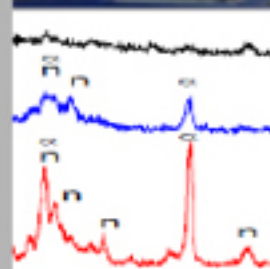


A QUÍMICA APLICADA AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA CONSTRUÇÃO CIVIL:

A Importância da Relação entre a Composição Química e as Propriedades Mecânicas da Pasta de Cimento Portland em sua Potencial Reciclagem

PhD. Alofzio Geraldo de Araújo Júnior



 Editora
Atena

Ano 2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Edição de Arte e Capa: Geraldo Alves

Revisão: O autor

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

A663q Araújo Júnior, Aloízio Geraldo de.
A química aplicada ao desenvolvimento sustentável da construção civil [recurso eletrônico] / Aloízio Geraldo de Araújo Júnior. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-85-93243-97-4
DOI 10.22533/at.ed.974182904

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Engenharia civil.
3. Engenharia química. I. Título.

CDD 624.1

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

E-mail: contato@atenaeditora.com.br

Agradecimentos e dedicatória

Agradeço a Deus por me permitir concluir esta obra, ao Ministério da Educação, ao Ministério da Ciência e Tecnologia, a Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ) e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a cristalização deste trabalho. Também agradeço aos pró-reitores, aos professores e técnicos das Universidades Federais que incentivaram a confecção deste livro.

Este trabalho é dedicado a todas as pessoas que não apenas projetam seus sonhos, mas também não medem esforços para executá-los com fé em Deus e perseverança.

Prefácio

É inequívoco a concreticidade dos impactos ambientais gerados pela indústria da construção civil, assim como a crescente necessidade de desenvolvimento sustentável nesta área. Desta forma a presente obra aborda tanto a destruição do meio ambiente devido a produção de agregados e de cimento Portland, como os impactos ambientais causados pelos Resíduos de Construção e Demolição (RCD). No decorrer deste livro, são apresentados métodos de reciclagem de agregados já utilizados pela indústria da construção civil e suas limitações. Sob uma perspectiva da Química Aplicada, é apresentado um estudo do cimento Portland desde sua matéria prima até sua utilização. Neste contexto, é demonstrado resultados de pesquisas a respeito da potencial reciclagem da pasta de cimento Portland, que ainda tramitam na literatura científica e aguardam devido investimento. Uma atenção especial é dada ao estudo da hidratação, desidratação e reidratação do cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI (CP-V). Apresentando assim, de forma parcial a metodologia de pesquisa adotada, os resultados, as discussões e algumas conclusões. Nesta obra, não se poupa esforços em se estabelecer relações entre a composição química, a estrutura química, a microestrutura, as propriedades físicas e as propriedades mecânicas dos corpos de provas estudados. Para tal, são apresentados resultados de pesquisas científicas obtidos a partir da caracterização dos materiais envolvidos via Difractometria de Raios-X (DRX), Infravermelho com Transformada de Fourier (IVTF), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Análise Térmica Gravimétrica (ATG). Também são apresentados resultados de ensaios de Absorção de Água (AA), de Densidade Aparente (DA), de Densidade Volumétrica (DV), de Porosidade (PO) e de ensaios de Resistência à Compressão. Deixando claro ao leitor que, o elucidar dos segredos da sustentabilidade do cimento Portland se cristaliza muitas vezes no revelar da relação existente entre os universos micro e macroscópico.

LISTA DE ABREVIATURAS

RCD	Resíduos de construção e demolição
CP-V	Cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI
PCH	Pasta de cimento hidratada
7-PCH	Pasta de cimento hidratada após 7 dias de cura
14-PCH	Pasta de cimento hidratada após 14 dias de cura
21-PCH	Pasta de cimento hidratada após 21 dias de cura
28-PCH	Pasta de cimento hidratada após 28 dias de cura
PCD	Pó de cimento desidratado
300-PCD	Pó de cimento desidratado a 300 °C
500-PCD	Pó de cimento desidratado a 500 °C
700-PCD	Pó de cimento desidratado a 700 °C
900-PCD	Pó de cimento desidratado a 900 °C
PCR	Pasta de cimento Reidratada
700-PCR	Pasta de cimento reidratada obtida partindo de 700-PCD
7-700-PCR	Pasta de cimento reidratada após 7 dias de cura partindo de 700-PCD
14-700-PCR	Pasta de cimento reidratada após 14 dias de cura partindo de 700-PCD
21-700-PCR	Pasta de cimento reidratada após 21 dias de cura partindo de 700-PCD
28-700-PCR	Pasta de cimento reidratada após 28 dias de cura partindo de 700-PCD
900-PCR	Pasta de cimento reidratada obtida partindo de 900-PCD.
7-900-PCR	Pasta de cimento reidratada após 7 dias de cura partindo de 900-PCD
14-900-PCR	Pasta de cimento reidratada após 14 dias de cura partindo de 900-PCD
21-900-PCR	Pasta de cimento reidratada após 21 dias de cura partindo de 900-PCD
28-900-PCR	Pasta de cimento reidratada após 28 dias de cura partindo de 900-PCD

X-700-PCR Corpos de prova preparados a partir de X% de 700-PCD e CP-V.
(Onde X pode assumir valores de: 2, 5, 10, 20, 40, 50, 60)

X-900-PCR X-900-PCR Corpos de prova preparados a partir de X% de 900-
PCD e CP-V. (Onde X pode assumir valores de: 2, 5, 10, 20, 40, 50,
60)

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO	5
2-RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	6
3-RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	12
4-CIMENTO PORTLAND DESDE A MATÉRIA PRIMA ATÉ APLICAÇÃO.....	17
5-RECICLAGEM DA PASTA DE CIMENTO PORTLAND.....	33
5.1-ESTUDO DA HIDRATAÇÃO, DESIDRATAÇÃO E REIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V).....	36
5.1.1-METODOLOGIA.....	36
5.1.2-RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
5.1.2.1-ESTUDO DA ESTRUTURA E MICROESTRUTURA DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V) DURANTE SUA HIDRATAÇÃO.....	46
5.1.2.2-ESTUDO DA ESTRUTURA E MICROESTRUTURA DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V) DURANTE SUA DESIDRATAÇÃO.....	52
5.1.2.3-ESTUDO DA ESTRUTURA E MICROESTRUTURA DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V) DURANTE SUA REIDRATAÇÃO.....	59
5.1.2.4-ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS PARA CORPOS DE PROVA DE PCH.....	66
5.1.2.5-ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DA MICROESTRUTURA PARA CORPOS DE PROVA DE PCR.....	71
5.1.3-CONCLUSÕES DO ESTUDO DA HIDRATAÇÃO, DESIDRATAÇÃO E REIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V).....	82
6-CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
REFERÊNCIAS.....	84
SOBRE O AUTOR.....	96

1-INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais são discutidos atualmente em diversas áreas do conhecimento. A indústria da construção é uma das grandes geradoras de resíduos sólidos existentes no mundo e responsável por uma série de impactos ambientais [1, 2, 3]. Assim uma crescente preocupação em estudar os resíduos de construção e demolição (RCD), vem ocorrendo por parte da comunidade científica, por meio de estudos que dizem respeito à definição, as fontes geradoras, a quantificação, a classificação e a composição dos RCD. Sabe-se que a construção civil tem uma importante representação mundial no desencadear de impactos ambientais, e que abrange desde a fabricação de cimento que envolve a exploração de recursos naturais e suas emissões de gás carbônico na atmosfera até a deposição de resíduos em aterros [1]. Anualmente a produção de cimento é responsável por grande parte das emissões de CO₂ gerada em todo o mundo [4]. Assim, já existem sinais bastante claros de que o modelo atual de desenvolvimento, baseado na extração maciça de recursos naturais e geração de resíduos não é sustentável em longo prazo [5]. Em substituição a esse modelo, vem sendo proposto o modelo de desenvolvimento sustentável, desta forma, a reciclagem se faz uma ferramenta necessária para que o desenvolvimento sustentável no setor da construção civil seja alcançado [5].

A reciclagem de RCD para obtenção de agregados para uso na construção civil já é uma realidade em diferentes países. Contudo, devido à presença de pasta de cimento residual em agregado de concreto reciclado, a porosidade destes é significativamente mais acentuada que a dos agregados naturais [6-8]. Os materiais de resíduos cimentícios são difíceis de serem reciclados, assim muitas investigações sobre os materiais de resíduos cimentícios estão focadas na pasta de cimento endurecido do reciclado [9]. Neste contexto, já se fazem presentes na literatura científica, vários trabalhos desenvolvidos por pesquisadores de diferentes países que não medem esforços para romper as limitações dos métodos de reciclagem de resíduos de construção e demolição.

2-RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O macro complexo da construção civil gera resíduos em todas as etapas: na produção de materiais e componentes, nas diversas atividades do canteiro, na manutenção e principalmente na modernização da obra [5]. Entretanto, muitas vezes são conhecidos por RCD somente os resíduos originários de perdas e desperdícios das atividades de construção, manutenção e demolição de obras [5]. Os RCD representam de 13 a 67% em massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU) tanto no Brasil como no exterior, cerca de 2 a 3 vezes a massa de lixo urbano [10]. Os resíduos de construção civil (RCC) são gerados não apenas em novas edificações, mas também são gerados em reformas e ampliações. No Brasil grande quantidade de RCC é gerada em reformas e edificações, este fato pode ser notado com a análise da Figura 1 [11, 12].

O valor da geração de resíduos depende da intensidade da atividade de construção em cada país, da tecnologia empregada, taxas de desperdícios e manutenção, este volume pode crescer significativamente em função de desastres naturais ou guerra [5]. A Tabela 1 resume as principais estimativas da geração de RCD encontrados em diferentes países [5].

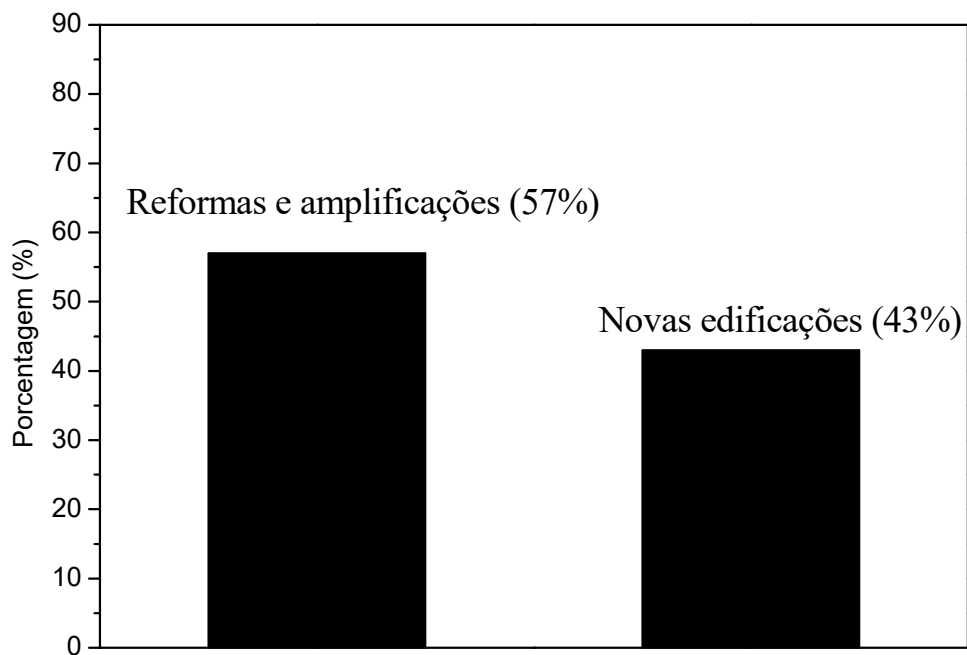


Figura 1: Quantificação em massa, da origem dos RCC em algumas cidades do Brasil.

Ensaio de lixiviação (NBR 10.005) e solubilização (NBR 10.006) são utilizados para a classificação dos resíduos segundo a NBR 10.004 [13]. De acordo com a Resolução n° 307/2002 do CONAMA, os resíduos de construção civil e de demolição são classificados de acordo com a Tabela 2 [11].

Tabela 1: Estimativa da geração de RCD em diferentes países [5].

País	Quantidade Anual	
	Mton/ano	Kg/hab.
Japão	99	785
Portugal	3,2	325
Suécia	1,2 - 1,6	136 - 680
EUA	136 - 171	463 - 584
Itália	35 - 40	600 - 690
Holanda	12,8 - 20,2	820 - 1300
Dinamarca	2,3 - 10,7	440 - 2010
Bélgica	7,5 - 34,7	735 - 3359
Alemanha	79 - 300	963 - 3658

Tabela 2: Classificação dos resíduos conforme resolução CONAMA n° 307/2002 [11].

Classificação	Tipologia
Classe A	São os resíduos reutilizáveis ou reciclados como agregados tais como: tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos, argamassas e concreto.
Classe B	São os resíduos recicláveis para outras destinações tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, etc.
Classe C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.
Classe D	São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção tais como: amianto, tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações.

O RCD tem constituição variável, para citar exemplos podem ser identificados: solos; rochas; concreto armado ou não; argamassas a base de cimento e cal; metais; madeira; plásticos diversos; materiais betuminosos; vidro; gesso; pasta e placa; tintas e adesivos; restos de embalagens; resíduos de cerâmica vermelha como tijolos e telhas; cerâmica branca, especialmente a de revestimento; cimento-amianto; produtos de limpeza de terrenos, entre outros [14]. Assim as proporções dos

constituintes dos RCD são variáveis, e ocorre de acordo à fonte geradora da construção, reforma/demolição, fase da obra, tecnologia construtiva, natureza da obra, etc [14]. A Figura 2 apresenta a composição média do RCD depositado no aterro sanitário de Itatinga na cidade de São Paulo [5].

O RCD europeu de forma geral, apresenta teores de material não-mineral inferiores a 10%, geralmente entre 2 e 3%. Os resíduos na Alemanha são compostos por impurezas orgânicas, concretos leves e outros materiais porosos, cerâmicas com densidades entre 2,2 e 2,4 g/cm³ e rochas naturais com densidades superiores a 2,5 g/cm³; é acentuada a presença de concreto, ao contrário da argamassa. Já no Japão cerca de metade (51%) do resíduo é composto por outros materiais, como plástico, papel, matéria orgânica e solo com grande parcela de madeira [15].

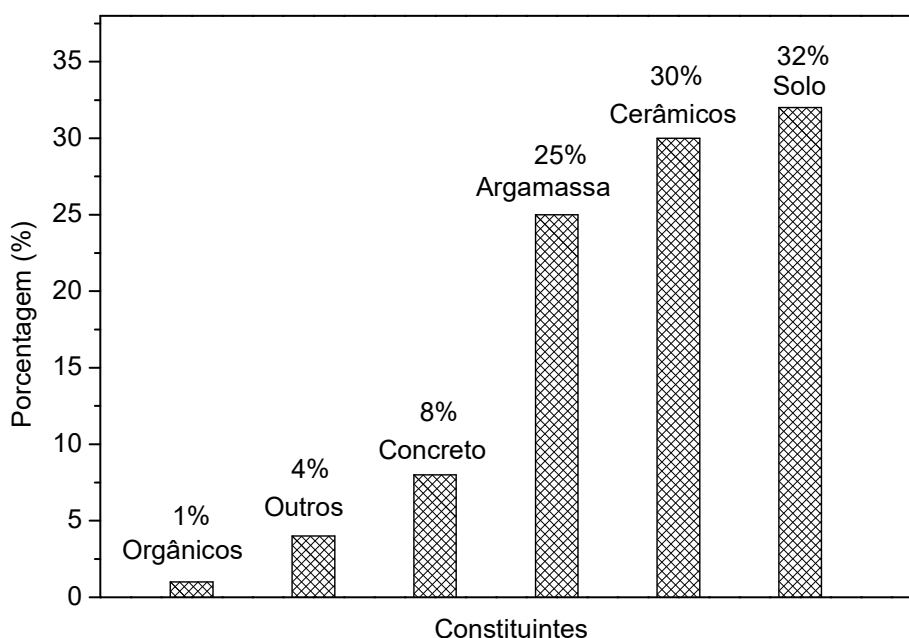


Figura 2: Composição média dos entulhos depositados no aterro de Itatinga, São Paulo.

A Tabela 3 apresenta a composição média dos RCD na Holanda e no Japão. Segundo a resolução CONAMA n°. 1 de 23 de janeiro de 1986, impacto ambiental é conceituado como “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos naturais” [10, 16].

Tabela 3: Composição média dos RCD na Holanda e no Japão [10].

