2.2.1.4 Microconcreto submetido a 350°C

Conforme a Tabela 13, a fase scawtita apresentada como sendo o C-S-H para o microconcreto incorporado com resíduo de granito a 350°C possa ser a responsável pela resistência mecânica, aparecendo como a terceira maior resistência (11,9 MPa) para este microconcreto.

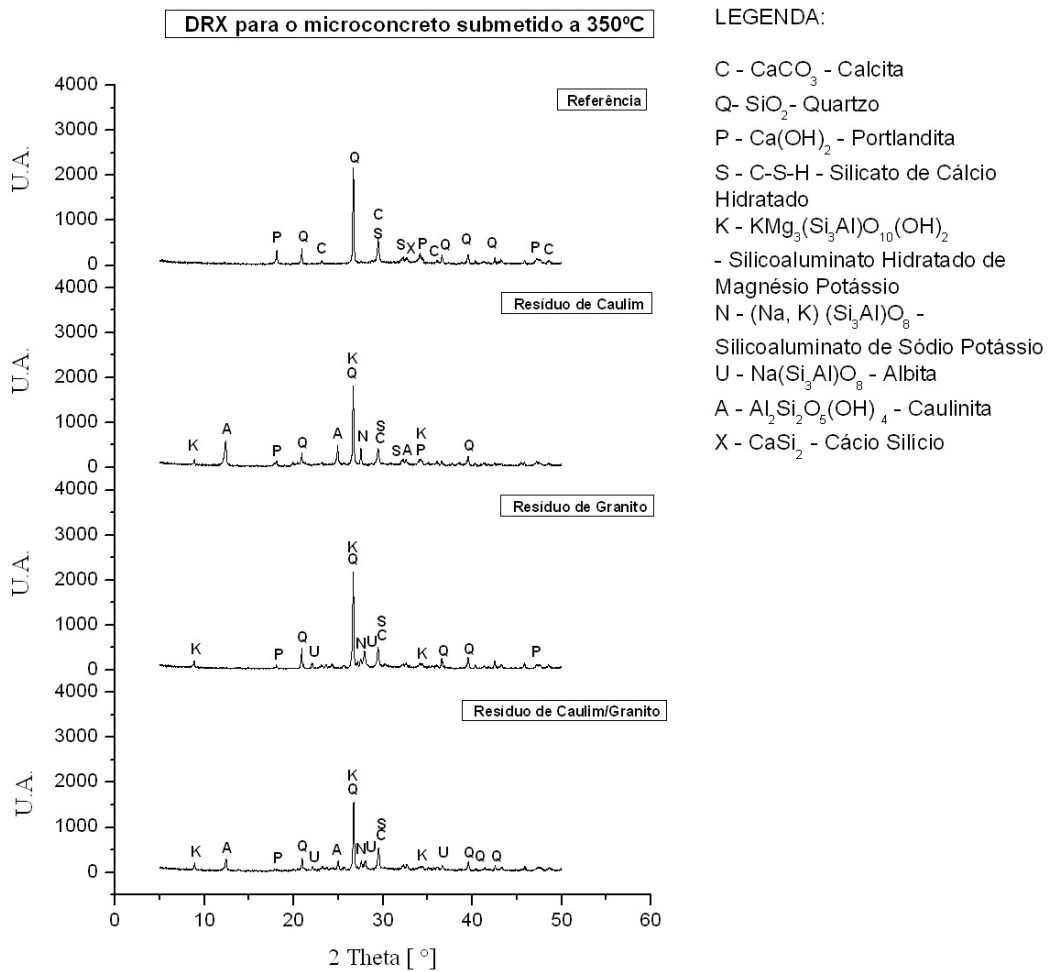


Figura 36. DRX para o microconcreto submetido a 350°C.

4.2.3.1.5 Microconcreto submetido a 400°C

A DRX mostra a presença de quartzo em todos os microconcreto estudados, o que pode ser visto em aproximadamente 2θ igual a vinte e sete, onde se encontra o pico de maior intensidade. A maior intensidade deste pico foi verificada no microconcreto de referência, com aproximadamente 3750 U.A. na temperatura de 30°C. Dentre os microconcreto aditivados com resíduos, o que apresentou maior intensidade (aproximadamente 2900 U.A.) foi o microconcreto aditivado com resíduo de granito na temperatura de 400°C.

Para o microconcreto de referência submetido a 400°C é possível ver que ocorreu uma diminuição da Portlandita, pois os picos representativos desta fase se apresentam com intensidade inferior às apresentadas nas temperaturas de 30°, 180°C, 300°C e 350°C.

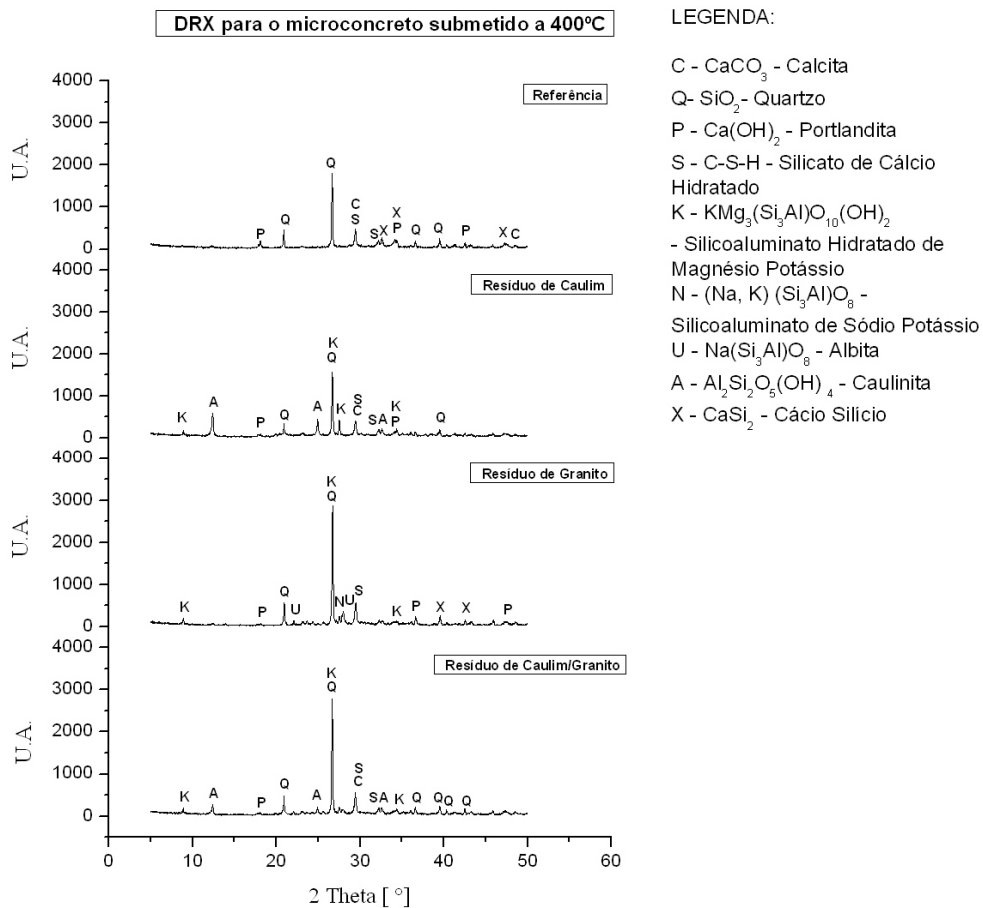


Figura 37. DRX para o microconcreto submetido a 400°C.

O Silicato de Cálcio Hidratado apresentado na DRX do microconcreto aditivado com resíduo de caulim e granito na temperatura de 400°C provavelmente é a fase xonotlita, em detrimento das demais fases encontradas.

4.2.3.1.6 Microconcreto em todas as condições

Expressando os mesmos resultados em função de cada condição (referência, caulim, granito, caulim e granito) seguem as figuras de 38 a 41. É

possível verificar o pico predominante (2θ próximo a $26,639^\circ$) referente ao quartzo e silicoaluminato hidratado de magnésio e potássio.

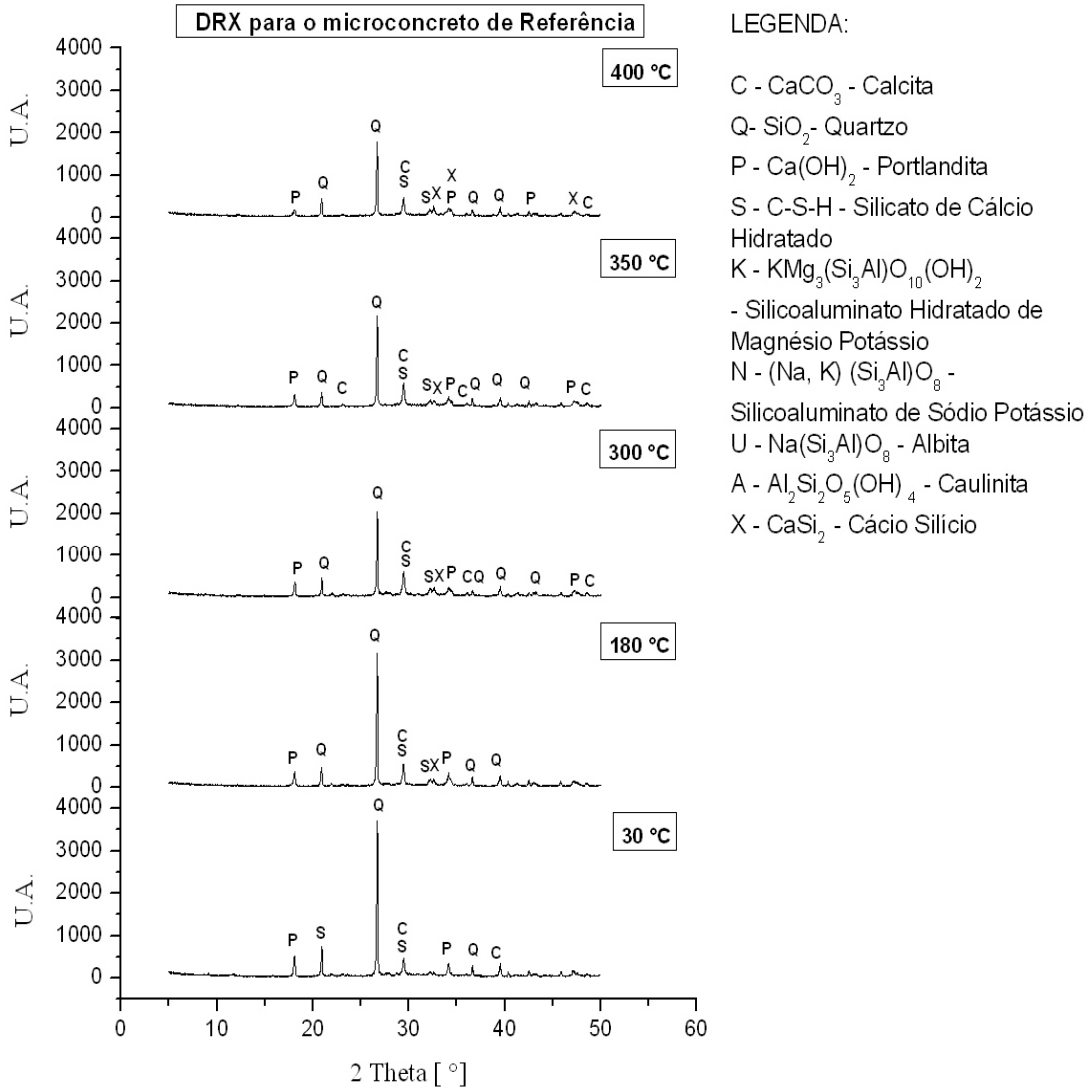


Figura 38. DRX para o microconcreto de referência.