Constituinte do Resíduo de Construção e Demolição	Holanda	Japão
Cerâmica	39%	12%
Madeira	17%	19%
Concreto	13%	17%
Tijolos e elementos calcáreos	14%	1%
Argamassa	8%	-
Outros (Plásticos, solos, papel e orgânicos)	9%	51%

O setor da construção civil produz os bens com maiores dimensões físicas do planeta e é o maior consumidor de recursos naturais de qualquer economia [5]. Durante a vida útil de um edifício, as atividades de manutenção consomem recursos em volume aproximadamente igual aos despendidos na fase de produção [5]. A indústria de construção usa aproximadamente 1,6 bilhões de toneladas de cimento e 10 bilhões de toneladas de brita, cascalho e areia a cada ano [17]. Em se tratando da composição química dos agregados utilizados na construção civil a areia é considerada um agregado miúdo e possui composição química predominante de sílica, já o granito britado, um agregado graúdo, é uma rocha formada pela combinação de minerais e possui uma quantidade de sílica um pouco menor. A Tabela 4, apresenta a composição química de uma areia natural lavada, assim como também a composição química do resíduo sólido de pó de rocha granítica [18, 19]. O granito é formado por quantidades consideráveis de minerais como quartzo, microclina, plagioclásio e augita sódica [20].

O setor da construção civil consome, por exemplo, enormes quantidades de materiais com significativo conteúdo energético que necessitam ser transportados a grandes distâncias. Estima-se que cerca de 80% da energia utilizada na produção de um edifício é consumida na produção e transporte de materiais [16]. Os principais impactos sanitários e ambientais relacionados aos RCD talvez sejam aqueles associados às disposições irregulares, uma conjunção de efeitos deteriorantes do ambiente local:

- Degradação da paisagem urbana;
- Ocupação de vias e logradouros públicos, prejudicando o tráfego de pedestres e de veículos;

- Assoreamento de rios e córregos, com obstrução dos canais de drenagem de águas pluviais provocando enchentes (é muito frequente o reconhecimento da concentração de disposições irregulares ao longo de cursos de água);
- Atração de outros resíduos não-inertes;
- Multiplicação de vetores de doenças com o comprometimento da saúde pública.

Tabela 4: Composição química típica [18].

Composição	Areia (%)	Granito (%)
SiO ₂	90,24	72,17
Al ₂ O ₃	4,34	10,80
Fe ₂ O ₃	0,94	5,04
CaO	0,14	2,33
MgO	0,24	0,94
MnO	0,01	0,08
TiO ₂	0,54	1,07
Na ₂ O	0,42	2,34
K ₂ O	1,51	3,87
P ₂ O ₅	0,01	0,27

O comprometimento do tráfego de veículos pela disposição irregular de RCD em Diadema/SP pode ser observado na Figura 3, e a obstrução do córrego dos meninos entre Santo André e São Bernardo/SP, pode ser observada na Figura 4 [16].

A indústria de construção civil gera quantidades não desprezíveis de gases de efeito estufa, já que anualmente a produção de cimento é responsável por cerca de 5 a 7% das emissões de CO₂ na atmosfera [17]. A indústria de cimento tem aumentado a emissão de gases de estufa no decorrer dos anos. As emissões de CO₂ a partir de fábricas de cimento em 1990 foram de 500 milhões de toneladas, em 2006 a emissão destes gases chegou a 1,88 bilhões de toneladas [17]. Os dez países com maior contribuição na emissão de CO₂ gerado pela indústria do cimento são apresentados na Figura 5 [17]. Além disso, no processo de produção de cimento, grandes mineradoras exploram calcário, argila e carvão (combustível para produção de cimento) do meio ambiente, causando assim desmatamento e perda superficial do solo [17].



Figura 3: Disposição de RCD de forma irregular em Diadema/SP [16].



Figura 4: Córrego dos meninos entre Santo André e São Bernardo/SP [16].

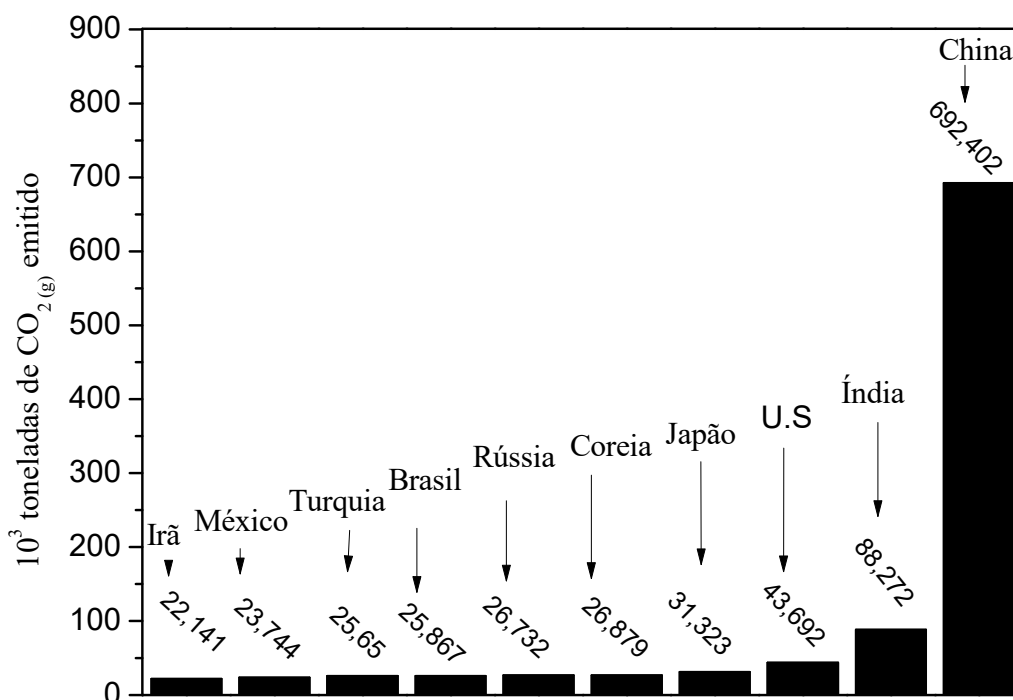


Figura 5: Os dez países com maior contribuição de CO₂ pela indústria do cimento em 2008, em Kt de gás emitido [17].

3-RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O reaproveitamento de resíduos para uso em construção é praticado desde o Império Romano e Grécia Antiga. Há relatos de uso de restos de telhas, tijolos e utensílios de cerâmica como agregado graúdo em concretos rudimentares [21]. Aplicava-se também estes rejeitos moídos, como aglomerantes, com aproveitamento das propriedades pozolânicas dos materiais cerâmicos. No século passado, na Alemanha, utilizou-se de restos de blocos de concreto para a produção de artefatos de concreto [22]. Entretanto, foram as grandes catástrofes deste século, como terremotos e guerras, que impulsionaram a prática da reciclagem em locais com grandes volumes de resíduos e grande carência e urgência de construção de edificações e infra-estrutura. Durante a segunda guerra e até 1955, foram reciclados aproximadamente 115 milhões de m³ de resíduos de construção e demolição na Alemanha, os quais foram utilizados na construção de aproximadamente 175 mil unidades habitacionais [22].

A reciclagem de resíduos na construção civil tem sido investigada extensivamente, devido à poluição do meio ambiente e o esgotamento dos recursos

naturais. Em alguns países, muitas tecnologias para reciclagem de resíduos foram desenvolvidas [23-25]. A Tabela 5 apresenta o aspecto quantitativo de recicladoras presentes em alguns países [26].

Tabela 5: Recicladoras de resíduos, em 1992 [26].

País	Recicladoras (Unidades)
Dinamarca	20
Itália	43
França	50
Bélgica	60
Holanda	70
Grã-Bretanha	120
Alemanha	220

Os RCD constituem grandes proporções dos resíduos sólidos. No Brasil 15% dos resíduos sólidos são de construção e demolição, enquanto que nos Estados Unidos cerca de 29% dos resíduos sólidos são de construção e demolição [27]. Na Austrália cerca de 14 milhões de toneladas de resíduos são colocadas em aterros a cada ano e cerca de 44% dos resíduos é atribuída a indústria de construção [27]. A Tabela 6 apresenta a proporção de RCD em resíduos sólidos e a porcentagem dos resíduos de construção e demolição que são reciclados [27].

As tecnologias do tratamento de minérios são aplicadas na reciclagem do RCD. O tratamento de minérios é uma sequência de operações unitárias e tem o objetivo de, a partir de um minério, produzir um concentrado com qualidade física e química adequada à sua utilização pela indústria de transformação (metalúrgica, química, cerâmica e vidreira) [10].

Tabela 6: Comparação da proporção de resíduos de construção [27].

País	Proporção de RCD em resíduos sólidos (%)	RCD reciclados (%)
Itália	30	10
Espanha	70	17
Estados Unidos	29	25
Austrália	44	51
Alemanha	19	40 - 60
Dinamarca	25 - 50	80

As operações unitárias do tratamento de minérios são de quatro tipos e são aplicadas na reciclagem de RCD nas etapas de redução de tamanho, de separação de tamanho, de concentração e auxiliares [28]. As operações de redução de tamanho, também conhecidas como cominuição, são utilizadas normalmente para se reduzir o tamanho das partículas para o transporte, para o uso final e/ou para as operações unitárias subsequentes. Estas operações são de dois tipos: britagem ou moagem, dependendo da granulometria do material. A operação de separação de tamanho separa as partículas pelo seu tamanho, e pode empregar peneiras ou classificadores (pneumáticos ou hidráulicos). As operações de concentração são empregadas quando existem várias espécies minerais presentes e têm por objetivo aumentar o teor de mineral útil, removendo outros minerais (sub-produtos) ou contaminantes. Alguns dos equipamentos empregados nesse tratamento estão resumidos na Tabela 7 [10].

A reciclagem dos resíduos de construção e demolição no Brasil é bastante recente, mas vem chamando a atenção dos gestores urbanos pelas possibilidades que apresenta enquanto a solução de destinação dos RCD e para a geração de produtos a baixo custo. No Brasil, algumas usinas de reciclagem da fração mineral do RCD classificam nos seguintes tipos: cinza (visualmente predominante de componentes de construção de natureza cimentícia) e o vermelho (visualmente predominante de componentes de construção de natureza cerâmica, especialmente do tipo vermelha) [29, 10]. A Figura 6, apresenta um RCD mineral cinza em A e vermelho em B classificado na usina de reciclagem de São Paulo (Itaquera)/Brasil [10].

Tabela 7: Descrição de alguns equipamentos industriais utilizados nas operações unitárias [10].

Operação unitária	Tipo de operação	Equipamentos industriais
Cominuição	Britagem	Britador de mandíbula, giratório e de impacto de rolo.
	Moagem	Moinho de bolas, de barras, de martelos, vibratório e Raymond.
Separação por tamanho	Classificadores	Horizontais, verticais, espiral e ciclones.
	Peneiramento	Rotativo e vibratório.
Concentração	Por densidade	Calha simples, estrangulada, espirais, mesa vibratória, ciclones ou cones de meio denso e equipamentos de meio denso.
	Magnetismo	Ímã de mão, separador de rolos induzidos e separador magnético de alto gradiente.

	Por condutibilidade elétrica	Separador de rolos, separador de placas e separador de alta tensão.
	Físico-química de superfície	Condicionadores e células ou colunas de flotação.



Figura 6: RCD mineral cinza em A e vermelho em B classificado na usina de reciclagem de São Paulo (Itaquera)/Brasil [10].

O agregado proveniente do RCD mineral vermelho é empregado em atividades de pavimentação, principalmente bases de pavimentos. O agregado proveniente do RCD mineral cinza é empregado preferencialmente em calçadas, em blocos de concreto e em mobiliários urbanos à base de cimento, como bancos e outros.

Os agregados reciclados apresentam grande variação em suas propriedades, dependendo da composição do resíduo processado, dos equipamentos usados, do teor de impurezas, da granulometria etc. Apresentam propriedades específicas, diferentes das propriedades dos agregados convencionais, que determinam algumas diferenças nas condições de aplicação e nas características de argamassas e concretos em que forem usados [26].

As principais diferenças com relação aos agregados convencionais são:

- Maior absorção de água dos agregados;
- Heterogeneidade na composição;
- Menor resistência mecânica dos agregados.

Ao se preparar concretos com agregado reciclado, deve-se levar em conta a retirada de água da pasta pelo agregado reciclado, por absorção, influenciando negativamente na hidratação do cimento [26]. Isso ocorre porque a pasta, seja ela advinda do concreto ou da argamassa propriamente dita, quando atua como agregado de RCD reciclado, possui porosidade maior que os agregados naturais [1].

A argamassa aderida no agregado natural pode prejudicar a qualidade do novo concreto, pela menor resistência mecânica, maior absorção de água e menor densidade [26]. Na Tabela 8, são apresentados resultados de ensaios de absorção em reciclados de concreto e agregados convencionais. A absorção independe da qualidade do concreto. Estes resultados apresentam elevadas taxas de absorção em agregados reciclados de concreto. Uma das principais características do reciclado é sua significativa absorção, que pode dificultar o controle tecnológico do concreto e prejudicar sua qualidade [26]. Concreto feito com 100% de agregados reciclados tem de 20 a 25% menos resistência à compressão do que o concreto convencional aos 28 dias de cura, com a mesma razão água/cimento e quantidade de cimento (325 kg de cimento/m³). Estes agregados reciclados devem ser utilizados em concretos com resistência à compressão média-baixa (20-45 MPa). No caso do concreto com agregado reciclado a falha não acontece sobre a nova zona de transição, mas sim através da argamassa aderida ao agregado reciclado [29].

Tabela 8: Estudo da absorção de água em agregado convencionais e reciclados [26].

Agregados convencionais.	
Dimensões das partículas (mm)	Absorção de água. (%)
4 - 8	3,7
16 - 32	0,8
Agregados reciclados de concreto.	
Dimensões das partículas (mm)	Absorção de água. (%)
4 - 8	8,7
16 - 32	3,7
< 5	11
5 - 25	7

A Figura 7 A, apresenta uma imagem de um agregado reciclado obtida por meio da análise de fluorescência feita de uma seção fina, e a Figura 7 B, apresenta uma imagem de uma falha gerada por tração em um concreto formado com agregado reciclado [29].

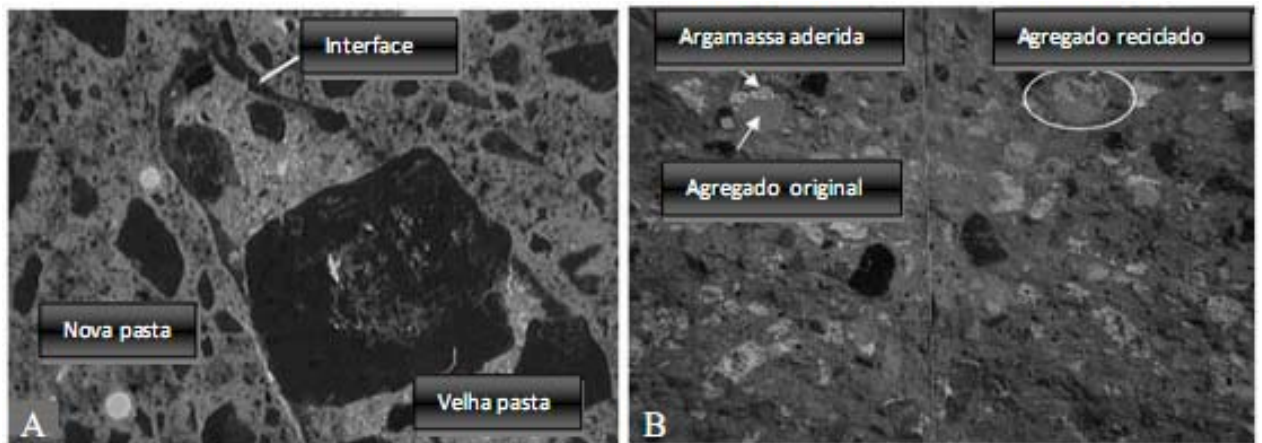


Figura 7: Em A, uma imagem de um agregado reciclado obtida por meio da análise de fluorescência feita de uma seção fina, e em B, é apresentado uma imagem de uma falha gerada por tração em um concreto formado com agregado reciclado [29].

É possível notar na imagem 7 B, que a falha ocorreu através do agregado reciclado. Os concretos constituídos de agregados naturais tendem a apresentar mais baixas propriedades mecânicas em relação a concretos obtidos a partir de agregados naturais, desta forma a aplicação de agregados reciclados na fabricação de componentes estruturais torna-se limitada [26, 30, 31]. Assim o RCD reciclado vem sendo usado como material de enchimento, para preparação de aterros, para projetos de drenagem e para sub-base de vias e estradas [14].

4-CIMENTO PORTLAND DESDE A MATÉRIA PRIMA ATÉ APLICAÇÃO

A fabricação do cimento Portland envolve um conjunto de operações que podem ser resumidas de uma forma geral nas seguintes etapas: moagem, dosagem da mistura crua, homogeneização da mistura crua, formação do clínquer, resfriamento e adições finais. A moagem consiste da preparação da mistura crua por meio do tratamento da matéria-prima (calcário e argila) nos britadores e moinhos de bola, para que seja reduzida à granulação média de 50 μm . A dosagem da mistura crua consiste no controle químico dos elementos presentes para a obtenção de um cimento Portland de composição desejada. A etapa de homogeneização permite que na clinquerização ocorra uma perfeita combinação dos elementos formadores de clínquer. A formação do clínquer consiste do aquecimento controlado da mistura crua, devidamente dosada e homogeneizada, em forno apropriado até temperaturas de aproximadamente 1450 a 1500 $^{\circ}\text{C}$ [32, 33]. A Tabela 9 apresenta as faixas de

temperaturas de obtenção dos compostos do clínquer [34]. No processo de formação dos minerais de clínquer, constituinte básico do cimento Portland, há uma série de reações químicas de natureza endotérmica e exotérmica. O clínquer sai do forno a uma temperatura aproximada de 1200°C e sofre um tratamento no resfriador industrial, para reduzir rapidamente a sua temperatura para valores entre 50 e 70°C. O clínquer resfriado é transportado para a moagem final para atingir um índice de finura conveniente, onde é também acrescido de certa quantidade de adições, tais como escórias minerais, pozolanas, sílica ativa, material de enchimento, dando origem aos diferentes tipos de cimentos Portland existentes no mercado. O gesso normalmente é utilizado para regular o tempo inicial de pega do cimento [32, 33].

Tabela 9: Temperatura de reação dos compostos do clínquer [34].

Acima de 800°C	Início do processo de calcinação do CaCO ₃ .
Entre 800°C e 1200°C	Formação de silicado de dicálcio (C ₂ S).
Entre 1095°C e 1205°C	Formação de aluminato de tricálcio (C ₃ A) e ferroaluminato de tetracálcio (C ₄ AF).
Entre 1260°C e 1455°C	Formação de silicato de tricálcio (C ₃ S) a partir do C ₂ S com quase extinção da cal Livre (CaO).
Entre 1455°C e 1300°C	Cristalização da fase líquida do C ₃ A e C ₄ AF. Os silicatos C ₂ S e C ₃ S praticamente não sofrem modificações tanto na forma como na composição.

Da matéria prima utilizada na fabricação do cimento interessa-se extrair o CaO do CaCO₃ por meio da calcinação deste, e da argila extrai-se: SiO₂, Al₂O₃ e o Fe₂O₃ [33]. No estado sólido, as reações se dão por meio de difusões iônicas. Estas difusões são aceleradas com o aparecimento de uma fase líquida, localizada na interface dos grãos e que começa a se formar à temperatura próxima de 1300°C. A velocidade de difusão e, conseqüentemente, a capacidade de clinquerização estão relacionadas à quantidade e à viscosidade da fase líquida.

À temperatura de clinquerização (acima de 1300°C), parte do material é constituído por uma fase líquida. A relação de equilíbrio entre essa fase líquida e a fase sólida pode ser estudada com auxílio de diagramas de equilíbrio envolvendo CaO, SiO₂, Al₂O₃ e o Fe₂O₃. Tais diagramas não consideram o efeito de soluções

sólidas diluídas no sistema de impurezas, que provocam modificações nos sistemas e cujos efeitos na estabilidade e crescimento dos minerais pouco se conhecem [32].

A Tabela 10 apresenta as reações químicas que ocorrem durante o tratamento térmico e seus respectivos calores de reação. É possível notar que, a maior parte das reações químicas envolve liberação de calor [34]. A mineralogia do clínquer Portland é muito complexa, apesar de estar formado por basicamente quatro fases conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 10: Reações químicas e calores de reação envolvidos no processo [26].

Reações químicas	Calor de reação a 20°C	Reação
$\text{CaCO}_{3(s)} \rightarrow \text{CaO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$	+ 1766 kJ/kg	Endotérmica
$\text{MgCO}_{3(s)} \rightarrow \text{MgO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$	+ 1188 kJ/kg	Endotérmica
$2\text{CaO}_{(s)} + \text{SiO}_{2(s)} \rightarrow 2\text{CaO}.\text{SiO}_{2(s)} (\beta.\text{C}_2\text{S})$	- 717 kJ/kg	Exotérmica
$3\text{CaO}_{(s)} + \text{SiO}_{2(s)} \rightarrow 3\text{CaO}.\text{SiO}_{2(s)} (\text{C}_3\text{S})$	- 528 kJ/kg	Exotérmica
$\text{CaO}_{(s)} + 7\text{Al}_2\text{O}_{3(s)} \rightarrow \text{CaO}.7\text{Al}_2\text{O}_{3(s)} (\text{CA}_7)$	- 309 kJ/kg	Exotérmica
$12\text{CaO}_{(s)} + 7\text{Al}_2\text{O}_{3(s)} \rightarrow 12\text{CaO}.7\text{Al}_2\text{O}_{3(s)} (\text{C}_{12}\text{A}_7)$	- 169 kJ/kg	Exotérmica
$3\text{CaO}_{(s)} + \text{Al}_2\text{O}_{3(s)} \rightarrow 3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_{3(s)} (\text{C}_3\text{A})$	- 15 kJ/kg	Exotérmica
$4\text{CaO}_{(s)} + \text{Al}_2\text{O}_{3(s)} + \text{Fe}_2\text{O}_{3(s)} \rightarrow 4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)} (\text{C}_4\text{AF})$	- 84 kJ/kg	Exotérmica

A composição e a cristalização dessas fases variam com diversos fatores, tais como a composição química e mineralógica das matérias-primas, as características do tratamento térmico imposto, a finura destas matérias primas, as reações de difusão entre as fases, além das transformações polimórficas que podem ocorrer e da cristalização metaestável de alguns compostos [35]. Os elementos presentes em menores proporções (Mg, Na, K, S, etc.) têm influência importante sobre as características do produto final, formando soluções sólidas com as fases principais [36]. A Tabela 12 apresenta as faixas de composição química do clínquer de cimento Portland [32]. O silicato tricálcico é o principal constituinte do clínquer, sua fórmula

pura é Ca_3SiO_5 , mas sua composição e estrutura podem mudar um pouco com a presença de íons Mg^{+2} , Al^{+3} e Fe^{+3} . Seus grãos são equidimensionais e incolores. O C_3S pode se apresentar em três tipos de estruturas: monoclinica, triclinica e romboédrica. Reage relativamente rápido com a água sendo sua velocidade de hidratação controlada pela velocidade de difusão dos íons através das camadas subjacentes do produto hidratado. Libera grande quantidade de hidróxido de cálcio e possui alto calor de hidratação, cerca de 120 cal/g. É o principal componente para o desenvolvimento da resistência a curto prazo, principalmente aos 28 dias.

Tabela 11: Faixas de composição mineralógica do clínquer de cimento Portland [35].

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura	%no clínquer
Silicato Tricálcico (Alita)	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	50 - 65
Silicato Dicálcico (Belita)	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	15 - 25
Aluminato Tricálcico (Celita)	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 - 10
Ferroaluminato Tetracálcico (Brownmillerita ou Ferrita)	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	3 - 8
Cal Livre	CaO	C	0,5 - 1,5

O silicato dicálcico possui a fórmula Ca_2SiO_4 , e puro contém 34,9% de SiO_2 e 65,1% de CaO , mas sua composição e estrutura também podem mudar um pouco com a presença de alguns íons. Ao contrário do C_3S , o C_2S apresenta estruturas nitidamente diferentes, podendo-se, portanto, prever propriedades hidráulicas diferentes. O termo genérico belita, comum em clínqueres comerciais, corresponde a um $\beta\text{-C}_2\text{S}$ de retículo ligeiramente modificado pela adição de íons estranhos em forma de soluções sólidas. Reage lentamente com a água porque tem uma estrutura mais regular, ou seja, mais estável que o C_3S . O silicato hidratado da reação do C_2S com água tem uma relação cal/sílica em torno de 1,65. Em comparação à alita libera menor quantidade de calor por ocasião da hidratação [32].

A fórmula do aluminato tricálcico é $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, entretanto sua composição e estrutura podem mudar um pouco na presença de íons Si^{+4} , Na^+ , K^+ e Fe^{+3} . Na sua forma pura contém 62,3% de CaO e 37,7% de Al_2O_3 . O C_3A industrial pode apresentar-se sob três formas: cúbica, ortorrômbica e tetragonal. A forma monoclinica também pode ser encontrada, mas não no clínquer do cimento Portland.

Duas formas sempre podem coexistir e existem diferenças de reatividade entre as três formas: a forma cúbica hidrata-se mais rapidamente que as duas outras formas, que são semelhantes. Ele reage rapidamente com a água e libera uma grande quantidade de calor de hidratação, em torno de 270 cal/g. É o principal responsável pela rapidez da pega, quando presente na forma cristalina.

O ferroaluminato tetracálcico ou brownmillerita (C_4AF) constitui de 3 a 8% do clínquer do cimento Portland. Na sua forma pura, contém 46,1% de CaO, 21,0% de Al_2O_3 e 32,9% de Fe_2O_3 . Sua fórmula é Ca_2AlFeO_5 , mas pode mudar por causa da variação da relação Al/Fe e pela incorporação de alguns íons. É encontrado na forma monoclinica, tetraédrica ou octaédrica. Apresenta valor hidráulico baixo e tem pequena participação na resistência aos esforços mecânicos do cimento. Sua propriedade principal é o aumento da resistência à corrosão. O C_4AF é responsável, também pela coloração cinzenta do clínquer [32]. A Figura 8 ilustra a natureza heterogênea de uma partícula não hidratada de cimento Portland [37].

Tabela 12: Composição química do clínquer de cimento Portland [32].

	Fórmula	Abreviação	Composição (%)
Óxido de Cálcio	CaO	C	59 - 67
Sílica	SiO_2	S	16 - 26
Alumina	Al_2O_3	A	4 - 8
Hematita	Fe_2O_3	F	2 - 5
Magnésia	MgO	M	0,8 - 6,5
Óxido de Sódio	Na_2O	N	0 - 1,5
Óxido de Potássio	K_2O	K	0 - 1,5
Trióxido de enxofre	SO_3	\bar{S}	0,5 - 1,2

O cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI fornecido pela empresa Holcim Brasil, apresenta em sua composição química valores próximos a 19,19% de SiO_2 , 5,15% de Al_2O_3 , 2,80% de Fe_2O_3 , 63,33% de CaO, 0,92% de MgO, 2,82% de SO_3 , 0,77% de K_2O , 2,78% de CO_2 e 3,97% na análise por perda ao fogo. Na Tabela 13 encontram-se os diversos tipos de cimentos brasileiros e as normas que os especificam [31].

No Brasil assim como na maioria dos países com produção de cimento significativa, são fabricados diversos tipos de cimento, por meio das adições e

aditivos utilizados no clínquer, que correspondem à maior ou menor expressão das propriedades de seus principais componentes, e resultam no desenvolvimento de várias características mecânicas, físicas e químicas. Um dos requisitos exigidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por exemplo, é que o cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI, seja composto de 95-100% de gesso e clínquer, e de 0-5% de carbonato de cálcio.

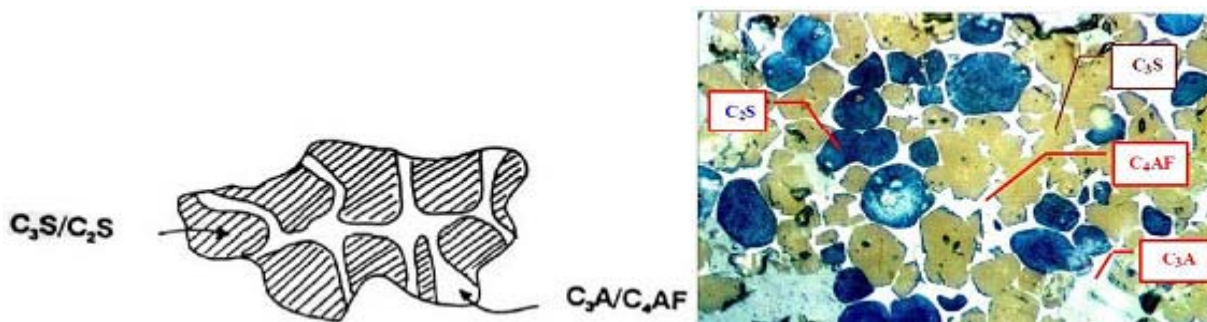


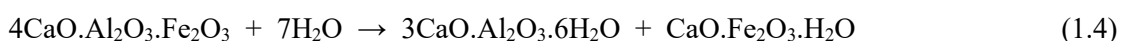
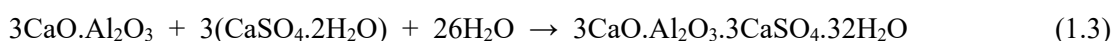
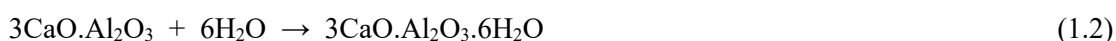
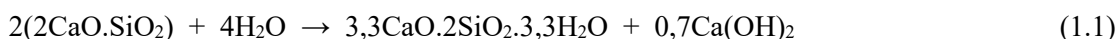
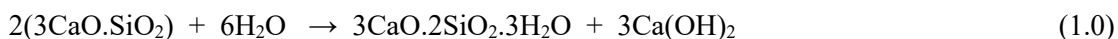
Figura 8: Ilustração da natureza heterogênea de um grão de cimento: à esquerda sob a forma esquemática e à direita através de uma imagem obtida por micrografia óptica do clínquer do cimento Portland (não hidratado) [37].

Tabela 13: Diversos tipos de cimentos e as normas que os especificam [31].

Designações	Classes	Norma ABNT
Cimento Portland Comum	CP-I 25, CP-I 32, CP-I 40	5732
Cimento Portland Comum (Com adições)	CP-I 25-S 25, CP-I 32-S 32, CP-I 40-S 40	5732
Cimento Portland Composto (Com escórias)	CP-II 25-E 25, CP-II 32-E 32 CP-II 40-E 40	11578
Cimento Portland Pozolânico	CP-I V 25-S 25, CP-IV 32-S 32	5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	5733

O termo hidratação refere-se às reações do cimento com a água que ocorrem com o transcorrer do tempo, dando origem a uma matriz firme e resistente. O mecanismo de hidratação inicialmente envolve processos de dissolução e precipitação. Primeiro, a dissolução dos compostos anidros em componentes iônicos e a precipitação dos hidratos devido a baixa solubilidade. Esse processo é dominante nos estágios iniciais, devido à disponibilidade de espaço na pasta. Num estágio

avançado, tem-se o processo topoquímico ou hidratação do estado sólido, em que a hidratação ocorre na superfície do grão anidro, ocorrendo uma redução progressiva do tamanho do grão [32]. A reação de hidratação é na realidade, a composição de diversas reações de hidratação, estas podem ser representadas, esquematicamente sob a forma das seguintes equações [38-42]:



A hidratação dos aluminatos é imediata, porém no cimento Portland devido à presença de gipsita esta reação é mais lenta. Os produtos de hidratação formados pelo C₃A e o C₄AF são semelhantes [32]. Durante a hidratação, o sulfato de cálcio combina-se rapidamente com os aluminatos formando uma camada que pode se apresentar em forma de pequenas agulhas, chamadas de etringita, ilustrada na Figura 9 A. Esta camada protege a fase anidra da ação direta da água. Desta forma, a quantidade de hidratos de C₃A na fase inicial é muito menor [32].

No início da reação a formação de etringita é muito rápida, porém a sua taxa diminui à medida que a fração restante de C₃A e de C₄AF vai sendo revestida pelo produto formado. Não há formação de hidratos de C₃A e de C₄AF enquanto existir sulfato de cálcio não reagido na fase líquida. Portanto, ao adicionar-se um excesso de sulfato de cálcio, comparado com a quantidade de C₃A e de C₄AF, a etringita continuará sendo formada e a formação de hidratos do C₃A e do C₄AF não ocorrerá. A formação de etringita termina quando não há mais íons sulfato (SO₄²⁻) na fase líquida, pelo fato de o sulfato de cálcio já ter sido consumido. Desta forma, o desaparecimento dos íons SO₄²⁻ da fase líquida define a instabilidade da etringita e o conseqüente colapso da camada de agulhas, descobrindo partes não reagidas. Os

elementos dissolvidos a partir da desintegração da etringita reagem com os íons restantes de C_3A e de C_4AF não reagidos e com a água livre, convertendo-se então em monossulfoaluminato de cálcio [$C_4(A,F)\bar{S}H_{12}$], ilustrado na Figura 9 B [38-42]. As reações de hidratação dos dois silicatos de cálcio que compõem a maior percentagem do cimento Portland são muito semelhantes, diferindo apenas na taxa de reação, sendo menor para o C_2S em relação ao C_3S . Pode-se então considerar que a hidratação do C_3S domina o processo exotérmico de hidratação. Simplificadamente, o silicato tricálcico (C_3S) ao reagir com a água forma portlandita [$Ca(OH)_2$] sendo que uma parte fica em solução e outra se cristaliza [38-43]. A morfologia dos cristais de portlandita muda durante o curso da hidratação, e é essencial aos vários reagentes adicionados. As partículas de CH nas primeiras idades aparecem como placas hexagonais finas, muitas vezes com dezenas de micrometros de espessura como podem ser notadas na Figura 10. Após esta formação inicial, os depósitos de hidróxido de cálcio crescem massivamente perdendo seu contorno hexagonal, e invadem e encapsulam outras regiões da pasta contendo gel e outros constituintes [43].