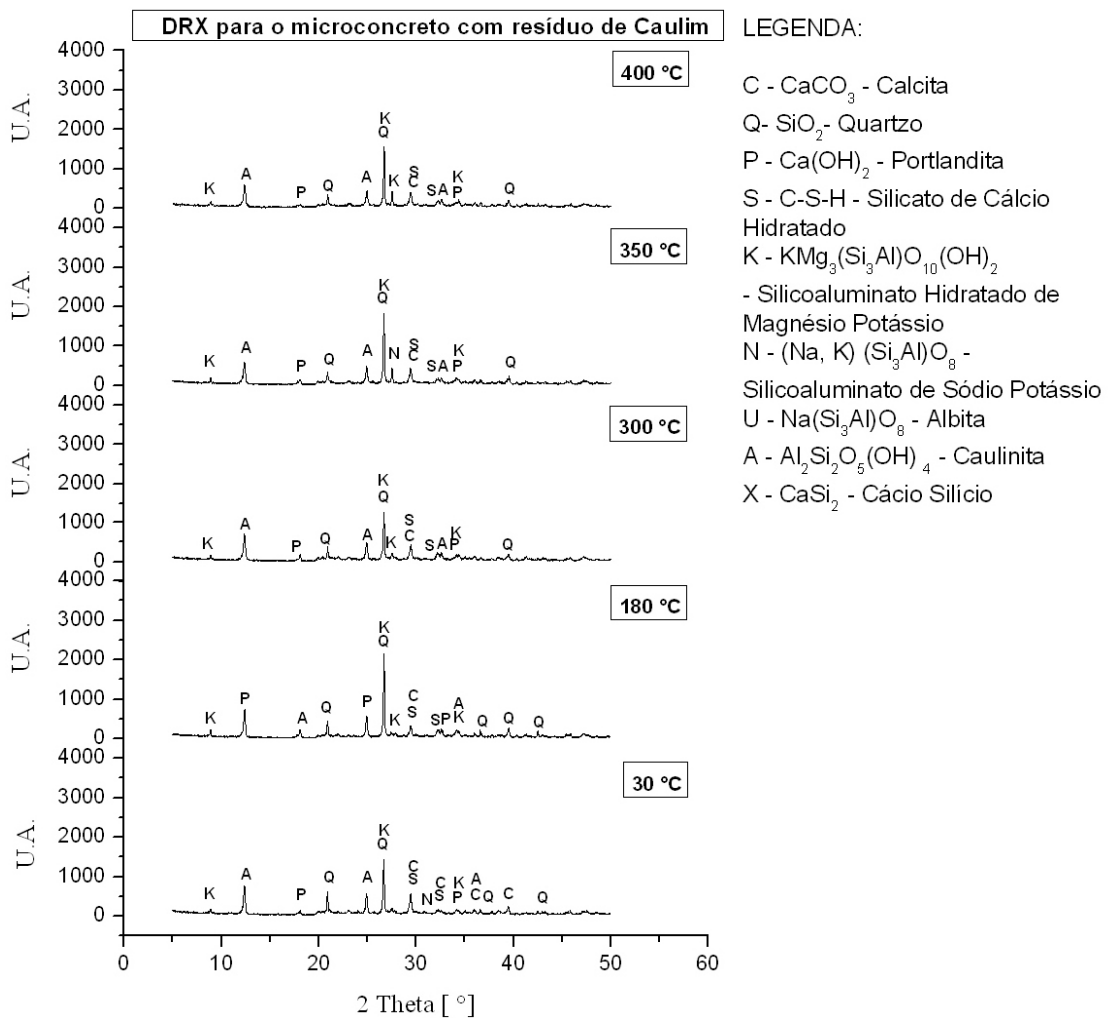


Figura 39. DRX para o microconcreto de caulim.

A diminuição da resistência mecânica para o microconcreto aditivado com resíduo de caulim em temperaturas acima de 230°C e abaixo de 180°C pode ser justificado pela identificação do C-S-H na fase denominada nekoita.

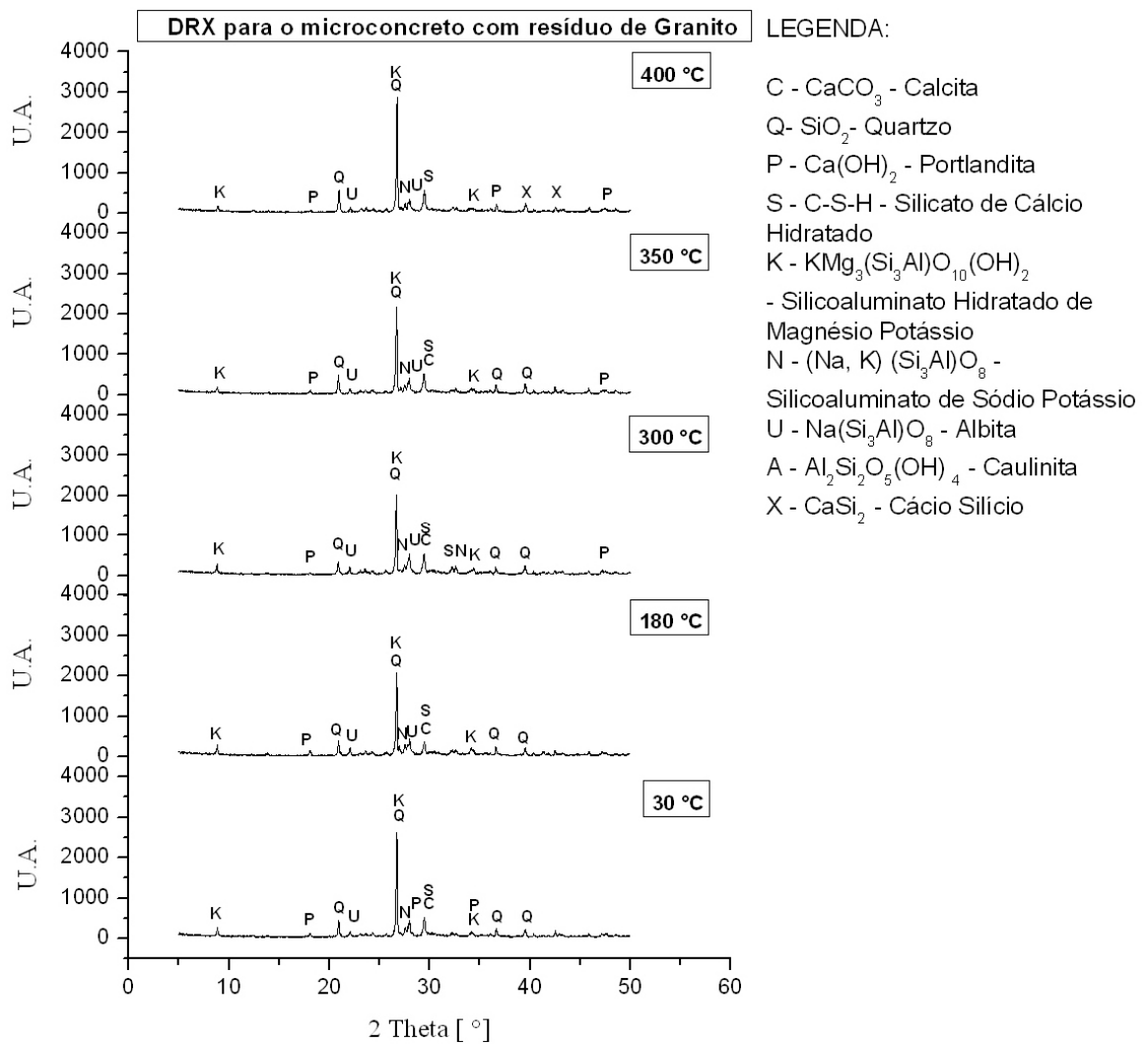


Figura 40. DRX para o microconcreto de granito.

O aumento da resistência mecânica para o microconcreto aditivado com resíduo de granito em temperaturas acima de 230°C pode ser justificado pela identificação do C-S-H nas fases denominadas xonotlita a 300°C e scawtita a 350°C e 400°C.

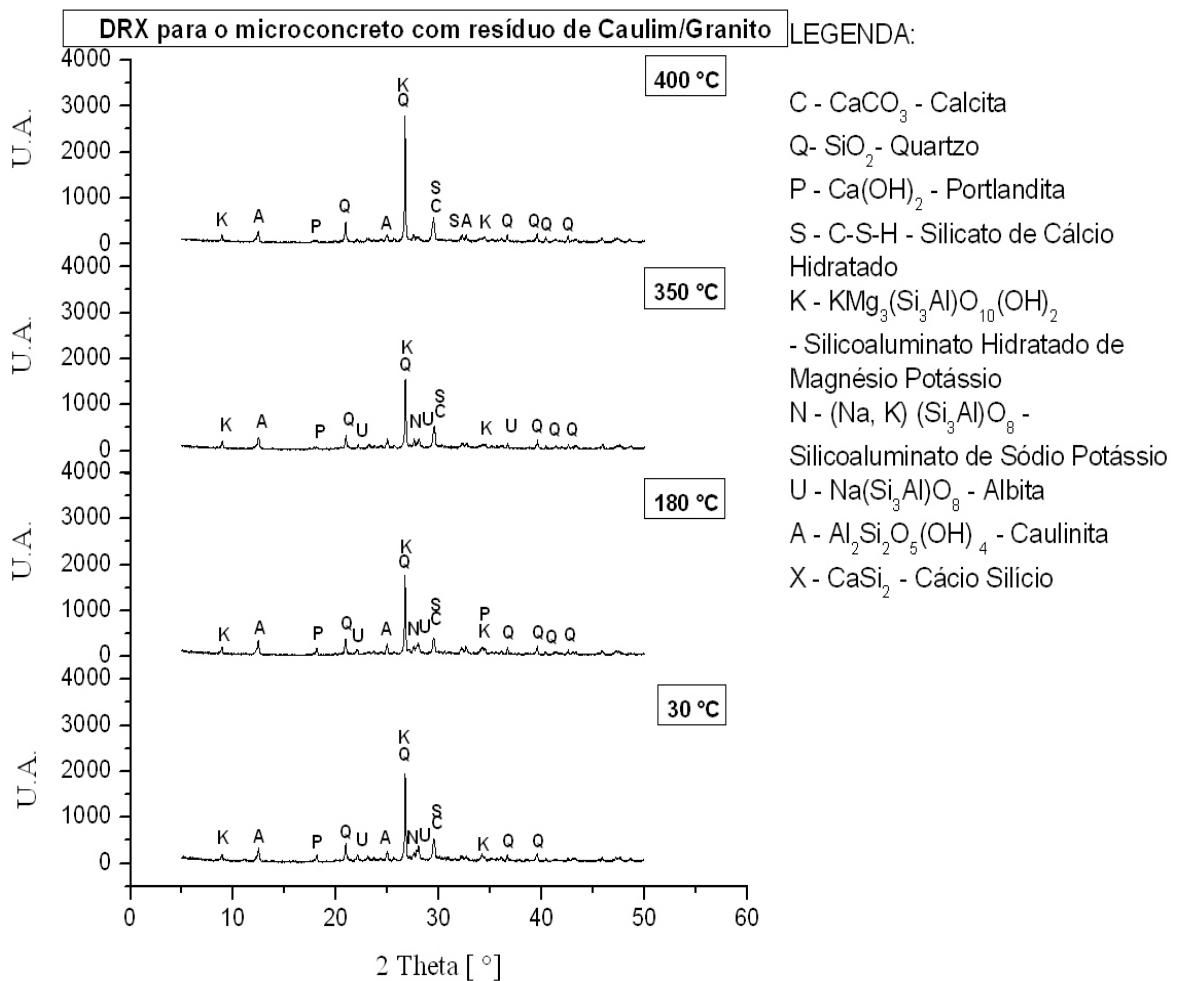


Figura 41. DRX para o microconcreto de caulim e granito.

4.2.4 Análise de microscopia eletrônica de varredura do microconcreto

Analisando a morfologia das amostras estudadas, identificou-se estruturas reticuladas nas micrografias, o que provavelmente possa ser a explicação da permanência de resistência mecânica mesmo após o aquecimento. É possível que os resíduos tenham sido os responsáveis pela formação e manutenção das estruturas reticuladas nas micrografias. Estes resíduos não são responsáveis pela resistência mecânica do microconcreto para temperatura baixa, pois estes materiais não interagem nesta temperatura com as fases do cimento Portland em hidratação nem com o endurecimento dos hidratos.