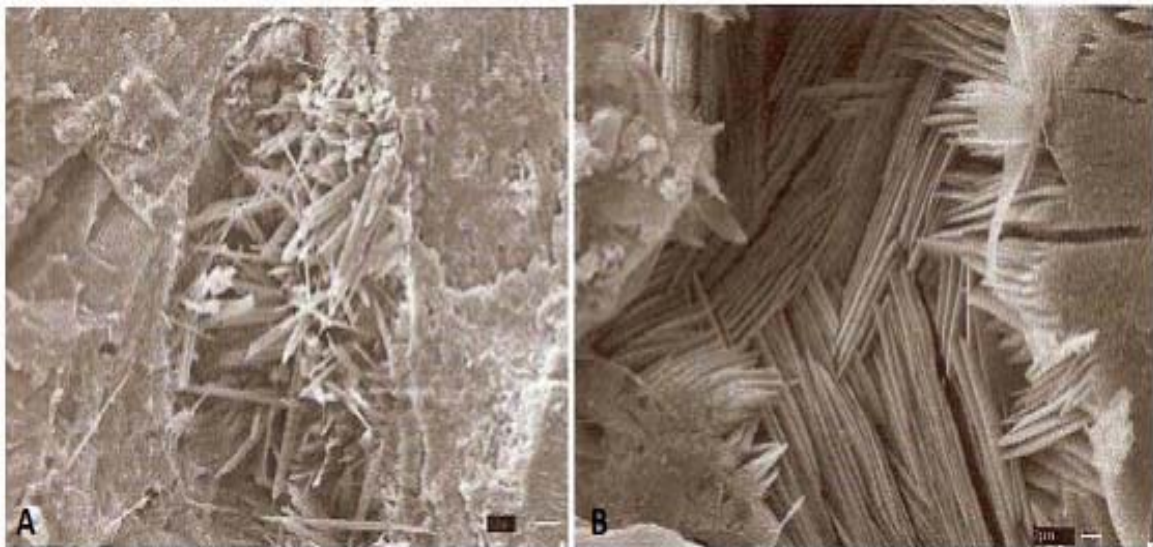


Figura 9: Produtos de hidratação do cimento. A) Cristais de etringita; B) Cristais de monossulfato de cálcio [32].



Figura 10: Cristais de hidróxido de cálcio (portlandita) formados na hidratação do cimento Portland [43].

De uma forma geral, a hidratação do C_3S ocorre em três partes simultâneas: a dissolução do C_3S , com libertação de íons Ca^{2+} , OH^- e $H_2SiO_4^{2-}$; a precipitação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H); e a precipitação do hidróxido de cálcio (CH). A dissolução ocorre desde o contato da água com o silicato tricálcico. O silicato bicálcico ao reagir com a água, também forma hidróxido de cálcio, embora em menor quantidade (cerca de 1/3 do CH formado pelo C_3S), e transforma-se num outro silicato de cálcio hidratado, no qual a relação entre o óxido de cálcio e a sílica é maior (em tono de 1,65) do que no anterior (em tono de 1,50) [38-43].

O termo “fase C-S-H”, se refere ao silicato de cálcio amorfo ou semi-cristalino, que tem fórmula geral $CaO_x \cdot SiO_2 \cdot H_2O_y$, onde x e y pode apresentar diferentes valores. Durante a formação do C-S-H no período de cura, ocorre a polimerização gradual de ortosilicatos (SiO_4^{4-}) denominados Q^0 , formando num primeiro momento dímeros pela combinação de dois ânions SiO_4^{4-} (Q^1), e com o decorrer do tempo são formadas cadeias contendo de três ânions (Q^2) com redução de Q^1 . Posteriormente estas se tornam longas cadeias, formadas principalmente pentâmeros ($Si_5O_{16}^{12-}$), seguido por octâmeros ($Si_8O_{25}^{18-}$). A Equação 1.5, representa o comportamento destes silicatos durante a hidratação.



O mecanismo de hidratação pode ser dividido em cinco etapas [38-42, 44]:

- Estágio inicial I
- Período de indução II
- Período de aceleração III
- Período de desaceleração IV

- Estágio final V

Através da termodinâmica das reações químicas de hidratação é possível verificar cada uma dessas etapas, associando-as ao calor de hidratação do cimento Portland.

Estágio inicial (I): o pico inicial apresentado no gráfico faz referência à liberação de calor ocorrida durante a molhagem das partículas. Neste estágio ocorre a dissolução dos sulfatos alcalinos com liberação dos íons Na^+ , K^+ e SO_4^{2-} , e a dissolução do sulfato de cálcio com liberação dos íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} até o ponto de saturação. A hidratação do sulfato de cálcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) para dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), também contribui para a ocorrência do primeiro pico da liberação de calor.

Neste estágio inicia-se a dissolução das fases anidras C_3S , C_3A e C_4AF dando origem a uma camada de gel de C-S-H, que reveste a superfície dos grãos anidros do clínquer. Os íons liberados por C_3A e C_4AF reagem com os íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} dando origem a um gel amorfo rico em aluminato, sobre a superfície dos grãos de clínquer.

Período de indução (II): Uma camada de gel se deposita sobre os grãos anidros do cimento, e forma uma espécie de barreira entre as fases anidras e a solução aquosa. Este gel amorfo e coloidal é originado a partir da precipitação inicial da etringita, e em menor escala de C-S-H, sendo rico em sílica com presença dos íons cálcio e sulfato. Este período, que também é denominado de dormência, tem duração aproximada entre 30 minutos e 3 horas, que se finalizam quando a camada de gel depositada sobre os grãos de clínquer é destruída ou se torna mais permeável à difusão iônica [44].

Este período é caracterizado pela baixa taxa de evolução de calor, embora continuem a crescer as concentrações dos íons Ca^{2+} e OH^- . O tempo necessário para atingir o tempo de supersaturação depende fortemente da relação água cimento e do tamanho do cristal de C_3S .

Período de aceleração (III): Predomina o mecanismo de dissolução-precipitação, com consequente supersaturação iônica da fase aquosa e rápida formação de C-S-H. Os principais produtos formados são C-S-H e $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Correspondem à reação do estágio III, que resulta em um declínio da concentração de Ca^{2+} na solução. Este período finaliza quando o início diminuição na taxa de liberação de calor no sistema é alcançado [44].

O fenômeno da pega se dá no decorrer do período de aceleração em que os silicatos, sobretudo a alita (C_3S), passam a se hidratar rapidamente até atingir a taxa máxima de hidratação ao final deste período, que corresponde ao máximo calor liberado. A taxa de hidratação deste período é controlada pela formação do C-S-H. Durante o período de aceleração, a taxa e a extensão da hidratação são dependentes da área específica do clínquer [44].

Período de desaceleração (IV): Tem início com diminuição gradual da taxa da evolução do calor, dado à redução gradual na concentração de íons em solução, em decorrência da precipitação de hidratos que recobrem as partículas do cimento, dificultando a solubilização das fases anidras. Após o período aproximado de 24 h tem-se continuidade das reações lentas que dão origem também a C-S-H e CH.

O mecanismo de reação passa a ser controlado por reação topoquímica. Alguns tipos de cimentos, contendo mais que 12% de C_3A exibem um ombro característico na curva de calor de hidratação em aproximadamente 16 h, que está associado a uma nova formação de etringita [44].

Estágio final (V): Com o crescimento dos produtos de hidratação são preenchidos gradativamente os espaços, ocupados inicialmente pelo excesso de água de mistura, com densificação da pasta, e as reações de hidratação prosseguem [44].

As reações de hidratação do cimento Portland influenciam a resistência mecânica e durabilidade do cimento endurecido, e são por sua vez, influenciadas por vários fatores tais como o tipo de cimento Portland, o índice de finura do cimento, a distribuição de tamanho de partícula, presença de adições e aditivos, a razão água/cimento e as condições de cura [45]. A Figura 11 apresenta o desenvolvimento da hidratação dos componentes principais do cimento Portland em função do tempo.

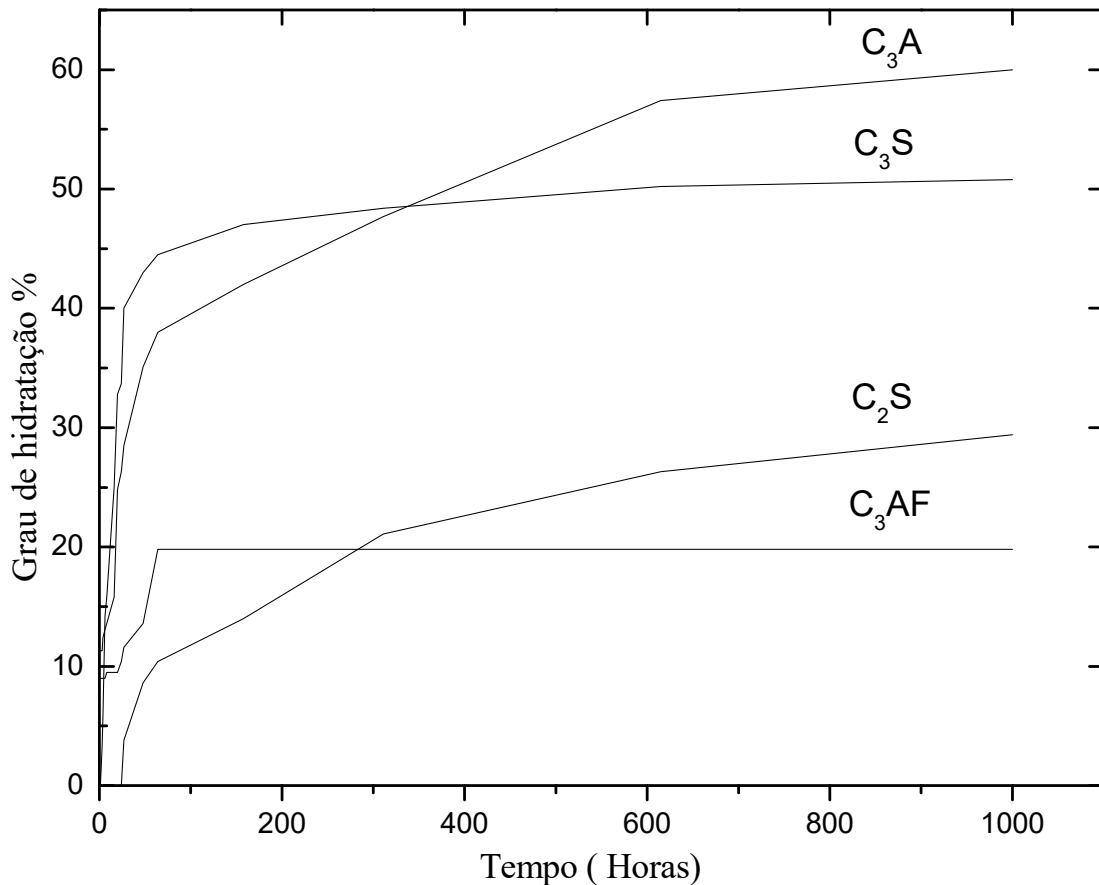


Figura 11: Desenvolvimento da hidratação dos componentes principais do cimento Portland.

A quantidade e a taxa de calor fornecida a um sistema cimentício pela hidratação dos aglomerantes depende da quantidade de clínquer, de adições, da composição, da finura do cimento e da temperatura do sistema cimentício durante a hidratação [46]. Além disso, durante a hidratação a temperatura monitorada neste sistema é afetada pela quantidade de calor perdido ou armazenado, que também é governada pela geometria do sistema cimentício e pelas condições ambientais de exposição. A Tabela 14 apresenta o calor de hidratação de cimentos no Brasil [47].

A quantidade total de calor liberado e as taxas de liberação de calor durante a hidratação dos compostos individuais podem ser usadas como índices de sua reatividade. Os dados dos estudos de calor de hidratação podem ser usados para caracterizar o comportamento de pega e endurecimento do cimento [48, 49]. A Tabela 15 apresenta a participação dos constituintes do cimento na liberação de calor [50]. Existem três principais técnicas para estudar o calor de hidratação, envolvendo primeiro a determinação do calor de dissolução, segundo a calorimetria semi-adiabática e terceiro a calorimetria isotérmica ou de condução. A primeira técnica mede o calor de solução do cimento hidratado de determinada idade e do

cimento não hidratado, ambas em uma mistura de ácido nítrico com ácido fluorídrico. A diferença entre as duas determinações, é igual ao calor de hidratação do cimento na idade estudada. A eficiência desta técnica é colocada em questão, pois não fornece informações confiáveis no caso de cimentos com adição [49].

Tabela 14: Calor de hidratação de cimentos no Brasil [47].

Calor de hidratação (J/g)				
Tipo de cimento	3 dias		7 dias	
	Min	Max	Min	Max
CP-III	205	270	235	305
CP-IV	210	325	240	330
CP-II	220	340	260	370
CP-V	250	370	350	380
CP-I	Não disponível			

Tabela 15: Participação dos constituintes do cimento na liberação de calor [50].

Constituintes mineralógicos do Cimento	Participação de cada constituinte na liberação de calor. (Cal/g)		
	3 dias	7 dias	28 dias
$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	0,98	1,10	1,14
$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	0,19	0,28	0,44
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	1,70	1,88	2,02
$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,29	0,43	0,48

Na calorimetria semi-adiabática também conhecida como de Langavant, a amostra é colocada no interior de um calorímetro isolado, calibrado e mantido em ambiente climatizado. As temperaturas são registradas conforme se tem a evolução da hidratação [48].

A calorimetria isotérmica consiste na determinação do fluxo de calor durante as reações de hidratação. O calorímetro contendo a amostra é colocado em um banho termostatizado, e uma célula de condução permite que o calor liberado flua para fora do calorímetro, dessa forma mede-se a diferença de calor inicial e final.

Dentre as técnicas citadas, vários estudos apontam a utilização do método semi-adiabático como um método eficiente no estudo do calor de hidratação do cimento Portland [49, 51].

Os aditivos superplastificantes são polímeros orgânicos solúveis em água, obtidos como subprodutos da indústria ou sinteticamente por polimerização [52, 53]. Estes podem possuir grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarboneto, formando longas moléculas que envolvem as partículas de cimento gerando dispersão [54, 55]. Assim partículas de cimento com cargas opostas, que tendem a atrair-se, podem se repelir levando à redução de água necessária para dar fluidez à mistura. Os aditivos superplastificantes a base de policarboxilato, são os aditivos mais recentemente utilizados na obtenção do concreto disponíveis no mercado desde 1990. Eles são também conhecidos como aditivos superplastificantes de alta eficiência ou ainda como aditivos hiperplastificantes, pois permitem uma redução de água das misturas em até 40% mantendo a mesma trabalhabilidade. Os aditivos base policarboxilato conferem considerável aumento na fluidez dos concretos, o que permite a utilização em concretos fluídos e auto-adensáveis e na redução da quantidade de água. A Figura 12 apresenta a representação de um monômero presente em um polímero, de um superplastificante a base de policarboxilato [56].

Esses aditivos poliméricos apresentam larga distribuição de massa molecular e sua caracterização química é muito complexa, assim como seus processos de produção. As propriedades desses aditivos são influenciadas, principalmente pelo comprimento de sua cadeia [56]. A estrutura desses polímeros é formada geralmente por grupos carboxílicos (COOH), e apresenta cadeias laterais de diferentes comprimentos. Para o controle da eficiência sabe-se que a dispersão das partículas de cimento pode ser controlada, por meio da mudança do comprimento dessas cadeias e pela mudança das cadeias centrais. Quanto maior o tamanho da cadeia desse aditivo e quanto maior a quantidade de grupos carboxílicos presentes nos polímeros, maior a fluidez do sistema para uma mesma dosagem de aditivo.

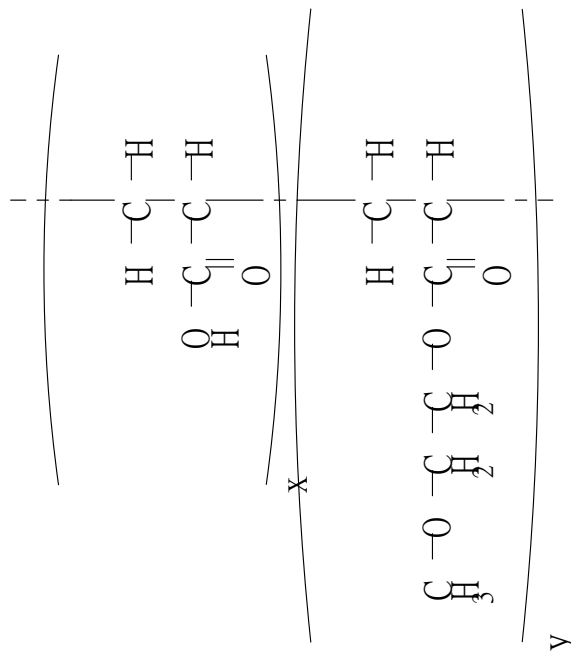


Figura 12: Representação de um monômero presente em um polímero de um superplastificante a base de policarboxilato.

Ao entrar em contato com a água as partículas de cimento tendem à floculação, resultado de diversos tipos de interações tais como a ação das forças de Van der Waals entre as partículas. Certa quantidade de água fica aprisionada entre os grãos de cimento, reduzindo a água disponível e a lubrificação. Tais fenômenos aumentam a viscosidade e reduzem a área específica dos grãos de cimento disponíveis para a hidratação [57, 58, 59]. Os aditivos a base de policarboxilato agem quando adsorvidos nas partículas de cimento, provocando repulsão estérica que resulta na dissociação do cimento aglomerado em partículas, com grande redução da viscosidade do sistema cimento-água-aditivo. As adições minerais são produtos não orgânicos geralmente subprodutos industriais finamente moídos adicionados ao concreto durante o processo de mistura, para proporcionar certas propriedades ao concreto fresco ou endurecido. Geralmente são utilizadas pequenas quantidades, cerca de 10% da massa do cimento utilizada. Uma das reações das adições é a reação química conhecida como reação pozolânica. Esta reação ocorre quando a adição mineral é introduzida no concreto fresco, reagindo com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, e produzindo uma quantidade adicional de C-S-H, fonte de resistência do concreto [56].

As adições minerais utilizadas na produção do concreto de alto desempenho são compostas por pozolanas em estado natural ou artificial, subprodutos de fornos de

usinas termelétricas ou de indústrias metalúrgicas. Na limitada variedade destes materiais disponíveis no mercado, utiliza-se a sílica ativa e o metacaulim.

A sílica ativa é um subproduto das usinas que produzem o ferro silício, o silício metálico ou outros tipos de liga com silício em sua composição, ou seja, é um subproduto de fornos a arco de indução das indústrias de silício metálico e ligas de ferro-silício. Trata-se de um material muito fino com área específica da ordem de 20.000 m²/kg. A sílica pode ser adicionada no concreto como um material que faz uma substituição parcial do cimento ou como material cimentante adicional, mantendo-se a quantidade de cimento. A hidratação do C₃S é responsável pelas primeiras características de solidificação de uma mistura de cimento. A presença de sílica ativa provoca uma aceleração da hidratação de C₃S. Quanto mais fina a sílica ativa e quanto mais sílica for acrescida à mistura, mais rápida será a hidratação do C₃S e mais calor será liberado durante a hidratação. Do ponto de vista microscópico devido à grande diferença nas superfícies específicas entre a sílica e o cimento Portland, o grão de C₃S fica envolvido por uma grande quantidade de partículas de sílica formando uma camada ao redor destes. Após o contato com a água, os íons Ca⁺⁺ e OH⁻ gerados durante a dissolução do C₃S, precisam penetrar através desta camada de sílica ao redor dos mesmos, durante esta passagem estes íons reagem com a sílica e formam C-S-H [56]. O metacaulim ainda é um material novo na construção civil brasileira, embora o número de trabalhos científicos que tratam do seu uso na produção de concretos tenha sido muito grande. O metacaulim de alta reatividade disponível no mercado brasileiro tem mostrado propriedades pozolânicas similares à sílica ativa. O metacaulim reage com Ca(OH)₂ presente na pasta de cimento e forma o C-S-H. As pozolanas do tipo do metacaulim são adequadas a normas ASTM C 618 *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete* (ASTM, 2005) e NBR 12653 (ABNT, 1992). Mesmo não se tendo uma norma específica referente ao metacaulim, acredita-se que os padrões definidos nestas normas se apliquem parcialmente a esta pozolana [56].

A Tabela 16 apresenta a composição típica do metacaulim. Esta pozolana de alta reatividade é a única que não é caracterizada pelo alto teor de sílica, tendo geralmente proporções semelhantes de SiO₂ e Al₂O₃ em massa. A reatividade do metacaulim está relacionada ao caráter amorfo do dióxido de silício presente em sua composição química [56].

Tabela 16: Composição típica do matacaulim de alta reatividade [56].

Componente Químico	Porcentagem em massa (%)
SiO ₂	51,52
Al ₂ O ₃	40,18
Fe ₂ O ₃	1,23
CaO	2,0
MgO	0,12
Alcalis	0,53
Perda ao fogo	2,01

5-RECICLAGEM DA PASTA DE CIMENTO PORTLAND

Uma vez que os concretos constituídos de agregados reciclados tendem a apresentar mais baixas propriedades mecânicas em relação a concretos obtidos a partir de agregados naturais, tendo sua aplicação limitada [60-67], muitos esforços tem se voltado para o estudo da reciclagem da pasta de cimento hidratada (PCH) [9].

Resultados de investigações experimentais realizados por Farage et al. [68], sobre amostras de PCH após o aquecimento a temperaturas no intervalo de 80 a 300°C revelaram que, a porosidade aumenta e as propriedades mecânicas diminuem ligeiramente. Os resultados desta investigação também mostraram que as amostras de PCH tratadas a 300°C, sofrem uma considerável desidratação de C-S-H, confirmando certo grau de reversibilidade da reação química envolvida. As alterações na microestrutura e propriedades mecânicas de uma pasta de cimento endurecida, submetida a diferentes temperaturas até 500°C, já foram observadas por Yu Fang et al. [69]. Os resultados mostraram que a lesão térmica da pasta de cimento endurecida não foi devida apenas à decomposição térmica de hidratos, mas também pela desidratação induzida por fissuras. Em uma pesquisa realizada por Matthew et al. [70], foi possível constatar que nanopartículas de C-S-H de baixa e de alta densidade sofrem alterações da densidade de empacotamento a temperaturas próxima a 200°C, este fato está relacionado a reação de desidratação do gel tobermorita. Em outro trabalho Shui et al. [71], estudaram a capacidade de reidratação do pó de cimento desidratado (PCD). Várias amostras de PCD foram primeiramente preparadas via tratamento térmico da PCH a diferentes temperaturas

entre 300 e 900 °C. Os resultados mostraram que a capacidade de reidratação de PCH é influenciada pela temperatura de desidratação.

A fim de estudar as alterações da microestrutura a alta temperatura Zhang et al. [72], aqueceram amostras de PCH a temperaturas variadas entre 100 e 1000 °C com uma taxa de aquecimento de 5 °C/min, sendo resfriadas após o tratamento térmico naturalmente até a temperatura ambiente. Através da análise dos resultados obtidos a partir de análise térmica e análise de microestrutura, descobriu-se que o C-S-H e portlandita foram desidratados quando a temperatura chegou a 1000 °C.

Xuan et al. [73], estudaram a influência da temperatura de desidratação e a relação água/cimento inicial sobre a atividade de reidratação do PCD. No estudo, amostras de PCH foram preparadas com razões água/cimento de 0,3 e 0,5, e curadas sob a névoa de pulverização durante 30 dias. Os PCD utilizados foram obtidos por trituração de PCH seco, e submetidos a diferentes temperaturas até 900 °C. Os resultados experimentais mostraram que a reidratação do PCD, depende fortemente da temperatura de desidratação e da razão água/cimento utilizado na preparação da PCH.

Peng et al. [74], prepararam amostras de PCH em forma de pellets e submeteram estas a 90 dias de cura em água, em seguida estas foram tratadas a diferentes temperaturas durante 8 horas. O difratograma obtido por difração de raios X da amostra tratada a 400 °C apresentou picos que podem ser atribuídos a fases cristalinas de carbonato de cálcio e CH. O estudo do difratograma da amostra obtida a 800 °C revelou que o C-S-H se decompõe em silicatos anidros. Em outro trabalho realizado por Castellote et al. [75], amostras de PCH em formas de bloco e de pó, foram preparadas com diferentes tipos de cimentos contendo diferentes porcentagens de $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, em seguida foram tratadas termicamente. A ATG da amostra preparada em forma de bloco com cimento-A contendo mais que 9% de C_3A apresentou cerca de 7% de perda de massa, já a ATG da amostra preparada em forma de bloco com cimento-B contendo menos que 1% de C_3A apresentou cerca de 14% de perda de massa. A amostra preparada em forma de pó com cimento-A também foi submetida a ATG, e apresentou cerca de 12% de massa perdida. O estudo mostrou que, o tipo de cimento e o estado da amostra tem influência no processo de desidratação da pasta de cimento hidratada.

Shui et al. [76], prepararam amostras de PCH com razão água/cimento 0,4 e curadas a 28 dias. Em seguida as amostras de PCH foram tratadas termicamente a várias temperaturas até 800 °C, os difratogramas das amostras de PCD obtidas a 500 °C apresentaram picos relacionados a fases hidratadas do cimento. Já nos estudos realizado por Geraldo et al. [77], não foi possível detectar a presença de picos relacionados a fases de hidratos de cimento no difratograma da amostra de PCD obtida a 500 °C. Em complemento, bandas relacionadas a fases desidratadas puderam ser claramente observadas no espectro infravermelho da amostra de PCD obtida nesta temperatura. Sendo que a ATG da PCH revelou, uma perda de massa de 36% para amostras de PCH tratadas a 900 °C.

Estudos realizados por Alonso et al. [78], da PCH exposta a temperaturas elevadas, demonstraram uma progressiva transformação de gel de C-S-H a 450 °C em um gel de C-S-H modificado. A 750 °C, a decomposição de C-S-H foi completa com formação de novos silicatos. O desaparecimento da etringita abaixo de 100 °C foi confirmado, já a Ca(OH)_2 e o CaCO_3 foram convertidas em CaO a 750 °C. A reidratação das amostras aquecidas a 450 e 750 °C levou a restauração da portlandita, da etringita e do C-S-H.

Lucia et al. [79], submeteram uma PCH a vários regimes de temperatura até 800 °C em passos de 100 °C, durante um período constante de 24 h. A análise térmica foi utilizada para estudar o efeito da temperatura na composição mineralógica do cimento. A decomposição térmica da PCH é analisada pelas curvas da análise termogravimétrica (ATG) e a derivada da análise termogravimétrica (DATG). Tais técnicas podem ser usadas para determinar a consequente deterioração esperada da PCH. Os resultados mostraram que a reação de desidroxilação da portlandita é reversível.

Martin et al. [80], mencionaram em seus trabalhos que não só a temperatura de desidratação na obtenção do PCD tem influência na resistência a compressão da pasta de cimento reidratada (PCR), mas também as condições de cura, já que a PCR curada sob 100% de humidade relativa apresenta maior resistência a compressão do que a PCR curada sob imersão em água.

Uma das principais características do PCD é sua alta reatividade, desta forma o PCD pode atuar como agente incorporador de ar no preparo da PCR. Estudos realizados por Yu et al. [81], mostram que reutilização do PCD em concentrações acima de 5% na preparação de PCR, leva o aumento da viscosidade desta com

consequente incorporação de ar, que por sua vez gera o aumento de porosidade resultando na queda das propriedades mecânicas da PCR. A reutilização do PCD em baixas concentrações pode ser aplicada como aditivo uma vez que este promove a hidratação do cimento.

5.1-ESTUDO DA HIDRATAÇÃO, DESIDRATAÇÃO E REIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V)

É preferível enfrentar os problemas apresentados na literatura científica no que diz respeito a reciclagem da pasta de cimento hidratada (PCH), à ignorá-los. Desta forma, nos laboratórios do Departamento de Ciências Naturais (DCNAT) e do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ) no Brasil, com motivação, entusiasmo, dedicação, persistência e profissionalismo não foram medidos esforços no desenvolvimento de pesquisas científicas com intuito de desbravar as fronteiras da ciência nesta área.

Estas pesquisas tiveram o objetivo de investigar as modificações da composição química, da estrutura química e da microestrutura de amostras de PCH obtidas a partir do cimento Portland CP V-ARI (CP-V) e água, durante sua hidratação, desidratação e reidratação. Também foi objetivo do trabalho estudar o comportamento das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova de PCH durante o processo de hidratação, e dos corpos de prova de pasta de cimento reidratada (PCR) durante o processo de reidratação em cura ambiente.

5.1.1-METODOLOGIA.

A metodologia apresenta a preparação e caracterização da pasta de cimento hidratada (PCH), do pó de cimento desidratado (PCD) e da pasta de cimento reidratada (PCR). A metodologia também apresenta a preparação, ensaios físicos e mecânicos de corpos de prova de PCH e PCR preparadas a partir de PCD e cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI (CP-V).

Neste estudo, foi utilizado o CP-V da Empresa Holcim, que por sua vez foi devidamente estocado para evitar o contato com a umidade do ar. A Tabela 17 apresenta a composição em óxidos do cimento utilizado.

Tabela 17: Composição em óxidos do CP-V.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	CO ₂
(%) no CP-V	19,19%	5,15%	2,80%	63,33%	0,92%	2,82%	0,77%	2,78%

Foram preparadas PCH, utilizando uma razão água/cimento (a/c) de 0,5 e adicionadas em recipientes cilíndricos. As PCH foram curadas ao ambiente, por 7, 14, 21 e 28 dias, sendo nomeadas 7-PCH, 14-PCH, 21-PCH e 28-PCH respectivamente. A Figura 13 apresenta esquematicamente as etapas de caracterização das amostras durante a hidratação.

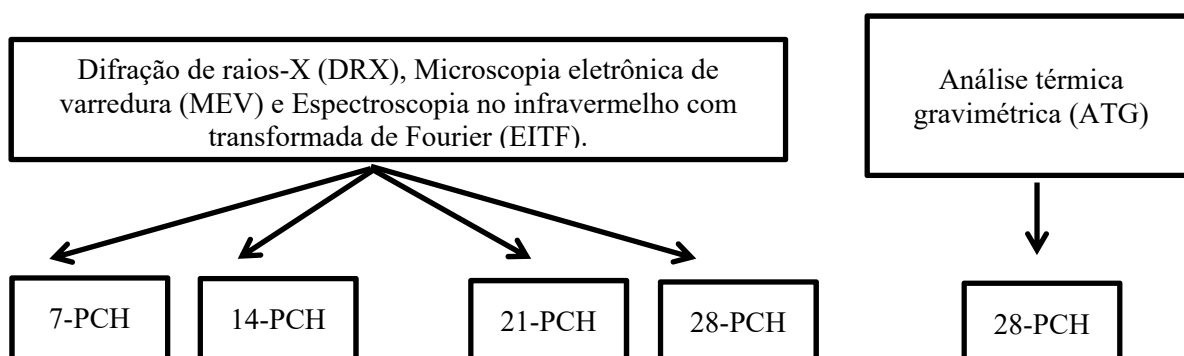


Figura 13: Etapas de caracterização das amostras durante a hidratação.

A Figura 14 apresenta imagens dos equipamentos utilizados na caracterização das amostras.

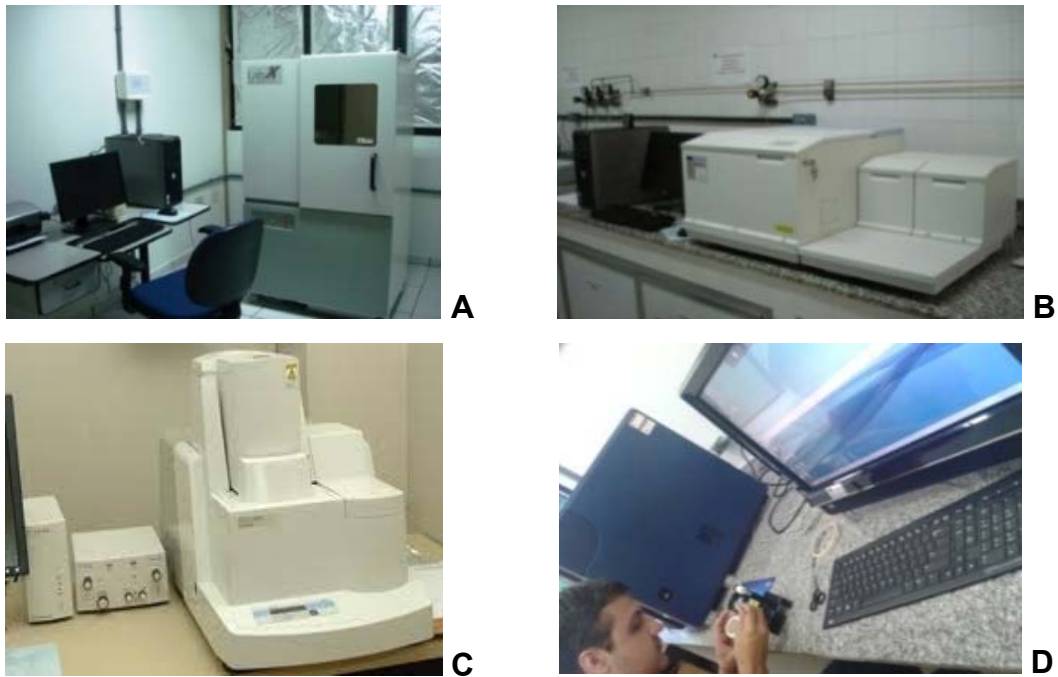


Figura 14: DRX em A, EITF em B, ATG em C, e MEV em D.