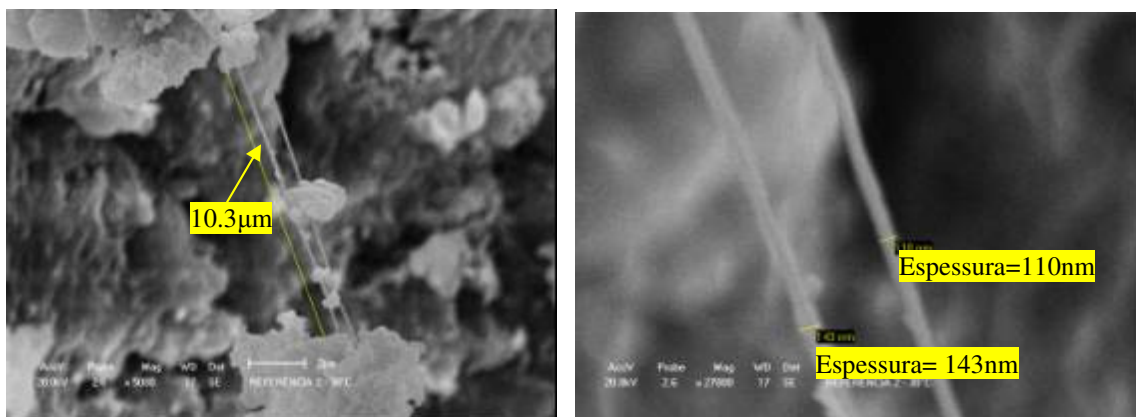
Não foi encontrada nas análises de MEV a microestrutura referente à etringita, talvez pelo motivo do tempo de cura do microconcreto. Possivelmente já não existiam os produtos hidratados do cimento que poderiam reagir com sulfatos para então formar a etringita.

Foram identificados sais como potássio e magnésio, mas em pequenas quantidades, provavelmente oriundos da fabricação do cimento Portland. Nas figuras em que estão apresentadas as análises químicas realizadas através do EDS apresentam um pico sem identificação do elemento químico, em aproximadamente 2,2 Kev, que se refere ao elemento químico ouro utilizado como recobrimento metálico da amostra.

4.2.4.1 Microconcreto de referência

Verificou-se que o microconcreto de referência não manteve a estrutura reticulada, o que pode ter causado perda de resistência mecânica, pois as fases residentes sofreram maior cristalização devido ao aquecimento e surgindo assim poros e canais entre as fases (hidratos).

Nas Figuras 42a e 42b, é possível verificar microestruturas em forma de “fios” com espessura entre 110nm a 143nm e comprimento de aproximadamente 51,5 μm ao longo da amostra (cinco vezes a dimensão apresentada na Figura 42b). Não foi possível fazer a análise química pontual através do EDS, devido à pequena área para análise, desta forma não se pode definir o que estes “fios” possam representar.



Figuras 42a 42b. MEV do microconcreto de referência a 30°C. (2 μm) e 500nm).

Na figura 43b é provável que a morfologia represente ao C-S-H tipo 1, também verificada nas fichas da DRX.

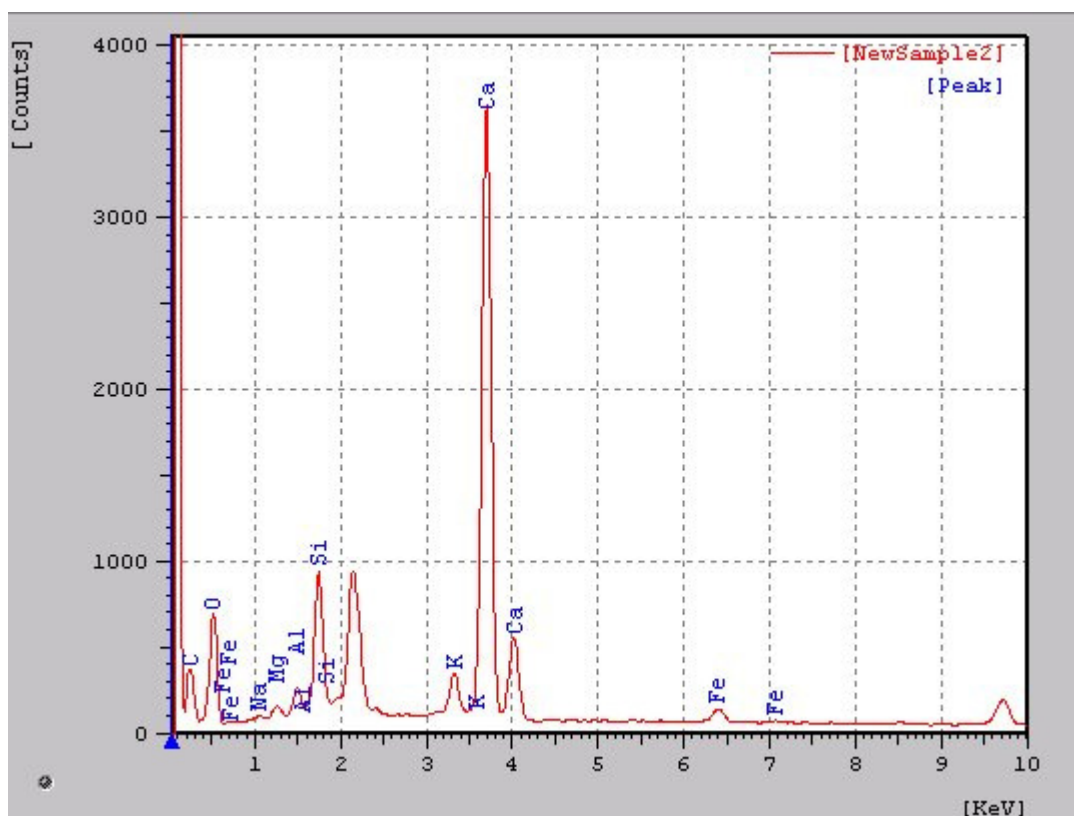
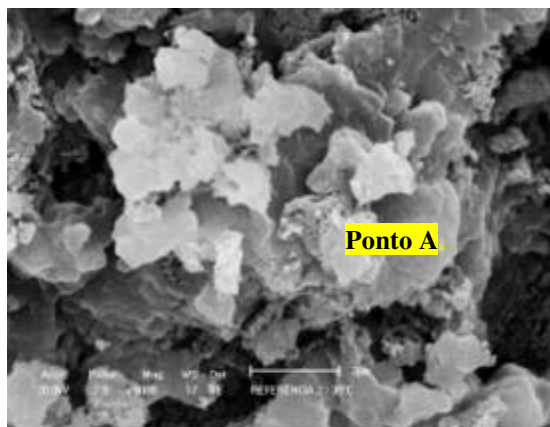


Figura 43a e 43b. MEV e Análise química no ponto A do microconcreto de referência a 30°C (2µm).

A MEV apresentada para o microconcreto de referência a 180°C mostra uma morfologia que possivelmente confirma o resultado apresentado pela DRX, ou seja, C-S-H tipo xonotlita. (Figura 44a).

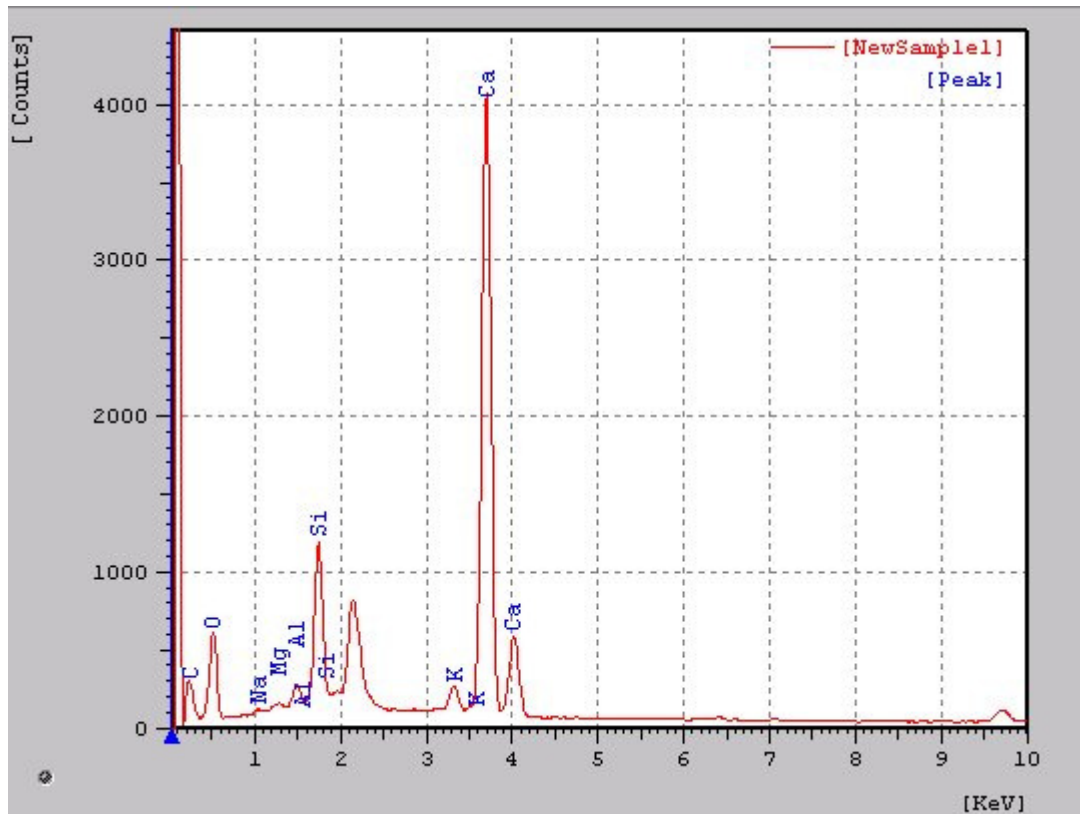
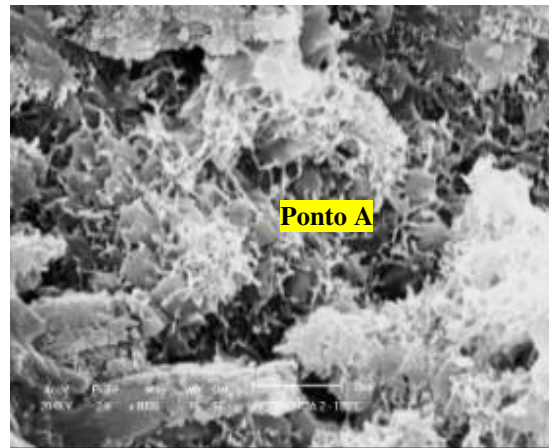


Figura 44a e 44b. MEV e Análise química no ponto A do Microconcreto de referência a 180°C. (2 μ m)