Amostras de PCH foram caracterizadas em todos os tempos de cura via difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (EITF). A amostra de PCH curada em 28 dias foi submetida a análise térmica gravimétrica (ATG) em atmosfera de nitrogênio, com o objetivo de estudar as etapas de desidratação. As amostras de CP-V também foram caracterizadas via DRX, MEV e EITF. Foram preparados 10 corpos de prova de PCH para cada tempo de cura, totalizando 40 corpos de prova de PCH. Foram utilizados 9,6 kg de CP-V na preparação dos corpos de prova de PCH. Na preparação da PCH foi utilizado um misturador mecânico da Contenco Indústria & Comércio, contendo uma cuba de aço inoxidável com capacidade de 5 L. A Figura 15 apresenta as etapas de preparação dos corpos de prova de PCH.

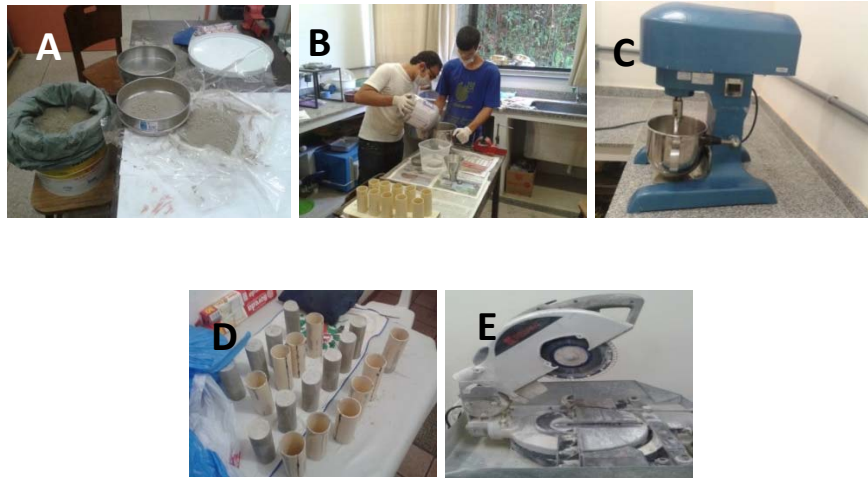


Figura 15: CP-V sendo passado em peneira em A, preparação da PCH em B, misturador mecânico em C, corpos de prova desmoldados em D, e máquina de policorte utilizada no faceamento dos corpos de prova em E.

Após cada período de cura os corpos de prova de PCH foram desmoldados e faceados em uma máquina de policorte da Crown Comércio de Empilhadeiras Ltda. Em seguida foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos. A Figura 16 apresenta esquematicamente as etapas de cura, ensaios físicos e mecânicos dos corpos de prova de PCH.

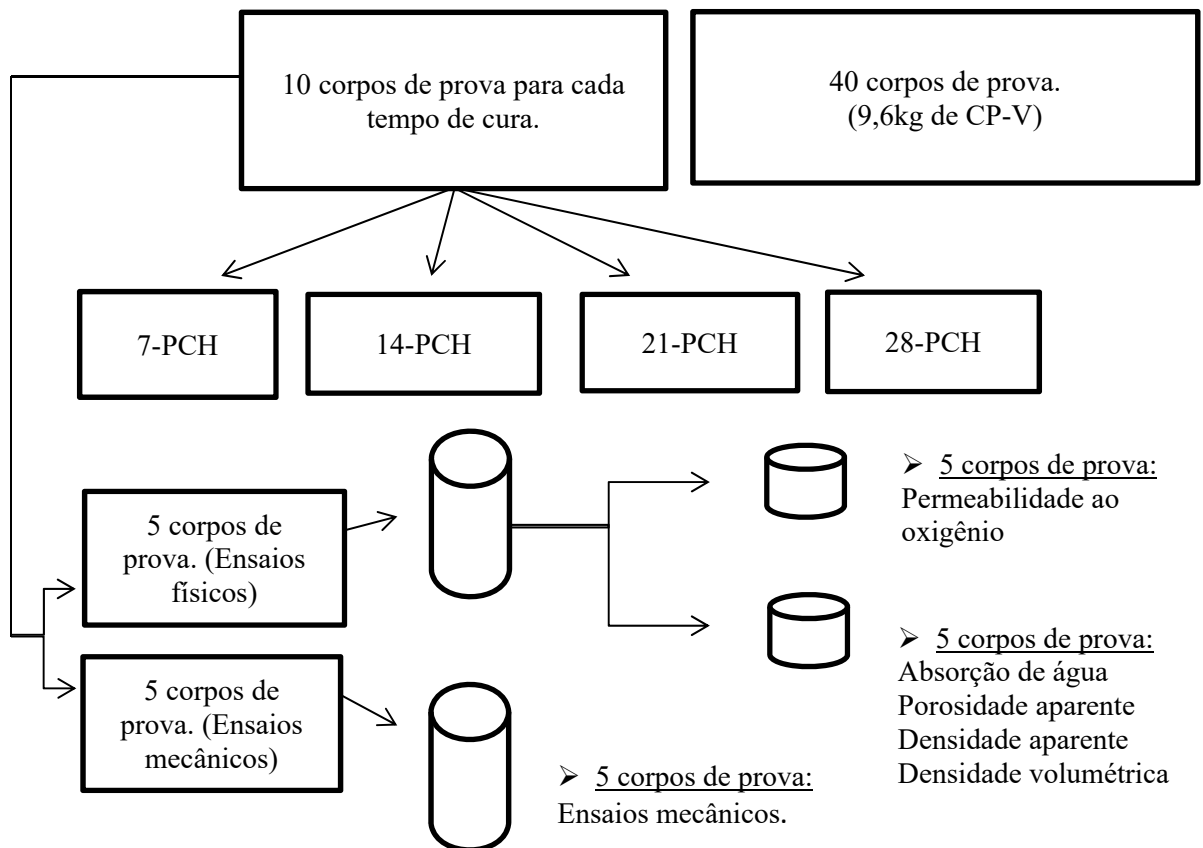


Figura 16: Etapas de cura, ensaios físicos e mecânicos dos corpos de prova de PCH.

Os ensaios físicos de absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, densidade volumétrica foram realizados por meio do método de câmara a vácuo de acordo com a norma britânica BS EM ISO10545-3 adaptada. Uma bomba de vácuo da Thermo Scientific e uma balança da Scout Pro foram utilizadas na execução destes ensaios. Foi utilizado o método da câmara a vácuo para execução dos ensaios físicos. Para cada grupo de corpos de prova, foram obtidas as massas secas (M_1), massas saturadas (M_2) e massas submersas (M_3). A Figura 17 apresenta as etapas de obtenção das propriedades físicas.

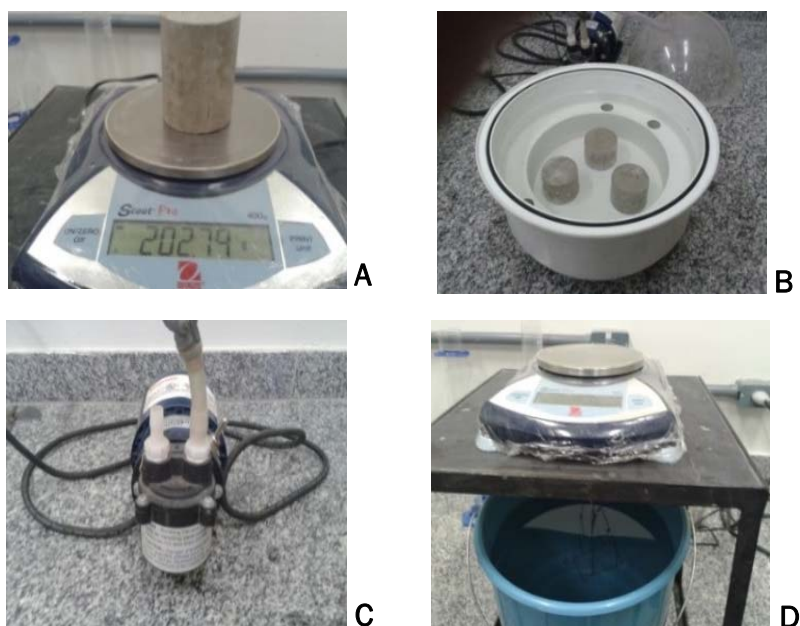


Figura 17: Obtenção da massa seca do corpo de prova em A, corpos de prova submersos em câmara de vácuo em B, bomba de vácuo utilizada em C, e sistema de pesagem por submersão em D.

As quatro propriedades foram calculadas de acordo a com as seguintes equações:

- $$E = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (1.6)$$

Onde E é a absorção de água, expressa em (%). E representa a água que penetra em poros abertos do corpo de prova.

- $$p = \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (1.7)$$

Onde p é a porosidade aparente, expressa em (%). $M_2 - M_1$ é o volume de poros abertos V_0 , e $M_2 - M_3$ é volume externo V . p representa a relação entre o volume de poros abertos do corpo de prova e seu volume externo.

- $$T = \frac{M_1}{M_1 - M_3} \quad (1.8)$$

Onde T é a densidade aparente, expressa em (g/cm^3). M_1-M_3 é o volume da porção impermeável V_i . T representa a relação entre a massa do corpo de prova seco e seu volume impermeável.

$$\bullet \quad B = \frac{M_1}{M_2 - M_3} \quad (1.9)$$

Onde B é a densidade volumétrica, expressa em (g/cm^3). B representa a densidade do corpo de prova incluído os poros.

Os corpos de prova também foram submetidos a ensaios de permeabilidade em todos os tempos de cura. O ensaio de permeabilidade a gás foi conduzido utilizando-se um permeâmetro a gás do Laboratório do CITEC/UFSJ. Os ensaios foram realizados com gás oxigênio, utilizando-se corpos de prova cilíndricos. O ensaio consiste em aplicar valores de pressão e medir a respectiva vazão do gás que flui através da seção transversal do corpo de prova por meio de uma bureta adaptada. A expressão empírica utilizada para calcular a permeabilidade intrínseca ao oxigênio é:

$$\bullet \quad K = \frac{2Q.L.\eta.P_f}{A(P^2 - P_a^2)} \quad (2.0)$$

Sendo K - Permeabilidade intrínseca ao oxigênio (m^2); Q - Fluxo do oxigênio à saída (m^3/s); L - Espessura do corpo de prova (m); η - Viscosidade do fluido a temperatura do ensaio ($\text{s.N}/\text{m}^2$); A - Viscosidade para o $\text{O}_{2(\text{g})}$ a 20°C é de $2,02 \times 10^{-5} \text{s.N}/\text{m}^2$; P_f - Pressão em que o fluxo Q é medido (N/m^2); Considera-se a pressão atmosférica; A - Área da seção atravessada pelo oxigênio (m^2); P - Pressão do oxigênio à entrada (N/m^2); P_a - Pressão de saída do gás (N/m^2).

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade para os corpos de prova, foram obtidos de acordo com a norma NBR 7215 adaptada, em todos os tempos de cura por meio de uma máquina de ensaios mecânicos universal SHIMADZU® AG-X Plus. O módulo de elasticidade de acordo com a equação:

$$\bullet \quad E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2.1)$$

Onde E é o módulo de elasticidade expresso em (N/mm^2), σ é a tensão à compressão expressa em (N/mm^2), e ε é a variação unitária do comprimento. A Figura 18 apresenta a máquina de ensaio mecânico utilizada e o sistema de medida de permeabilidade ao oxigênio.

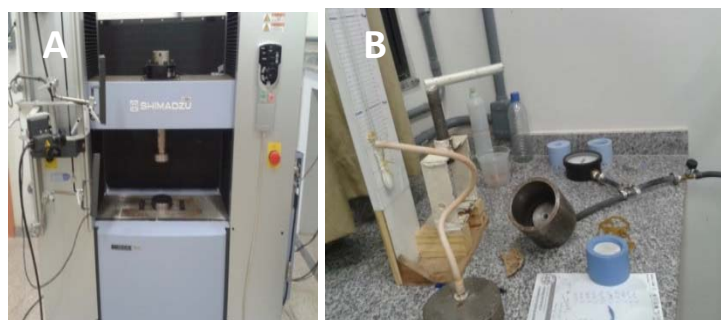


Figura 18: Máquina de ensaio mecânico utilizada em A, e sistema de medida de permeabilidade ao oxigênio utilizada em B.

A PCH com 28 dias de cura foi triturada manualmente por meio golpes repetitivos com um martelo de mão, até que fosse possível a passagem desta em uma peneira com abertura de 6,35 mm. Esta foi posteriormente adicionada a um moinho de rotor tipo ciclone TE 651/2, em seguida o pó foi passado em uma peneira com abertura menor que 1 mm. Na obtenção do PCD, o pó de PCH foi submetido à diferentes temperaturas de tratamento térmico em um forno EDG 10P-S, sendo tratados a 300, 500, 700 e 900 °C, sendo nomeados 300-PCD, 500-PCD, 700-PCD e 900-PCD, respectivamente. Após este processo, os PCD foram acondicionados em recipientes fechados de forma a evitar sua reidratação pela umidade do ar, até suas amostras serem caracterizados via DRX, MEV e EITF. A Figura 19 apresenta esquematicamente as etapas de preparação e caracterização dos pós de cimento desidratados.

Utilizando a razão H_2O /aglomerante de 0,5 e cura ao ambiente, pastas de cimento reidratadas (PCR), foram preparadas partindo de 700-PCD e de 900-PCD, sendo nomeadas 700-PCR e 900-PCR, respectivamente. Após 7, 14, 21 e 28 dias de cura estas foram sistematicamente caracterizadas via DRX, MEV e IVTF.

Foram preparados aproximadamente 20 Kg de PCH, com razão H_2O /CP-V de 0,5, e submetida a cura ao ambiente. Após 28 dias de cura, a PCH foi triturada manualmente por meio de um soquete, até que fosse possível a passagem desta em uma peneira com abertura de 6,35 mm. Esta foi posteriormente adicionada ao moinho, e em seguida o pó foi passado em uma peneira com abertura menor que 1 mm. O pó de PCH obtido foi dividido em dois grupos sendo tratados a 700 e 900 °C. Após este processo, o PCD foi acondicionado de forma a evitar sua reidratação pela umidade do ar em um recipiente fechado. A Figura 20 apresenta algumas etapas de cominuição da PCH, e acondicionamento dos PCD.