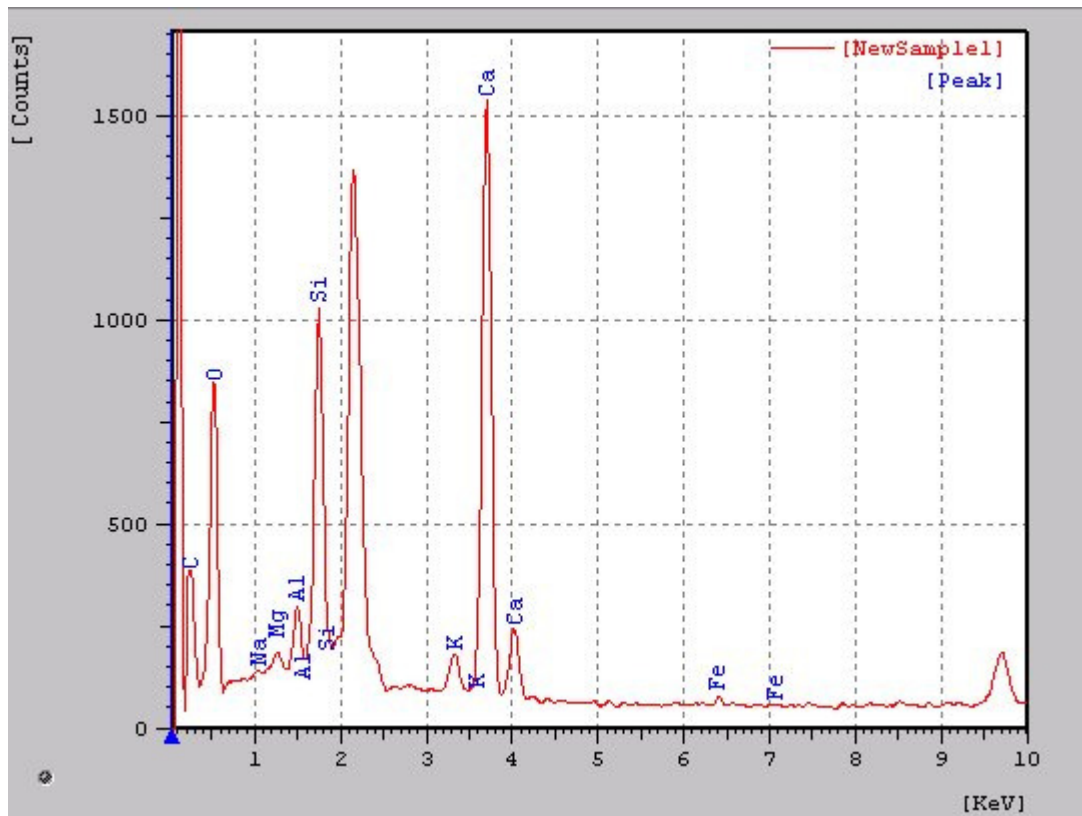
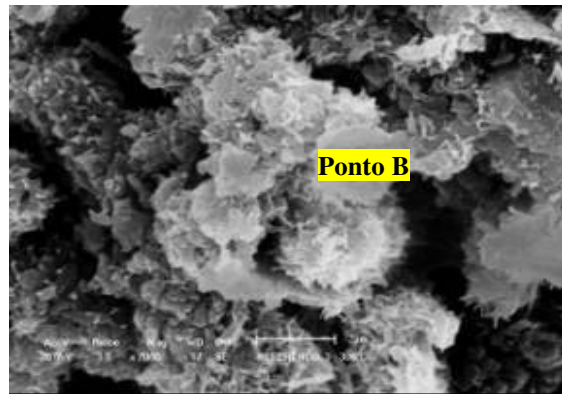


Figura 45a e 45b. MEV e Análise química no ponto B do microconcreto de referência a 300°C. (2µm)

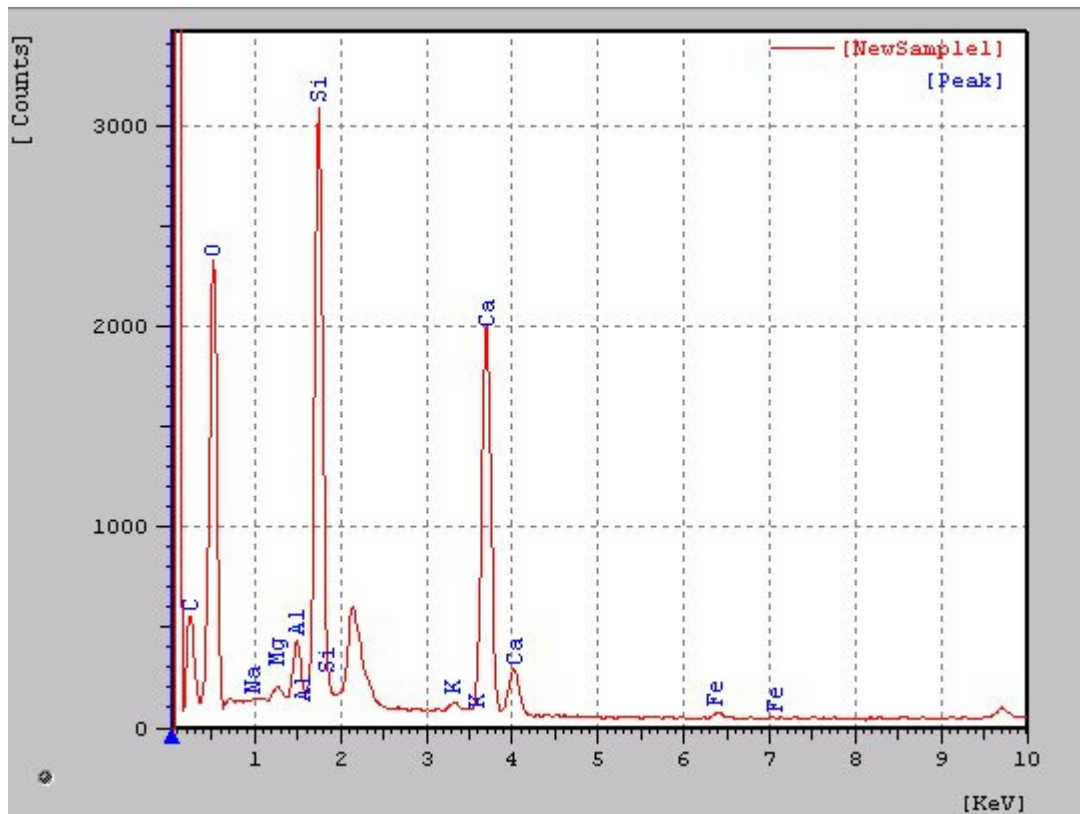
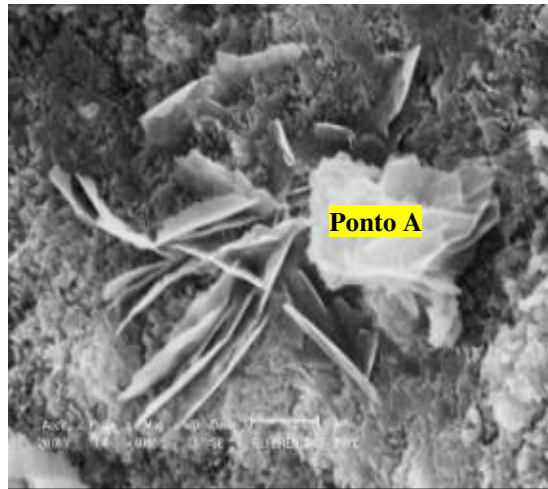


Figura 46a e 46b. MEV e Análise química no ponto A do Microconcreto de referência a 350°C. (2µm)

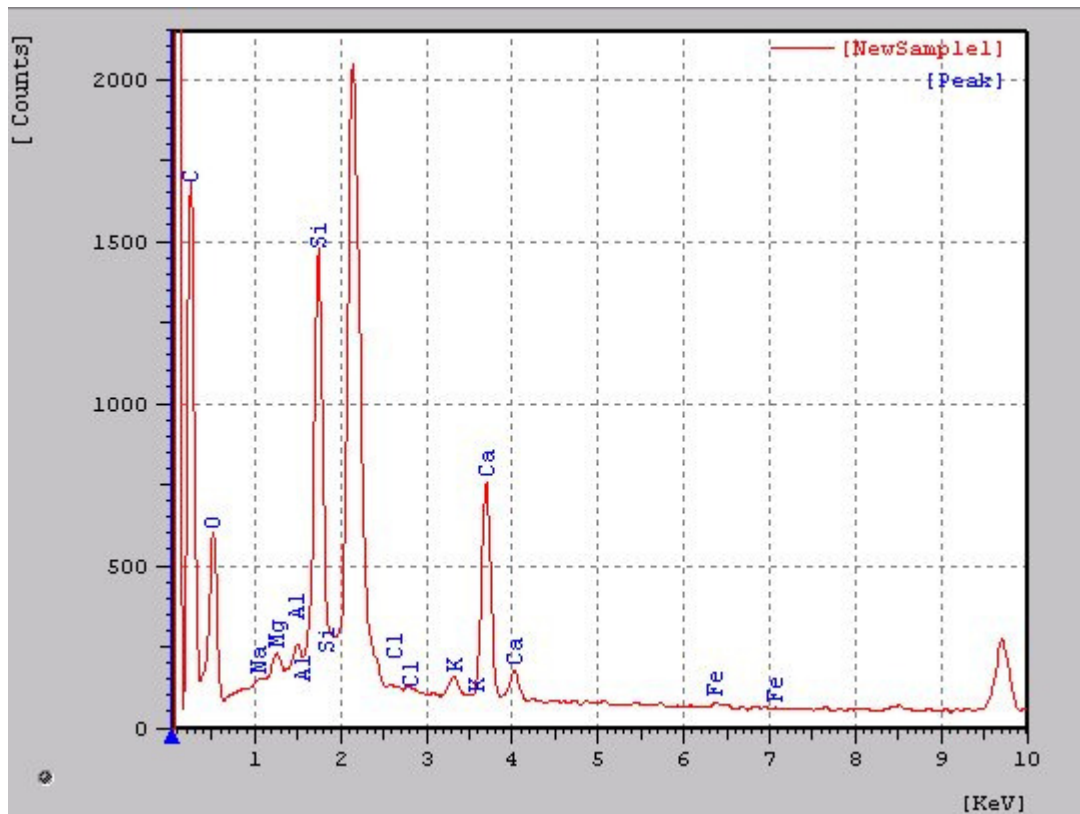
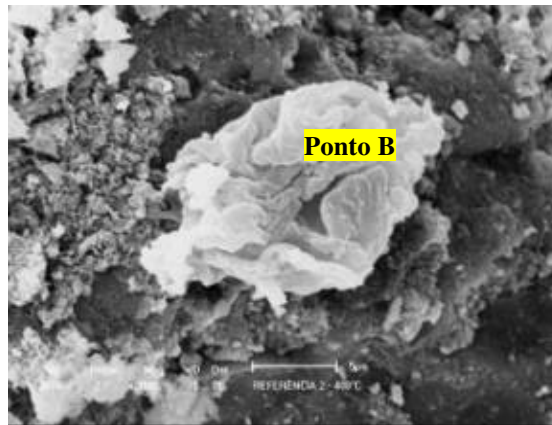


Figura 47a e 47b.MEV e Análise química no ponto B do microconcreto de referência a 400°C. (5μm)

A morfologia apresentada pela MEV para as temperaturas de 300°C, 350°C e 400°C mostra a formação de uma estrutura mais coesa pode justificar o aumento da resistência a partir de 300°C (Figuras 45,46 e 47a).

4.2.4.2 Microconcreto com resíduo de caulim

A morfologia apresentada na MEV da Figura 48a confirma a presença de mica identificada na DRX do resíduo de caulim, o que provavelmente ocasionou a redução da resistência mecânica para o microconcreto incorporado com resíduo de caulim quando submetido a 30°C.

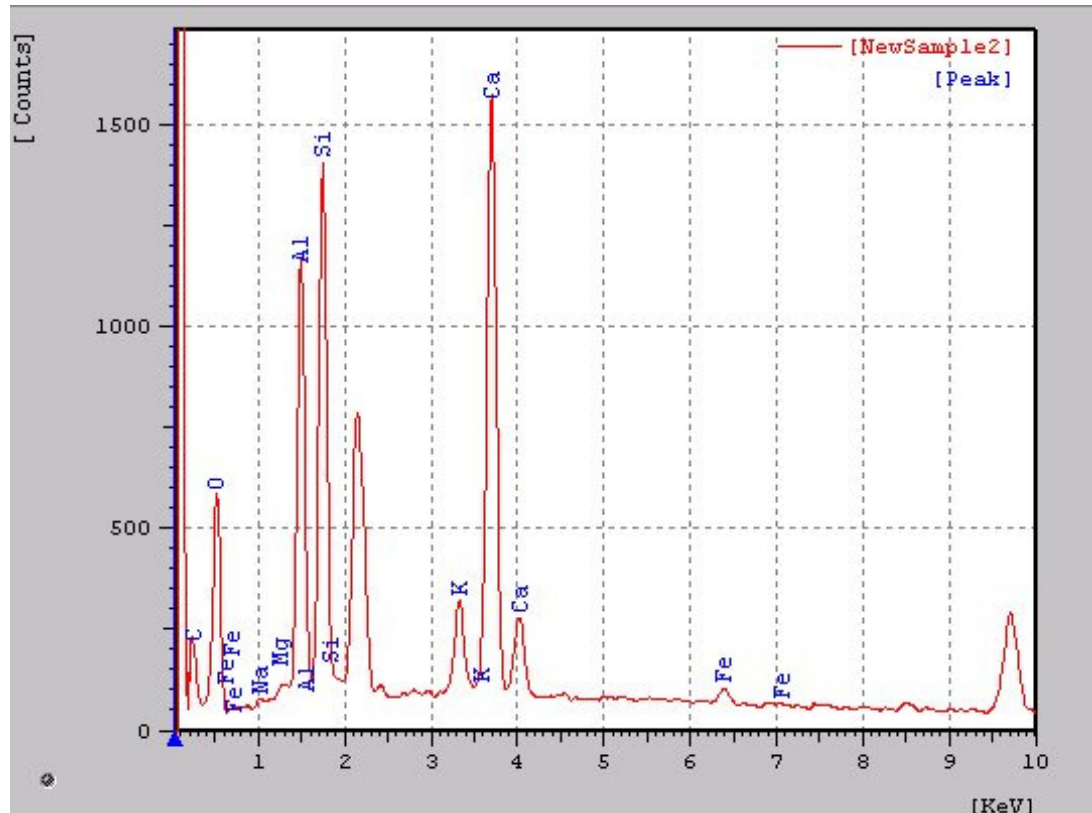


Figura 48a e 48b. MEV e Análise química no ponto A do microconcreto com resíduo de caulim a 30°C (5µm).

A MEV apresentada na figura 49 mostra uma morfologia que possivelmente confirma o resultado apresentado pela DRX, ou seja, C-S-H tipo xonotlita. É possível verificar (área selecionada na figura) estruturas que apesar de se apresentarem em planos/placas estão presas ao reticulado, fazendo com que não ocorra o deslizamento e a resistência aumente, confirmando que para 180°C o melhor resultado (14,6MPa) é a incorporação do resíduo de caulim. (Figura 49).

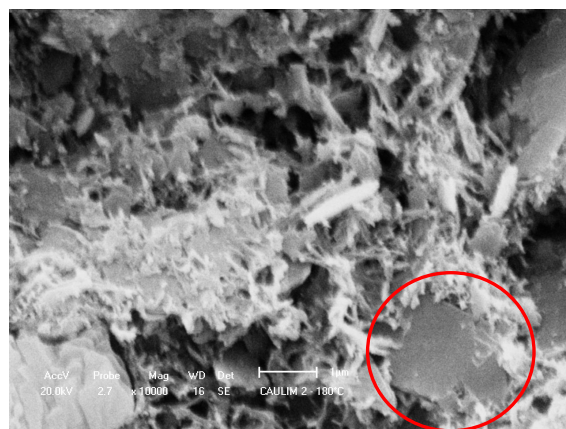


Figura 49. MEV do Microconcreto com resíduo de caulim a 180°C. (1µm)

4.2.4.3 Microconcreto com resíduo de granito

A morfologia apresentada na figura 50a pode justificar a baixa resistência mecânica apresentada a 180°C no microconcreto aditivado com resíduo de granito, uma vez que está bem definida a formação de placas resultando num material pouco coeso.

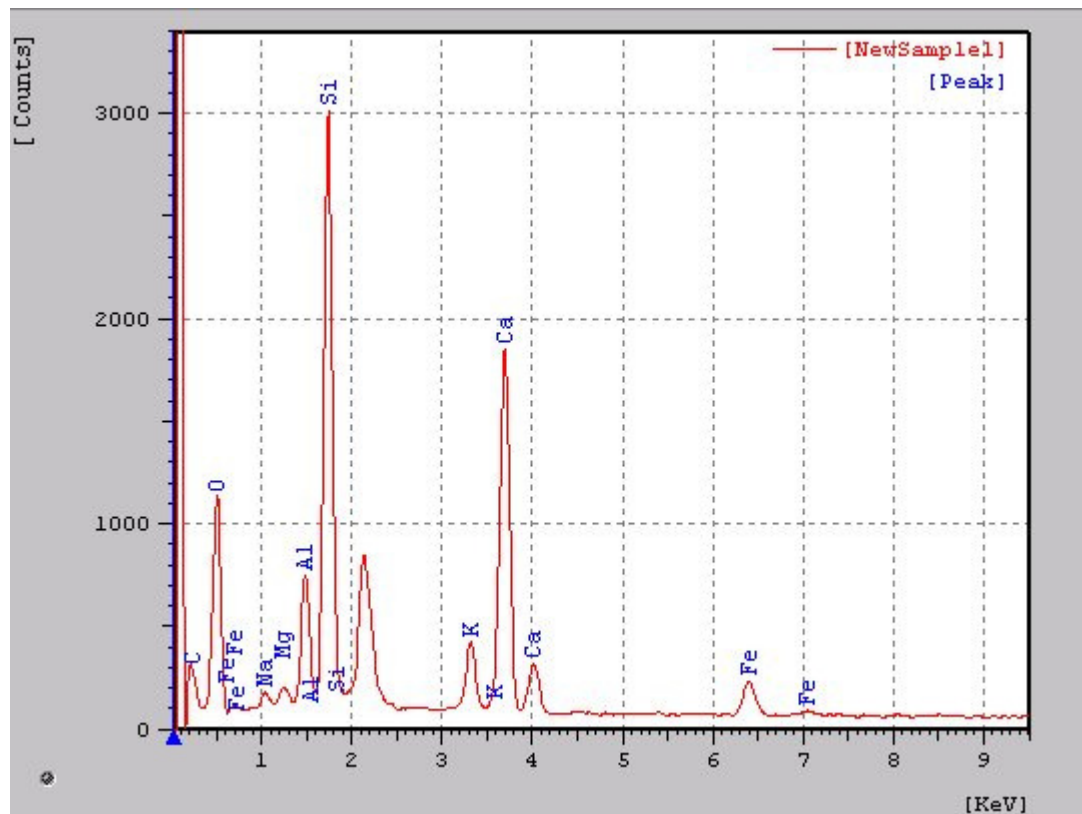
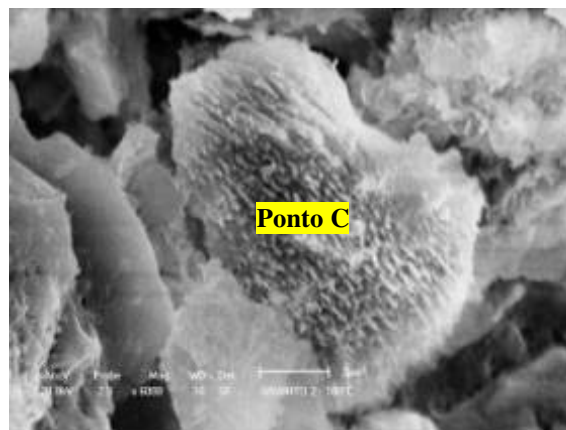


Figura 50a e 50b. MEV e Análise química no ponto C do Microconcreto com resíduo de granito a 180°C. (2µm).

Verifica-se na Figura 51a a formação do reticulado confirmando que para temperaturas acima de 300°C é aconselhável a incorporação do resíduo de granito, uma vez que a resistência mecânica aumentou a partir desta temperatura.

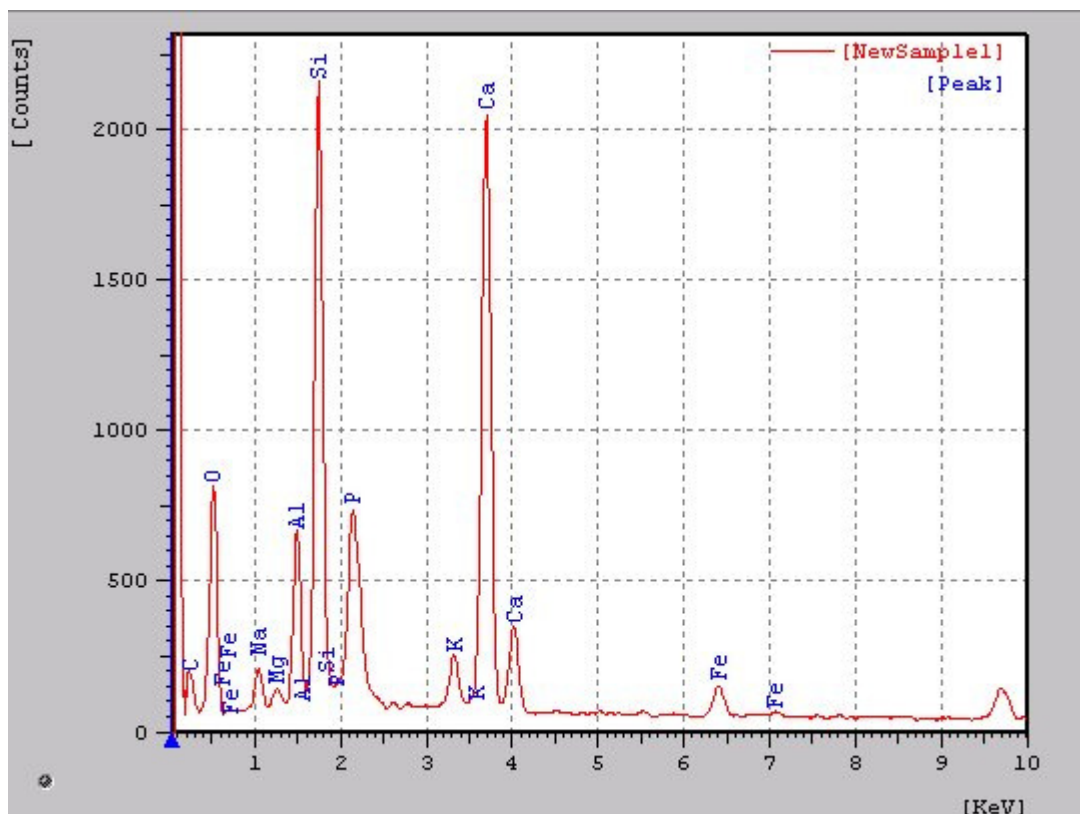
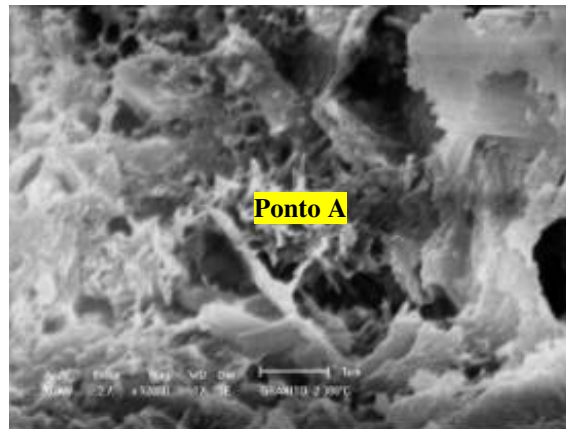


Figura 51a e 51b. MEV e Análise química no ponto A do microconcreto com resíduo de granito a 300°C. (1µm).

Na figura 52a ainda encontra-se resquícios da estrutura reticulada do C-S-H denominada scawtita, por este motivo que a resistência mecânica não caiu tanto mantendo como a segunda maior do microconcreto aditivado com resíduo de granito (12,9 MPa).