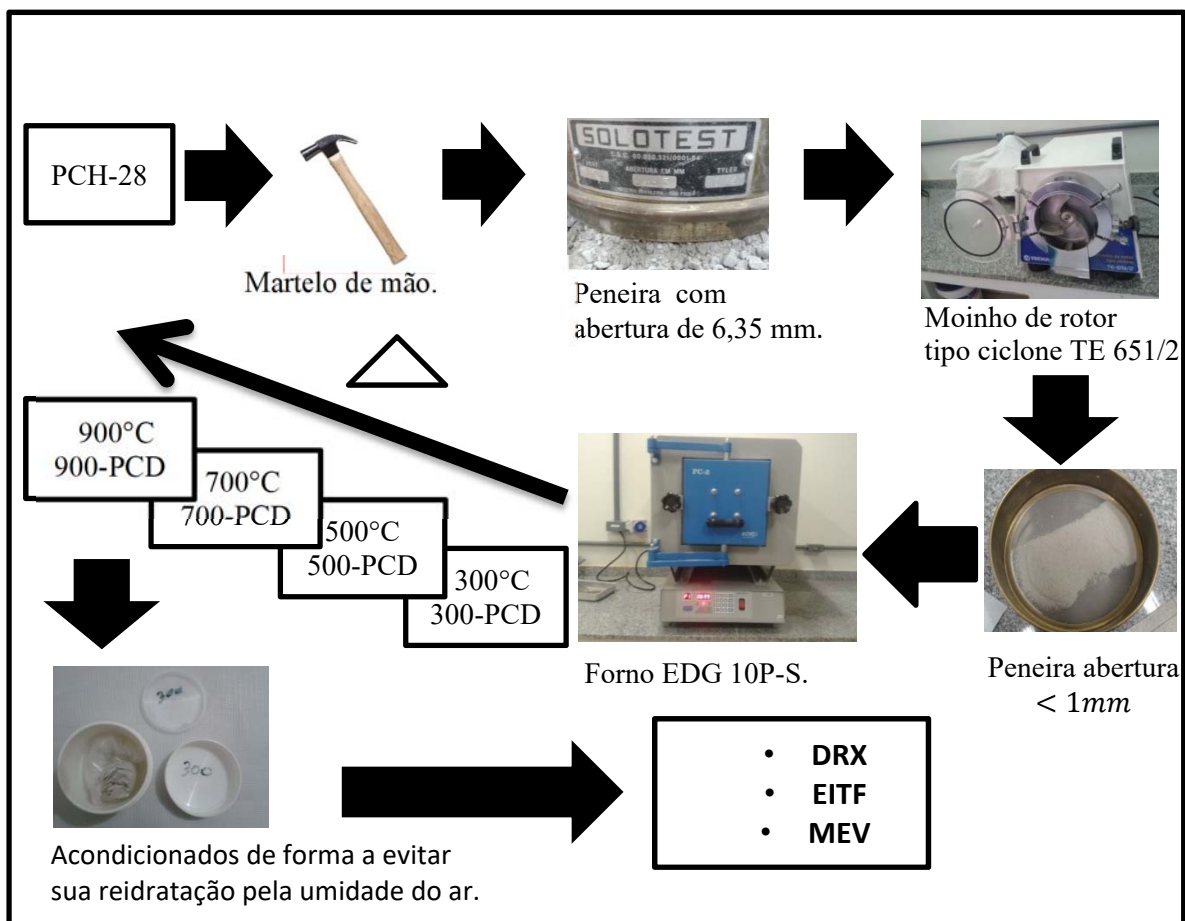


Figura 19: Etapas de preparação e caracterização dos pós de cimento desidratados

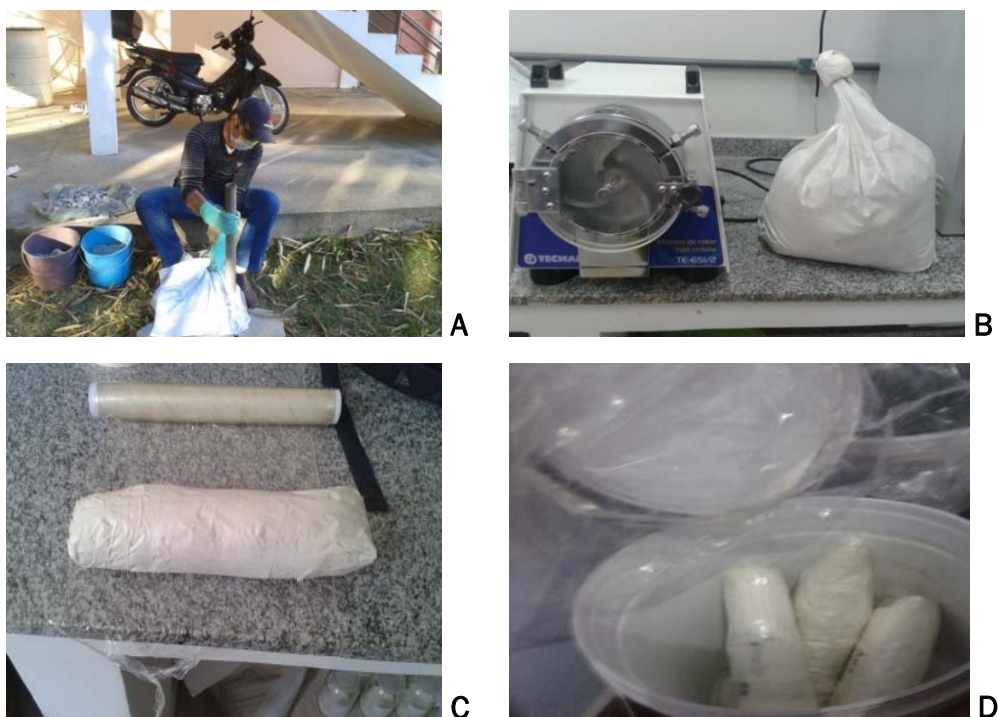


Figura 20: Cominuição da PCH utilizando um soquete em A, saco contendo PCH na forma de pó em B, etapas de acondicionamento dos PCD em C e D.

Utilizando a razão H_2O /aglomerante de 0,5 e cura ao ambiente, corpos de prova de pasta de cimento reidratada (PCR) foram preparados a partir de 2, 5, 10, 20, 40, 50 e 60% de 700-PCD e de 900-PCD, em relação ao CP-V, sendo nomeados de acordo com a Tabela 18:

Tabela 18: Nomes dos corpos de prova de PCR.

700-PCD (%) em relação ao CP-V.	Nomes.	900-PCD (%) em relação ao CP-V.	Nomes.
2	2-700-PCR	2	2-900-PCR
5	5-700-PCR	5	5-900-PCR
10	10-700-PCR	10	10-900-PCR
20	20-700-PCR	20	20-900-PCR
40	40-700-PCR	40	40-900-PCR

50	50-700-PCR	50	50-900-PCR
60	60-700-PCR	60	60-900-PCR

Antes da adição da água de mistura, os pós de PCD e CP-V foram homogeneizados em um recipiente plástico, e submetidos a vibração mecânica em uma mesa vibratória. Para cada condição foram preparados 10 corpos de prova com as mesmas dimensões que os corpos de prova de PCH, totalizando 140 corpos de prova de PCR. Sendo utilizados aproximadamente 24,6 Kg de CP-V e 8,8 Kg de PCD na preparação destes corpos de prova. Após 28 dias, todos os corpos de prova foram submetidos a ensaios físicos de absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente e densidade volumétrica. A Figura 21 apresenta o processo de homogeneização de pós de cimento, corpos de prova de PCR na sala de cura e desmoldados.



Figura 21: Mesa vibratória utilizada na homogeneização dos pós em A, corpos de prova em sala de cura em B, corpos de prova desmoldados em C, corpos de prova de 20-700-PCR em D, e de 40-700-PCR em E, e corpo de prova de 50-900-PCR em F.

Os corpos de prova de 20-700-PCR, 40-700-PCR e de 60-PCR também foram caracterizados por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e submetidos a ensaios físicos de permeabilidade.

5.1.2-RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões são apresentados de forma sistemática em cada tópico a seguir.

5.1.2.1-ESTUDO DA ESTRUTURA E MICROESTRUTURA DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V) DURANTE SUA HIDRATAÇÃO

Amostra de cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI (CP-V) e amostras de pasta de cimento hidratada (PCH) foram curadas por 7 dias (7-PCH), 14 dias (14-PCH), 21 dias (21-PCH) e 28 dias (28-PCH). Estas foram caracterizadas via difração de raios-X (DRX), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (EITF) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os difratogramas de raios X das amostras de CP-V e de PCH com diferentes tempos de cura são apresentados na Figura 22.

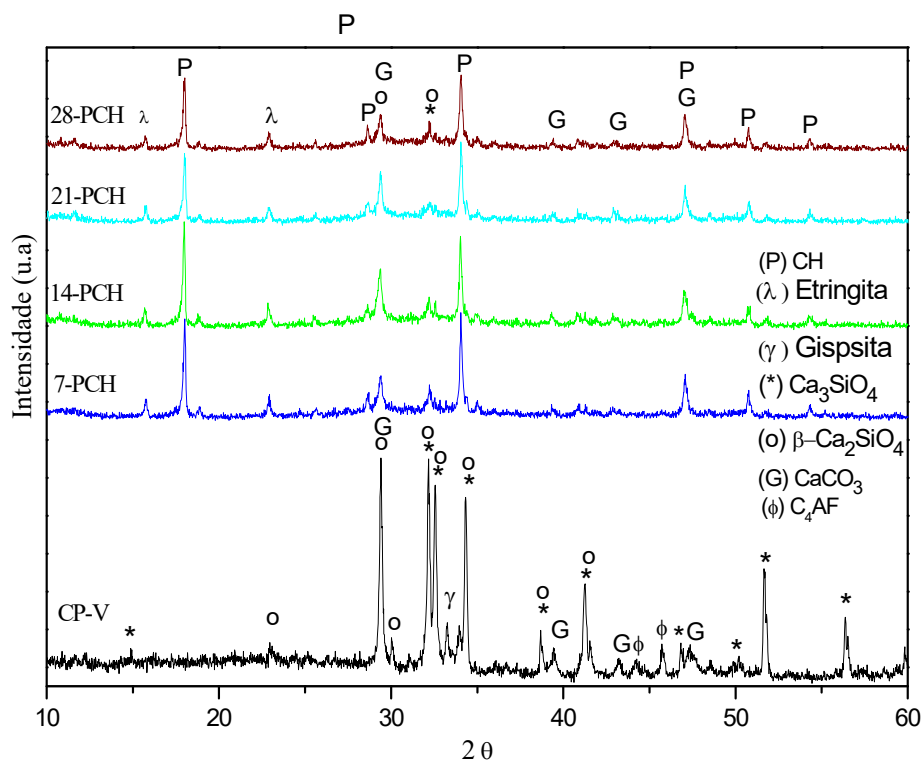


Figura 22: Difratogramas de raios X da amostra de CP-V e das amostras de PCH com diferentes tempos de cura obtidos com velocidade de análise de $2^\circ/\text{min}$.

No difratograma da amostra de CP-V, os picos em 32,12; 32,55 e 34,24°(2θ) são atribuídos a presença de fases de C₃S e C₂S. Também é possível notar neste difratograma a presença de picos em 29,42; 39,48; 43,21 e 47,17°(2θ) que se referem a estrutura cristalina do CaCO₃. O pico em 33,22°(2θ) neste difratograma, corresponde a presença de Ca₂SO₄.2H₂O no CP-V. Os difratogramas das amostras de PCH estudadas em todos os tempos de cura apresentam-se semelhantes, contendo picos atribuídos a fases hidratadas, anidras e de carbonato de cálcio. A presença de produtos de hidratação do clínquer como etringita e portlandita nas amostras de PCH [82-86], é comprovada pela presença de picos que correspondem a fases destes hidratos nos difratogramas destas amostras. Picos atribuídos a fases anidras também podem ser identificados nestes difratogramas, como por exemplo, os picos em torno de 32 e 34°(2θ) relacionados as fases de β-C₂S e C₃S. A Figura 23 apresenta os difratogramas das amostras de CP-V e de PCH após 28 dias de cura obtidos via análise por DRX com velocidade de varredura de 0,1940°/min.

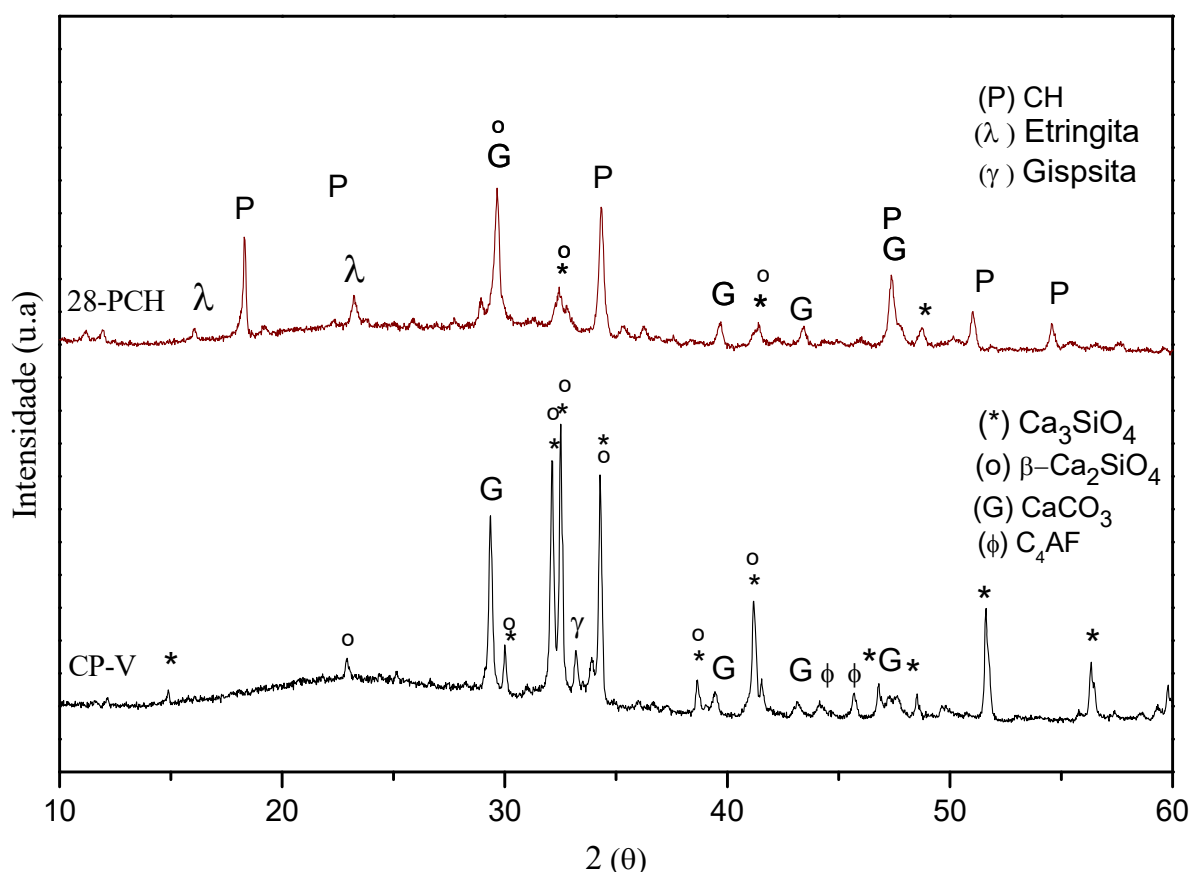


Figura 23: Difratogramas de raios X das amostras de CP-V e de PCH após 28 dias de cura obtidos com velocidade de análise de 0,1940°/min.

Como se pode notar, estes difratogramas são semelhantes aos difratogramas obtidos com velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$ para estas amostras, apresentados na Figura 22, comprovando a hidratação do CP-V após 28 dias de cura.

Os espectros infravermelho da amostra de CP-V e das amostras de PCH com diferentes tempos de cura são apresentados na Figura 24. Analisando o espectro da amostra de CP-V, é possível observar uma banda em 925 cm^{-1} atribuída a vibrações de estiramento assimétrico das ligações $\nu_{\text{as}}(\text{Si-O})$ presentes nas fases anidras de C_3S e $\beta\text{-C}_2\text{S}$. Os íons de silicato (SiO_4^{4-}) presentes na fase alita do cimento [83], apresentam modos vibracionais relacionados a banda presente em torno de 525 cm^{-1} . A presença de calcita no cimento Portland é caracterizada pelas bandas atribuídas a vibrações do íon CO_3^{2-} [83], estas são observadas no espectro da amostra de CP-V, em torno de $1497\text{-}1425\text{ cm}^{-1}$, 874 cm^{-1} e 712 cm^{-1} . O íon CO_3^{2-} apresenta diferentes modos vibracionais [87], as atribuições dos modos vibracionais são as seguintes: deformações angulares no plano $\delta_{\text{d}}(\text{OCO})$ em 712 cm^{-1} ; deformações angulares fora do plano $\gamma(\text{CO}_3^{2-})$ em 873 cm^{-1} e estiramento assimétrico $\nu_{\text{as}}(\text{CO})$ em 1420 cm^{-1} . Ainda neste espectro, em 1100 cm^{-1} , é observado uma banda atribuída ao estiramento assimétrico dos grupos $\nu_{\text{as}}(\text{Si-O-Si})$ presentes nas fases anidras.

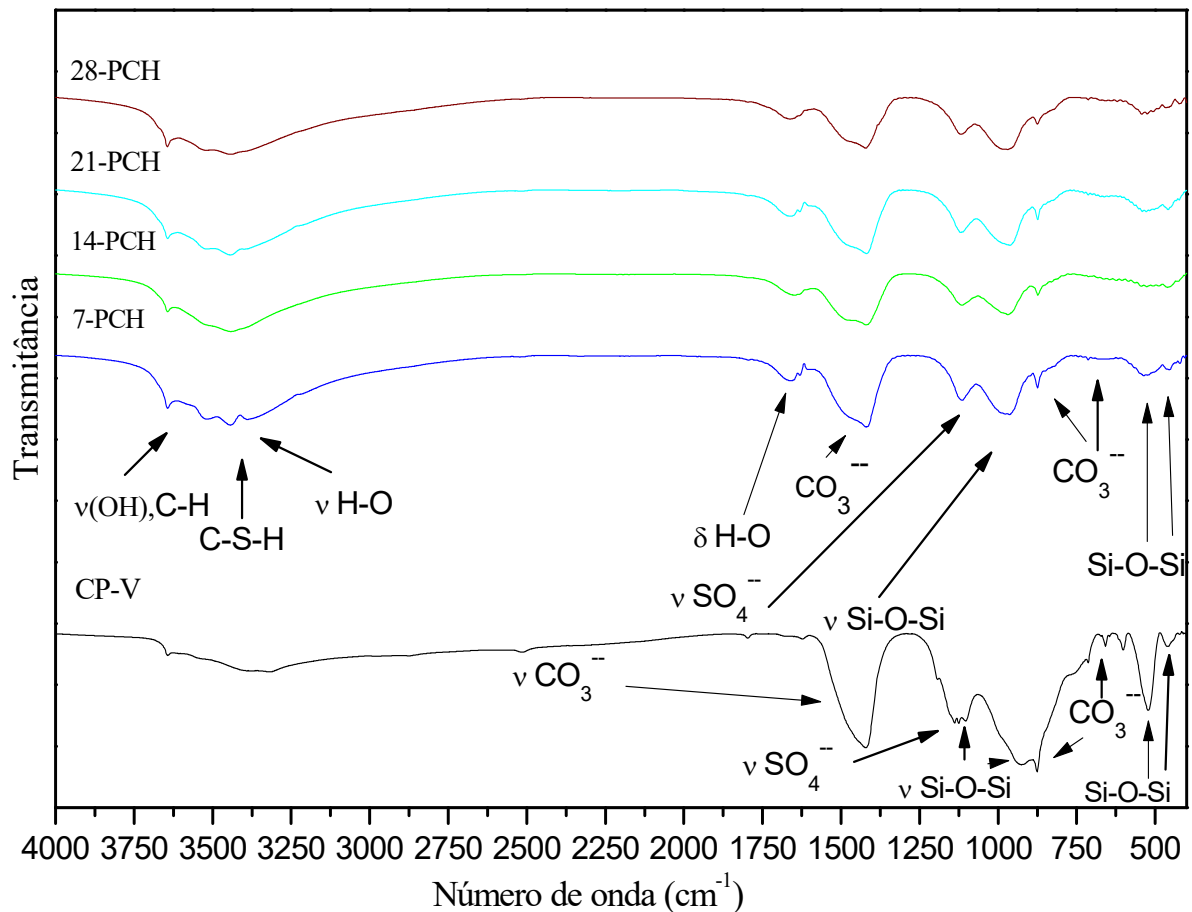


Figura 24: Espectros infravermelho da amostra de CP-V e das amostras de PCH com diferentes tempos de cura.