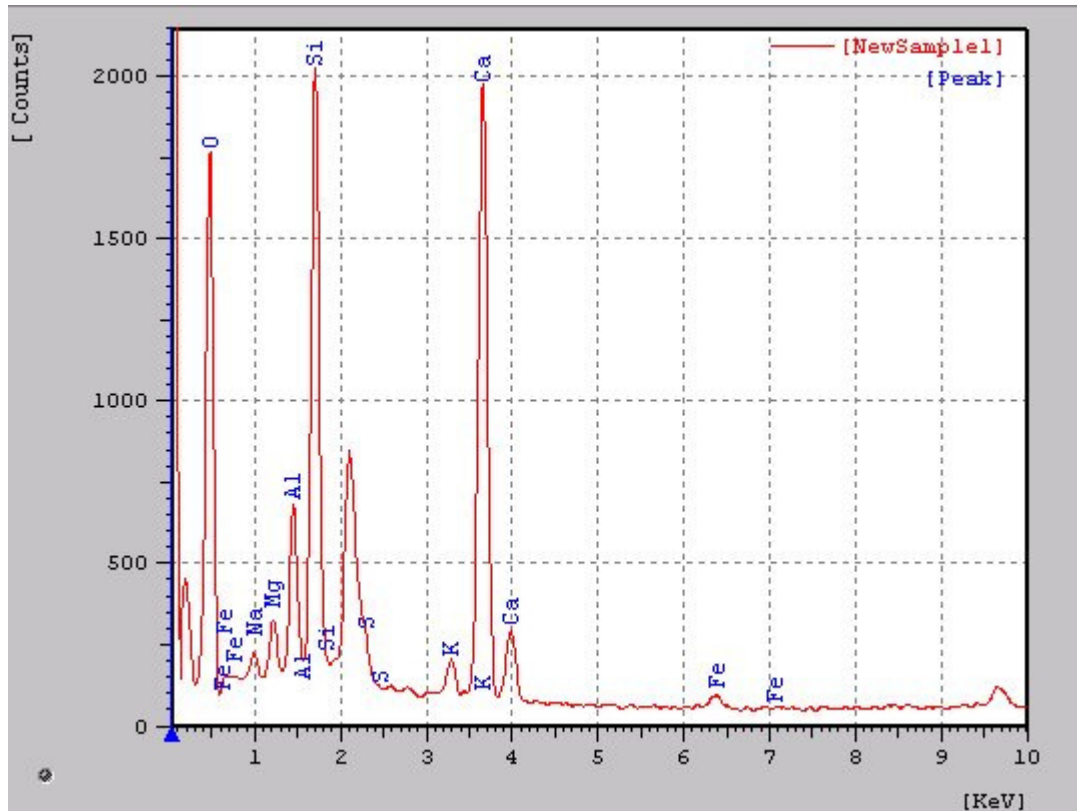
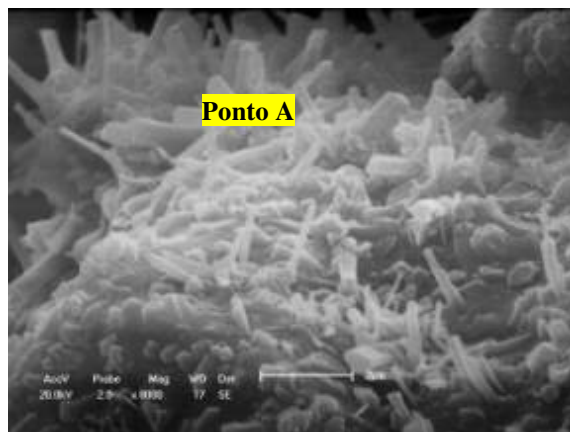


Figura 52a e 52b. MEV e Análise química no ponto A do microconcreto com resíduo de granito a 400°C (2µm).

4.2.4.4 Microconcreto com resíduo de caulim e granito

A morfologia apresentada na Figura 53a pode justificar a formação de estruturas reticuladas que venham favorecer a resistência mecânica. Possivelmente estas estruturas sejam as responsáveis pela segunda maior resistência (10,5 MPa) para o microconcreto incorporado com resíduo de caulim e granito.

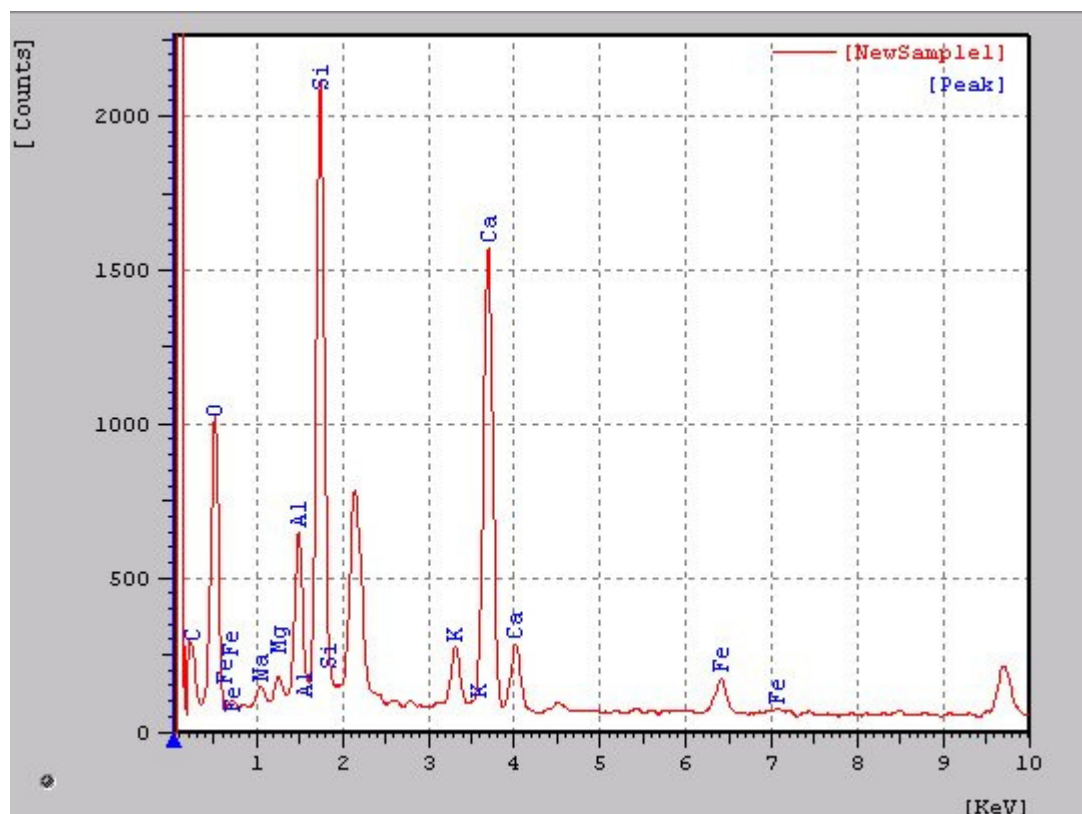


Figura 53a e 53b. MEV e Análise química no ponto A do microconcreto com resíduos de caulim e de granito a 180°C (1µm).

A micrografia do microconcreto aditivado com resíduos de caulim e granito quando submetido à 400°C (Figura 54a), ainda apresentou microestrutura reticulada que surgiu em temperaturas mais baixas e permaneceu em altas temperaturas. Provavelmente a morfologia reticulada seja o esclarecimento para que a resistência mecânica deste microconcreto em 400°C tenha sido a maior (13,93 MPa).

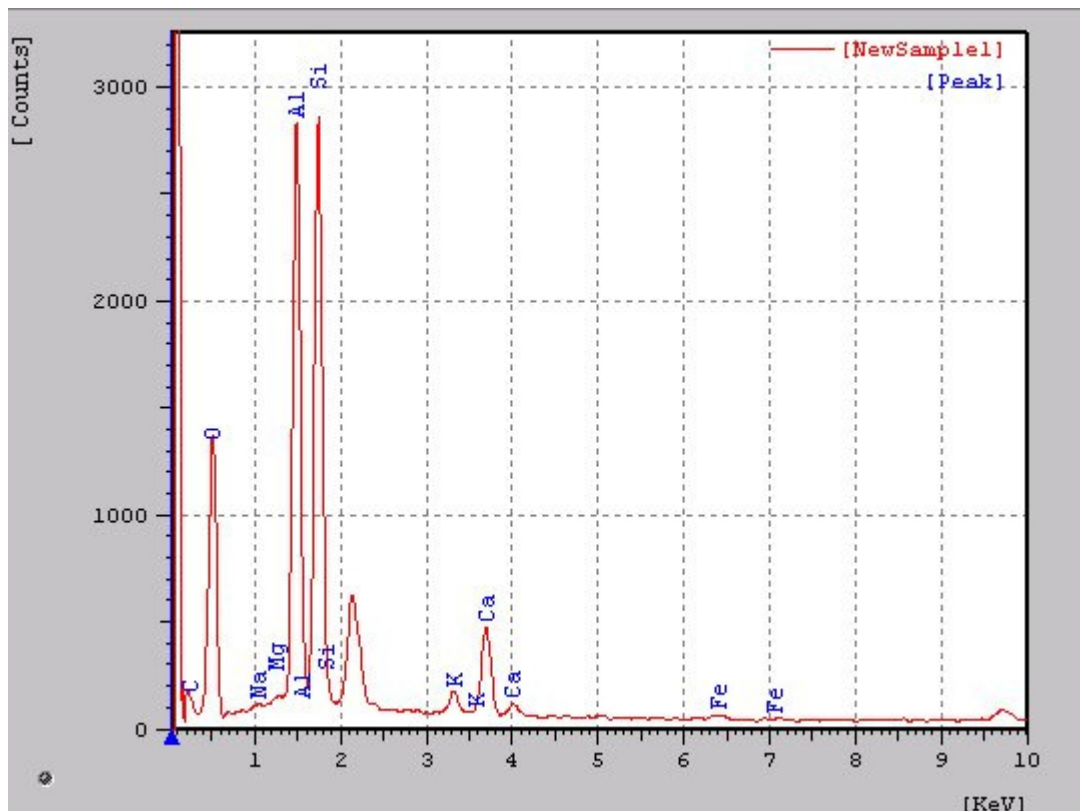
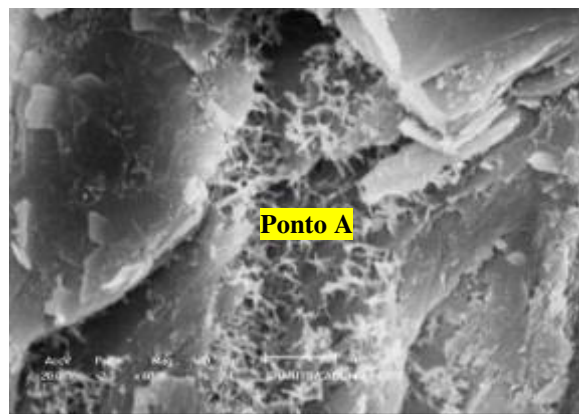


Figura 54a e 54b. MEV e Análise química no ponto A do microconcreto com resíduos de granito e de caulim a 400°C (2µm).

5.0 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados e com os objetivos específicos supracitados, seguem as conclusões para o presente trabalho:

- os resíduos estudados apresentaram as seguintes fases mineralógicas: resíduo de caulim: caulinita, quartzo e mica; resíduo de granito: mica, quartzo, feldspato e carbonato de cálcio;
- os resíduos de caulim e granito apresentaram teores elevados de alumina e sílica respectivamente;
- o resíduo de granito apresentou diâmetro médio de partículas inferior ao resíduo de caulim;
- a perda de massa em torno de 10% em temperatura acima de 230° é possível que não venha influenciar a resistência mecânica do microconcreto aditivado com resíduo de granito;
- em todas as condições a resistência à compressão simples diminuiu da temperatura de 180°C para 230°C e voltou a aumentar nas temperaturas acima de 230°C, exceto para o microconcreto aditivado com resíduos de caulim em que a resistência diminuiu a partir de 180°C e voltou a aumentar a partir de 350°C;
- a adição de resíduo de caulim e granito dependerá em que temperatura será empregado o microconcreto. Para 180°C e 230°C é viável utilizar o resíduo de caulim e acima de 230°C e especificamente a 300°C utilizar o resíduo de granito. Para temperaturas abaixo de 120°C não é aconselhável utilizar resíduos de caulim e granito.
- a incorporação de resíduo de caulim (oriundo do beneficiamento de caulim) e granito (oriundo da serragem do granito) em substituição parcial da areia empregada no traço de um microconcreto convencional, quando este foi submetido a temperaturas elevadas contribuiu para reduzir o fenômeno de

regressão de resistência, porque o cimento Portland em si não retrata características típicas de anti-regressão;

- os difratogramas mostraram o pico mais representativo para a fase quartzo. Foram formadas fases típicas da hidratação do cimento Portland como silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), quartzo (SiO_2) e carbonato de cálcio (CaCO_3). Não foi verificada a presença de etringita ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$), hidrogranada (C_3AH_6). As fases encontradas para o C-S-H foram: C-S-H tipo I, xonotlita, stellerita, nekoita, reinhardbraunsita, scawtita;
- a MEV dos resíduos de caulim e granito foram verificadas partículas lamelares hexagonal da caulinita na ordem de $2\mu\text{m}$ e aglomerados de partículas superiores a $5\mu\text{m}$ provavelmente do quartzo ou da mica. Para o resíduo de granito observa-se elevado números de partículas anisométrica, com uma larga faixa de distribuição correspondente entre $2\mu\text{m}$ e $5\mu\text{m}$ provavelmente de quartzo e partículas superiores a $10\mu\text{m}$ provavelmente da granalha presente no resíduo;
- A incorporação de resíduos de caulim e de granito no microconcreto permite a eliminação destes resíduos do meio ambiente minimizando assim os impactos ambientais.

6.0 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- realizar os mesmos ensaios exploratórios utilizando o Cimento Portland comum CPI, já que nesta pesquisa foi utilizado o Cimento Portland Pozolânico – CPIV, que disputa com os resíduos de caulim e granito, ou seja, provavelmente em vez dos produtos de hidratação do Cimento Portland terem reagido com os demais componentes do traço eles reagiram com o próprio cimento;
- realizar os mesmos ensaios substituindo a peneira ABNT número 200 (0,074 mm) em que as amostras foram passadas pela peneira ABNT número 325 (0,044 mm), porque a diferença no 2θ apresentado na difração seria menor, bem como na intensidade relativa do pico;
- Realizar os mesmos ensaios variando os percentuais de resíduos de caulim e granito;
- Realizar os mesmos ensaios em condição de cura menos severa para o microconcreto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5736: Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-10004: Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

BAZANT, P. Z. *and* KAPLAN, Maurice F. **Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models**. 1 th ed. Essex: Longman Group, 1996.

BEZERRA, U. T. **Compósitos Portland-biopolímero para cimentação de poços de petróleo**. Tese de Doutorado. Natal: UFRN, 2006.

BRISTOW, C. M. **Kaolin paper underpins current demand**. Industrial Minerals, pp.62-67, July, 1987.

CALLISTER, W. D. Jr., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: FTC, 2002.p. 299.

CARVALHO, L. H. **Compósitos poliméricos**. Universidade Federal de Campina grande. Apostila, 2007.

CASTRO, W. A. M. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil**. Dissertação de Mestrado. Campina Grande: UFCG, 2008.

CAVALCANTI, R. N. **A areia de construção civil e o meio ambiente**. In: 30^o Encontro Nacional de Estudos Sobre o Meio Ambiente, pp 404 – 415, Londrina, PR, 1991.

CAO, Y. *and* DETWELLER, R. J. **Backscattered electron imaging of cement pastes cured at elevated temperatures**. In: Cement and Concrete Research, 1995. v. 25. p. 627-638.

DE CAPITANI, E. M. *et al.* **Toxicologia da sílica.** J Pneumol. v. 22, n.4, pp 185-194, 1996.

FARIAS, F. F.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; LIRA, H. L. e FERREIRA, H. C. **Revestimento cerâmico de base vermelha utilizando resíduos de caulim e granito – Parte IV.** Revista Matéria, v. 12, n. 1, pp 226 – 236. In: 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2006, Blumenau, SC. Anais, 2007.

FARIAS FILHO, J. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito.** Campina Grande, 2007. 152p. Tese (Doutorado) – Engenharia de Processo, Universidade de Campina Grande-PB.

HEWLETT, P. C. *et al.* **Lea's chemistry of cement and concrete.** 4th ed. Burlington: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2004.

LUKE, K *et al.* **Some factors affecting formation of truscottite and xonotlite at 300-350°C.** In: Cement and Concrete Research 11 (1981), 197 - 203.

MARQUES Y. A.; FILHO D. V.; PILEGGI R. G. e PANDOLFELLI V. C. **Influência dos aditivos de consolidação sobre as propriedades termomecânicas da matriz de concretos de projeção.** Cerâmica, v. 50, n. 315, São Paulo, 2004.

MEHTA, P. K. **Concrete Technology for Sustainable Development - An Overview of Essential Principles.** Berkeley, 1999.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MEIRA, G. R. **Construções de concreto armado, disciplina do curso superior em construção de edifícios.** Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba. Apostila, 2003.

MELO, W. A. **Incorporação do resíduo de caulim para uso em argamassa na construção civil.** Seminário apresentado no programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2007.

MELO,W.A. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Materiais), UFCG, Campina Grande – PB, 2008.

MENEZES, R. R. *et al.* **Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos.** Revista Matéria, v. 12, n. 1, pp 226 - 236, 2007.

MORAIS, C. R. S. **Técnicas de caracterização de materiais.** Universidade Federal de Campina Grande. Apostila, 2008.

MONTANHEIRO, *et al.* **Características e propriedades pozolânicas de arenitos opalinos da serra de Itaqueri,SP.** Revista do Instituto Geológico, v. 23, n. 1, pp13-24, São Paulo, 2002.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N. e HOLANDA, J. N. F. **Cerâmica**, v. 49, n. 312, pp 262 - 267, 2003.

MORELLI, Arnaldo Carlos. **O efeito de adições minerais nas propriedades mecânicas de pastas de cimento Portland reforçadas com fibras de polipropileno.** Tese de Doutorado 218 p., São Carlos: UFSCar, 2001.

NEVES, G. A. **Reciclagem de resíduos da serragem de granitos para uso como matérias-primas cerâmicas.** Campina Grande-PB, 2002. 242p. Tese de Doutorado, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2 ed. São Paulo: Editora, 1997.

NELSON, E. B. **Well cementing.** Houston: Dowell Schlumberger Educational Services, 1990.

OLIVEIRA, I. R.; SALOMÃO, R. e PANDOLFELLI, V. C. **Aditivos e sua influência no comportamento de secagem e resistência à tração de concretos refratários**. Revista Cerâmica, v. 53, p. 396-403, 2007.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia microestrutura e propriedades**. Ed. Hemus. Curitiba – pr, 2000.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 14 ed., São Paulo: Globo, 2005.

RAMALHO, M. A. F., ALMEIDA; R. R., NEVES, G. A. e SANTANA, L. N. L. **Caracterização de resíduos de caulim e granito para uso em massas cerâmicas – Parte I**. In: 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Pedro – SP, 2005.

PORTAL DO CONCRETO. Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2008, 21h00min.

RODRIGUES, G. L.; ALBIZU, E. J.; RINK, M. R. M. P. e AMARAL, N. **Análise da poeira gerada na utilização de recursos minerais pela indústria da construção civil em Curitiba/PR: influências para os trabalhadores**. Curitiba, PR, 2006.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992. v. 2 .

SILVA, S. P. **Balanco Mineral Brasileiro**. Distrito do DNPM-PA, 2001.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2th ed. New York: Thomas Telford, 2003.

USP UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Reciclagem na construção civil, alternativa econômica para proteção ambiental**. Anais de Seminário, 1997.

USP UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Reciclagem na Construção**. São Paulo: USP, 2000. Disponível em: <[http:// www.reciclagem.pcc.usp.br](http://www.reciclagem.pcc.usp.br). Acesso em: 15 de setembro de 2007, 19h00min.

VARGAS, M.; PETRUCCI, E.; CASTRO, S. e NEVES, E. **Manual do Engenheiro**: materiais de construção. Porto Alegre: Globo, 1977. v. 4. Tomo 1.

WU, D. S. and PENG, Y. N. **The macro- and micro properties of cement pastes with silica-rich materials cured by wet-mixed steaming injection**. In: Cement and Concrete Research, 2003. v. 33. p. 1331-1345.

ANEXO A

(Moldagem, cura, perda de massa e rompimento dos corpos-de-prova)

Moldagem, cura, perda de massa e rompimento dos corpos-de-prova.



INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Campina Grande
 CURSO: Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
 ORIENTADOR: Gelmires de Araújo Neves
 CO-ORIENTADOR: Ulisses Targino Bezerra
 ALUNA: Dayelly Gonçalves Fuzari

PERDA DE MASSA

Massa inicial (média (g))

Temperatura (°C)	Referência	Caulim	Granito	Caulim + Granito
30	429,55	366,85	373,06	378,98
100	425,34	388,54	361,59	371,64
120	431,59	400,50	387,76	380,04
180	422,30	396,09	378,98	394,90
230	431,68	395,55	375,67	379,44
300	431,64	353,28	390,35	364,23
350	429,09	350,69	396,23	369,63
400	426,46	365,59	399,23	394,85

Perda de Massa (g)

Temperatura (°C)	Referência	Caulim	Granito	Caulim + Granito
30	4,59	4,41	3,32	3,92
100	36,06	35,66	33,37	36,80
120	42,05	45,01	41,85	41,24
180	42,30	44,42	43,98	41,57
230	40,85	43,28	40,05	38,83
300	45,16	39,83	44,61	38,16
350	45,00	42,08	46,67	45,18
400	45,05	46,30	47,21	48,35
MÉDIA	37,63	37,62	37,63	36,76

Perda de Massa (%)

Temperatura (°C)	Referência	Caulim	Granito	Caulim + Granito
30	1,07	1,20	0,89	1,04
100	8,48	9,18	9,23	9,90
120	9,74	11,24	10,79	10,85
180	10,02	11,22	11,60	10,53
230	9,46	10,94	10,66	10,23
300	10,46	11,27	11,43	10,48
350	10,49	12,00	11,78	12,22
400	10,56	12,67	11,83	12,24

Relação de perda de Massa entre 30°C e as demais temperaturas (%)

Temperatura (°C)	Referência	Caulim	Granito	caulim + granito
100	12,7	12,4	10,0	10,7
120	10,9	9,8	7,9	9,5
180	10,9	9,9	7,6	9,4
230	11,2	10,2	8,3	10,1
300	10,2	11,1	7,5	10,3
350	10,2	10,5	7,1	8,7
400	10,2	9,5	7,0	8,1
Média	10,9	10,5	7,9	9,5
Média Geral		9,7		



INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Campina Grande
CURSO: Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
ORIENTADOR: Gelmires de Araújo Neves
CO-ORIENTADOR: Ulisses Targino Bezerra
ALUNA: Dayelly Gonçalves Fuzari

MICROCONCRETO ADITIVADO COM RESÍDUOS DE CAULIM E GRANITO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS

ENSAIOS EXPLORATÓRIOS NO LABORATÓRIO LABEME DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

DATA DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA: 01.07.07

DATA DE ENTRADA DOS CORPOS-DE-PROVA NO FORNO A 100°C: 02.07.07

DATA DE ROMPIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA : 08.07.07

MASSAS DOS CORPOS-DE-PROVA (g)

ANTES DE COLOCAR NO FORNO A 100°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	430,16	390,46	360,04	366,95
CP2	433,20	395,00	364,95	375,22
CP3	412,66	380,16	359,77	372,74
MÉDIA	425,34	388,54	361,59	371,64

APÓS SETE DIAS NO FORNO A 100°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	393,90	355,70	327,36	331,51
CP2	396,30	358,02	331,25	338,05
CP3	377,63	344,91	326,05	334,95
MÉDIA	389,28	352,88	328,22	334,84

PERDA DE MASSA (g)

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	36,26	34,76	32,68	35,44
CP2	36,90	36,98	33,70	37,17
CP3	35,03	35,25	33,72	37,79
MÉDIA	36,06	35,66	33,37	36,80

RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA APÓS SETE DIAS

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1				
Kgf	3625,00	2450,00	775,00	1300,00
Kgf/cm2	184,71	124,84	39,49	66,24
Mpa	18,47	12,48	3,95	6,62
CP2				
Kgf	3125,00	2250,00	1275,00	1650,00
Kgf/cm2	159,24	114,65	64,97	84,08
Mpa	15,92	11,46	6,50	8,41
CP3				
Kgf	3500,00	1375,00	950,00	1150,00
Kgf/cm2	178,34	70,06	48,41	58,60
Mpa	17,83	7,01	4,84	5,86
MÉDIA				
Mpa	17,41	10,32	5,10	6,96



INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Campina Grande
CURSO: Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
ORIENTADOR: Gelmires de Araújo Neves
CO-ORIENTADOR: Ulisses Targino Bezerra
ALUNA: Dayelly Gonçalves Fuzari

MICROCONCRETO ADITIVADO COM RESÍDUOS DE CAULIM E GRANITO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS

ENSAIOS EXPLORATÓRIOS NO LABORATÓRIO LABEME DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

DATA DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA: 08.07.07

DATA DE ENTRADA DOS CORPOS-DE-PROVA NO FORNO A 120°C: 09.07.07

DATA DE ROMPIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA : 15.07.07

MASSAS DOS CORPOS-DE-PROVA (g)

ANTES DE COLOCAR NO FORNO A 120°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	430,46	413,73	377,10	386,60
CP2	438,16	395,06	394,34	376,75
CP3	426,15	392,70	391,83	376,77
MÉDIA	431,59	400,50	387,76	380,04

APÓS SETE DIAS NO FORNO A 120°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	388,81	368,22	336,72	343,12
CP2	395,19	346,88	349,78	336,14
CP3	384,61	351,35	351,22	337,14
MÉDIA	389,54	355,48	345,91	338,80

PERDA DE MASSA (g)

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	41,65	45,51	40,38	43,48
CP2	42,97	48,18	44,56	40,61
CP3	41,54	41,35	40,61	39,63
MÉDIA	42,05	45,01	41,85	41,24

RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA APÓS SETE DIAS

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1				
Kgf	3000,00	2950,00	1975,00	2225,00
Kgf/cm ²	152,87	150,32	100,64	113,38
Mpa	15,29	15,03	10,06	11,34
CP2				
Kgf	3250,00	2175,00	2175,00	2125,00
Kgf/cm ²	165,61	110,83	110,83	108,28
Mpa	16,56	11,08	11,08	10,83
CP3				
Kgf	2875,00	2100,00	2225,00	1500,00
Kgf/cm ²	146,50	107,01	113,38	76,43
Mpa	14,65	10,70	11,34	7,64
MÉDIA				
Mpa	15,50	12,27	10,83	9,94



INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Campina Grande
CURSO: Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
ORIENTADOR: Gelmires de Araújo Neves
CO-ORIENTADOR: Ulisses Targino Bezerra
ALUNA: Dayelly Gonçalves Fuzari

MICROCONCRETO ADITIVADO COM RESÍDUOS DE CAULIM E GRANITO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS

ENSAIOS EXPLORATÓRIOS NO LABORATÓRIO LABEME DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

DATA DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA: 05.07.07

DATA DE ENTRADA DOS CORPOS-DE-PROVA NO FORNO A 180°C: 06.07.07

DATA DE ROMPIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA: 12.07.07

MASSAS DOS CORPOS-DE-PROVA (g)

ANTES DE COLOCAR NO FORNO A 180°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	416,67	402,83	364,98	396,81
CP2	426,56	388,04	389,40	406,56
CP3	423,66	397,40	382,55	381,34
MÉDIA	422,30	396,09	378,98	394,90

AÓS SETE DIAS NO FORNO A 180°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	375,00	355,00	330,00	340,00
CP2	380,00	355,00	335,00	365,00
CP3	385,00	345,00	340,00	355,00
MÉDIA	380,00	351,67	335,00	353,33

PERDA DE MASSA (g)

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	41,67	47,83	34,98	56,81
CP2	46,56	33,04	54,40	41,56
CP3	38,66	52,40	42,55	26,34
MÉDIA	42,30	44,42	43,98	41,57

RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA AÓS SETE DIAS

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1				
Kgf	2500,00	3115,00	1675,00	1675,00
Kgf/cm ²	127,39	158,73	85,35	85,35
Mpa	12,74	15,87	8,54	8,54
CP2				
Kgf	2500,00	2750,00	1325,00	2500,00
Kgf/cm ²	127,39	140,13	67,52	127,39
Mpa	12,74	14,01	6,75	12,74
CP3				
Kgf	2200,00	2750,00	1375,00	2025,00
Kgf/cm ²	112,10	140,13	70,06	103,18
Mpa	11,21	14,01	7,01	10,32
MÉDIA				
Mpa	12,23	14,63	7,43	10,53



INSTITUI O: Universidade Federal de Campina Grande
CURSO: Pós-Gradua o em Ciência e Engenharia de Materiais
ORIENTADOR: Gelmires de Araújo Neves
CO-ORIENTADOR: Ulisses Targino Bezerra
ALUNA: Dayelly Gonçalves Fuzari

MICROCONCRETO ADITIVADO COM RESÍDUOS DE CAULIM E GRANITO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS

ENSAIOS EXPLORATÓRIOS NO LABORATÓRIO LABEME DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

DATA DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA: 15.07.07

DATA DE ENTRADA DOS CORPOS-DE-PROVA NO FORNO A 230 C: 16.07.07

DATA DE ROMPIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA: 22.07.07

MASSAS DOS CORPOS-DE-PROVA (g)

ANTES DE COLOCAR NO FORNO A 230 C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	433,03	395,13	368,28	386,30
CP2	427,58	398,76	379,32	375,17
CP3	434,43	392,77	379,41	376,85
MÉDIA	431,68	395,55	375,67	379,44

APÓS SETE DIAS NO FORNO A 230 C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	391,72	351,59	331,02	345,96
CP2	386,98	356,25	337,86	336,98
CP3	393,78	348,99	337,97	338,88
MÉDIA	390,83	352,28	335,62	340,61

PERDA DE MASSA (g)

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	41,31	43,54	37,26	40,34
CP2	40,60	42,51	41,46	38,19
CP3	40,65	43,78	41,44	37,97
MÉDIA	40,85	43,28	40,05	38,83

RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA APÓS SETE DIAS

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1				
Kgf	1875,00	2950,00	1275,00	1800,00
Kgf/cm2	95,54	150,32	64,97	91,72
Mpa	9,55	15,03	6,50	9,17
CP2				
Kgf	1675,00	1650,00	1325,00	1300,00
Kgf/cm2	85,35	84,08	67,52	66,24
Mpa	8,54	8,41	6,75	6,62
CP3				
Kgf	1700,00	2325,00	1275,00	1600,00
Kgf/cm2	86,62	118,47	64,97	81,53
Mpa	8,66	11,85	6,50	8,15
MÉDIA				
Mpa	8,92	11,76	6,58	7,98



INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Campina Grande
CURSO: Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
ORIENTADOR: Gelmires de Araújo Neves
CO-ORIENTADOR: Ulisses Targino Bezerra
ALUNA: Dayelly Gonçalves Fuzari

MICROCONCRETO ADITIVADO COM RESÍDUOS DE CAULIM E GRANITO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS

ENSAIOS EXPLORATÓRIOS NO LABORATÓRIO LABEME DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

DATA DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA: 12.09.08

DATA DE ENTRADA DOS CORPOS-DE-PROVA NO FORNO A 300°C: 13.09.08

DATA DE ROMPIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA : 20.09.08

MASSAS DOS CORPOS-DE-PROVA (g)

ANTES DE COLOCAR NO FORNO A 300°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	425,32	353,47	387,49	365,63
CP2	427,46	357,64	380,45	361,34
CP3	442,14	348,72	403,10	365,71
MÉDIA	431,64	353,28	390,35	364,23

AÓS SETE DIAS NO FORNO A 300°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	381,35	313,18	343,93	329,08
CP2	382,71	317,25	336,26	322,75
CP3	395,37	309,91	357,03	326,37
MÉDIA	386,48	313,45	345,74	326,07

PERDA DE MASSA (g)

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	43,97	40,29	43,56	36,55
CP2	44,75	40,39	44,19	38,59
CP3	46,77	38,81	46,07	39,34
MÉDIA	45,16	39,83	44,61	38,16

RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA APÓS SETE DIAS

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1				
Kgf	2150,00	1325,00	2675,00	1250,00
Kgf/cm ²	109,55	67,52	136,31	63,69
Mpa	10,96	6,75	13,63	6,37
CP2				
Kgf	2400,00	1750,00	2575,00	1550,00
Kgf/cm ²	122,29	89,17	131,21	78,98
Mpa	12,23	8,92	13,12	7,90
CP3				
Kgf	2050,00	1300,00	2700,00	1325,00
Kgf/cm ²	104,46	66,24	137,58	67,52
Mpa	10,45	6,62	13,76	6,75
MÉDIA				
Mpa	11,21	7,43	13,50	7,01



INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Campina Grande
CURSO: Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
ORIENTADOR: Gelmires de Araújo Neves
CO-ORIENTADOR: Ulisses Targino Bezerra
ALUNA: Dayelly Gonçalves Fuzari

MICROCONCRETO ADITIVADO COM RESÍDUOS DE CAULIM E GRANITO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS

ENSAIOS EXPLORATÓRIOS NO LABORATÓRIO LABEME DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

DATA DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA: 19.09.08

DATA DE ENTRADA DOS CORPOS-DE-PROVA NO FORNO A 350°C: 20.09.08

DATA DE ROMPIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA : 27.09.08

MASSAS DOS CORPOS-DE-PROVA (g)

ANTES DE COLOCAR NO FORNO A 350°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	424,31	352,31	390,85	383,06
CP2	441,80	353,72	399,58	366,71
CP3	421,17	346,05	398,27	359,11
MÉDIA	429,09	350,69	396,23	369,63

APÓS SETE DIAS NO FORNO A 350°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	380,73	310,41	345,01	337,30
CP2	394,86	310,94	351,94	321,10
CP3	376,69	304,50	351,75	314,95
MÉDIA	384,09	308,62	349,57	324,45

PERDA DE MASSA (g)

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	43,58	41,90	45,84	45,76
CP2	46,94	42,78	47,64	45,61
CP3	44,48	41,55	46,52	44,16
MÉDIA	45,00	42,08	46,67	45,18

RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA APÓS SETE DIAS

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1				
Kgf	2700,00	1000,00	2250,00	1350,00
Kgf/cm ²	137,58	50,96	114,65	68,79
Mpa	13,76	5,10	11,46	6,88
CP2				
Kgf	3625,00	1250,00	2450,00	1475,00
Kgf/cm ²	184,71	63,69	124,84	75,16
Mpa	18,47	6,37	12,48	7,52
CP3				
Kgf	2750,00	1300,00	2300,00	1250,00
Kgf/cm ²	140,13	66,24	117,20	63,69
Mpa	14,01	6,62	11,72	6,37
MÉDIA				
Mpa	15,41	6,03	11,89	6,92



INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Campina Grande
CURSO: Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
ORIENTADOR: Gelmires de Araújo Neves
CO-ORIENTADOR: Ulisses Targino Bezerra
ALUNA: Dayelly Gonçalves Fuzari

MICROCONCRETO ADITIVADO COM RESÍDUOS DE CAULIM E GRANITO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS

ENSAIOS EXPLORATÓRIOS NO LABORATÓRIO LABEME DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

DATA DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA: 05.08.07

DATA DE ENTRADA DOS CORPOS-DE-PROVA NO FORNO A 400°C: 06.08.07

DATA DE ROMPIMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA : 12.08.07

MASSAS DOS CORPOS-DE-PROVA (g)

ANTES DE COLOCAR NO FORNO A 400°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	417,06	370,70	405,14	400,35
CP2	424,27	358,07	398,93	389,88
CP3	438,04	367,99	393,62	394,33
MÉDIA	426,46	365,59	399,23	394,85

APÓS SETE DIAS NO FORNO A 400°C

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	372,00	324,12	357,65	351,06
CP2	379,51	312,67	350,78	342,66
CP3	392,72	321,06	347,62	345,80
MÉDIA	381,41	319,28	352,02	346,51

PERDA DE MASSA (g)

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1	45,06	46,58	47,49	49,29
CP2	44,76	45,40	48,15	47,22
CP3	45,32	46,93	46,00	48,53
MÉDIA	45,05	46,30	47,21	48,35

RESISTÊNCIA DOS CORPOS-DE-PROVA APÓS SETE DIAS

CORPOS-DE-PROVA	CORPOS-DE-PROVA DE REFERÊNCIA	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE CAULIM	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO	CORPOS-DE-PROVA COM RESÍDUOS DE GRANITO E CAULIM
CP1				
Kgf	2525,00	2075,00	2675,00	2800,00
Kgf/cm2	128,66	105,73	136,31	142,68
Mpa	12,87	10,57	13,63	14,27
CP2				
Kgf	2550,00	1750,00	2575,00	2825,00
Kgf/cm2	129,94	89,17	131,21	143,95
Mpa	12,99	8,92	13,12	14,39
CP3				
Kgf	2825,00	2100,00	2350,00	2575,00
Kgf/cm2	143,95	107,01	119,75	131,21
Mpa	14,39	10,70	11,97	13,12
MÉDIA				
Mpa	13,42	10,06	12,91	13,93

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)