As fases β -C₂S e C₃S a serem hidratadas contêm íons SiO₄⁴⁻. A presença destas fases na amostra de CP-V é confirmada pela banda em torno de 470 cm⁻¹ que está presente no espectro desta amostra, e é atribuída a deformações dos grupos δ (Si-O-Si) dos íons silicatos. Em torno de 606 cm⁻¹, 664 cm⁻¹ e 1140 cm⁻¹ no espectro da amostra de CP-V, é possível notar a presença de três bandas, e estas podem ser atribuídas ao estiramento de grupos sulfato (SO₄²⁻), que podem ser associados à gipsita. Os espectros das amostras de PCH estudadas em todos os tempos de cura são semelhantes. São constatadas bandas alargadas centradas em 3450 cm⁻¹ atribuídas ao estiramento simétrico e assimétrico das ligações (O-H), existentes nas moléculas de água presentes nas amostras. A banda em 1645 cm⁻¹ também é atribuída às vibrações de deformação angular das moléculas de H₂O presentes nas amostras de PCH. A banda em torno de 3440-3446 cm⁻¹ é atribuída ao estiramento das ligações (O-H), presentes no polímero de C-S-H, produto de hidratação de silicatos existentes nas amostras de PCH. Nestes espectros, é possível notar a presença de uma banda em 3640 cm⁻¹, que é atribuída ao estiramento da ligação

(O-H) presente na portlandita, produto de hidratação de C_3S e $\beta-C_2S$ [88, 89]. Por meio da análise de estrutura por EITF, é possível comprovar que ocorre a formação de silicatos de cálcio hidratados durante a hidratação do cimento Portland [83, 90]. Desta forma, a banda em torno de 965 cm^{-1} atribuída ao estiramento assimétrico das ligações $\nu_{as}(\text{Si-O})$ presentes no polímero de C-S-H, confirma a polimerização das fases anidras de silicatos. Embora em menor intensidade, a banda em torno de 525 cm^{-1} atribuída a fase alita existente no cimento Portland, também pode ser notada nos espectros das amostras de PCH, esta confirma a incompletude das reações de hidratação.

A Figura 25 apresenta as micrografias da amostra de CP-V em A, e das amostras de PCH com diferentes tempos de cura de B até E. Com a análise morfológica realizada por meio das micrografias apresentadas, é possível dizer que as amostras de PCH em todos os tempos de cura apresentam texturas semelhantes, com formação de agulhas de etringita, estrutura em favos de C-S-H [84]. Por outro lado, a micrografia da amostra de CP-V apresenta apenas partículas dispersas, que correspondem ao cimento Portland ainda a ser hidratado [91].

A Figura 26 apresenta micrografias das amostras de CP-V em A e de PCH após 28 dias de cura em B. Com análise morfológica da microestrutura da amostra de CP-V nesta resolução, é possível observar partículas de cimento Portland CP-V relacionados aos compostos anidros do cimento de diversos tamanhos. A micrografia da amostra de PCH após 28 dias de cura apresenta partículas anidras envolvidas por hidratos de cimento, este fato pode ser contemplado mais claramente nas micrografias apresentadas na Figura 27.

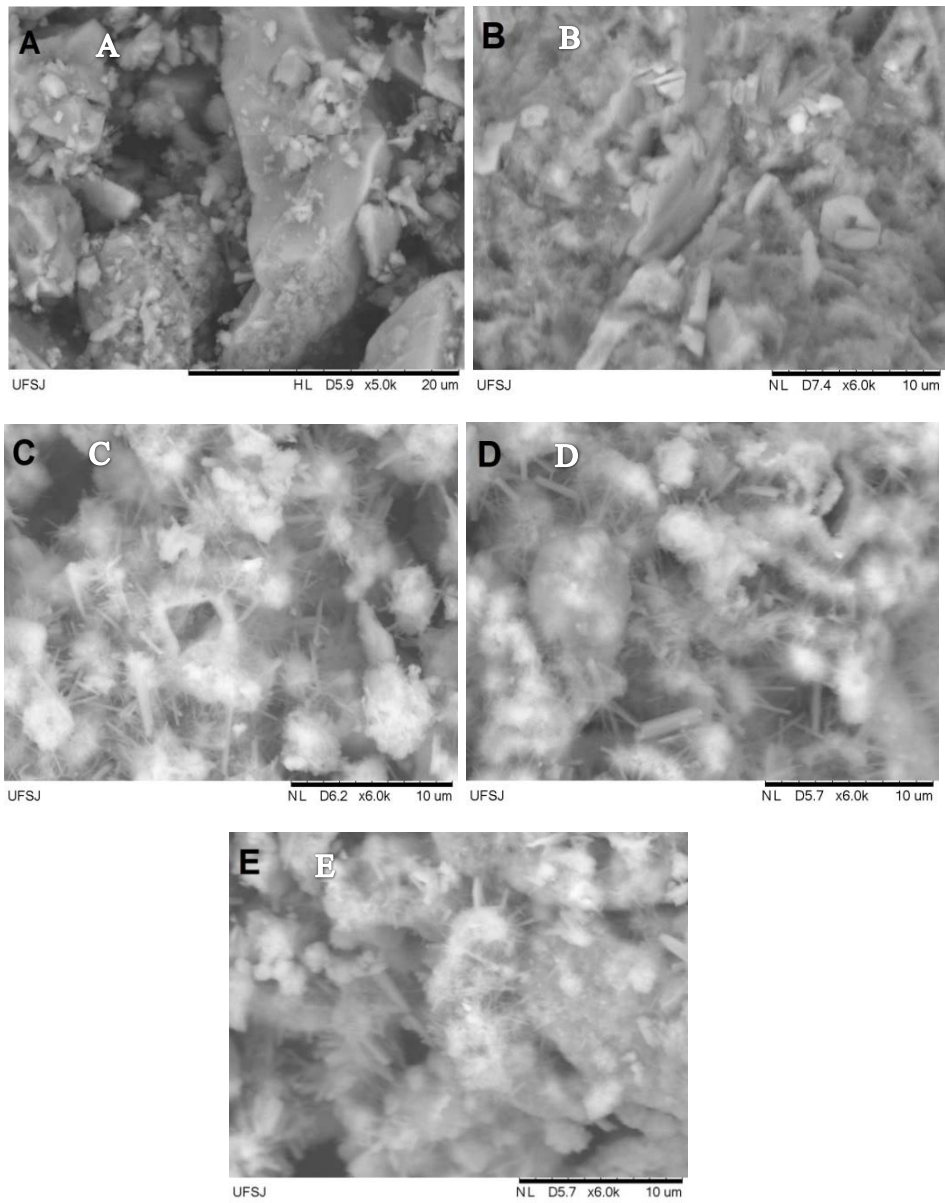


Figura 25: Micrografias das amostras de CP-V em A, 7-PCH em B, 14-PCH em C, 21- PCH em D e 28-PCH em E.

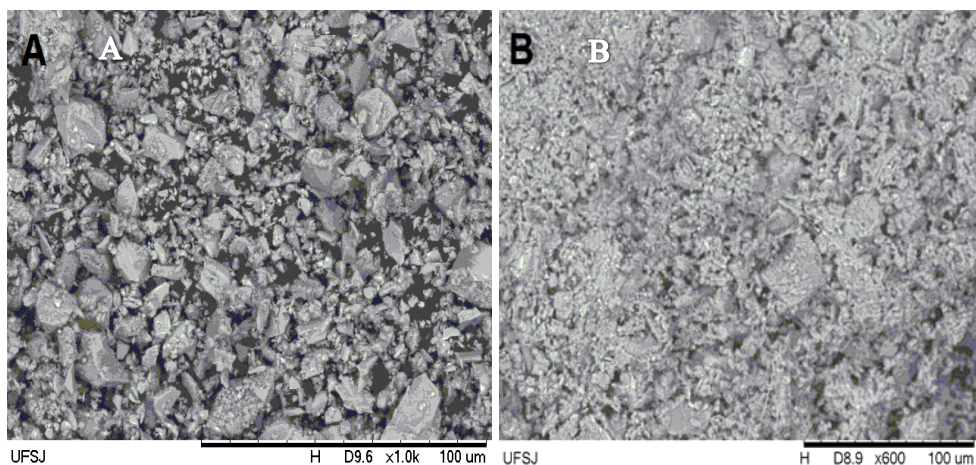


Figura 26: Micrografias das amostras de CP-V em A, e de PCH após 28 dias de cura em B.

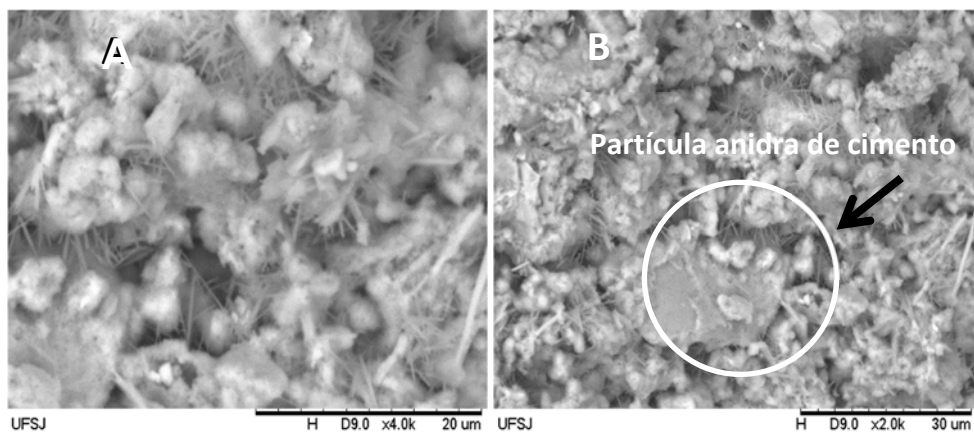


Figura 27: Micrografias de PCH após 28 dias de cura.

5.1.2.2-ESTUDO DA ESTRUTURA E MICROESTRUTURA DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V) DURANTE SUA DESIDRATAÇÃO

As amostras de pó de cimento desidratado (PCD) foram obtidas a 300 °C (300-PCD), 500 °C (500-PCD), 700 °C (700-PCD) e a 900 °C (900-PCD). Estas foram caracterizadas via difração de raios-X (DRX), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (EITF) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os difratogramas de raios X da amostra de PCH após 28 dias de cura e das amostras de PCD obtidas a diferentes temperaturas são apresentados na Figura 28. Com a análise do difratograma da amostra de 300-PCD, é possível observar a ausência de picos atribuídos a fase de etringita, esta ausência é devido a desidratação da etringita que ocorre durante o tratamento térmico. O difratograma

da amostra de 500-PCD, não apresenta picos atribuídos à fase de CH, isto devido a decomposição do hidróxido de cálcio em água e em CaO que ocorre em torno de 450 °C [84]. Por volta de 500 °C, ocorre a reação química entre o CaO livre presente na amostra e o CO₂ existente na atmosfera da câmara do forno, tendo como produto o CaCO₃ [74, 80]. No difratograma da amostra de 500-PCD podem ser notados picos em torno 23,08 e 29,42° (2θ) atribuídos a fase de CaCO₃ [83]. O tratamento térmico da PCH leva a formação novos nesosilicatos com estrutura próxima do β-C₂S, pela decomposição do gel de C-S-H [74, 75, 78, 83, 84]. A 700 °C os picos relacionados a fase do novo β-C₂S em torno de 32° (2θ) e picos relacionados a fases de CaO, podem ser notados no difratograma da amostra de 700-PCD. Neste difratograma a presença dos picos atribuídos a fase de CaCO₃ não pode ser observada, uma vez que nesta temperatura o carbonato de cálcio se decompõe em dióxido de carbono e CaO. No difratograma da amostra de 900-PCD é possível notar claramente, a presença de picos intensos atribuídos a fases cristalinas de novos nesosilicatos com estrutura próxima da belita. Desta forma é possível comprovar a desidratação da PCH quando submetido altas temperaturas.

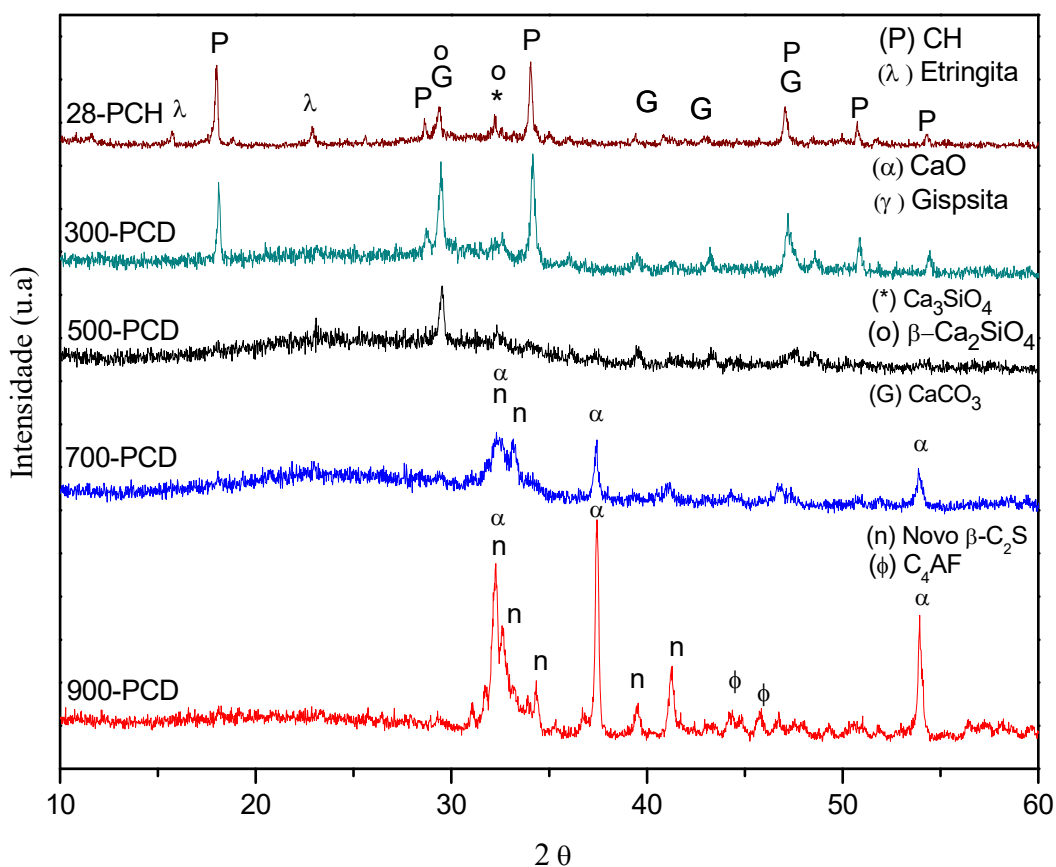


Figura 28: Difratogramas de raios X da amostra de PCH após 28 dias de cura e das amostras de PCD obtidas a diferentes temperaturas.

Os espectros infravermelho da amostra de PCH após 28 dias de cura e das amostras de PCD obtidas a diferentes temperaturas são apresentados na Figura 29. A banda em 3640 cm^{-1} , atribuída ao estiramento da ligação O-H presente na portlandita [85, 88], se encontra presente no espectro da amostra 28-PCH. A presença das bandas em torno de 3440 e 965 cm^{-1} atribuídas a fase C-S-H, também confirma a existência de água quimicamente combinada na amostra de 300-PCD. No espectro da amostra de 500-PCD, é possível observar uma intensa banda em 525 cm^{-1} atribuída a vibrações do íon silicato (SiO_4^{4-}) [83, 89]. Esta banda está relacionada com reações de decomposição envolvendo o gel C-S-H nesta temperatura. E a banda em 945 cm^{-1} neste espectro, é atribuída ao gel de C-S-H modificado, por meio de modos vibracionais da ligação Si-O presente no polímero. Ainda no espectro da amostra 500-PCD, as bandas atribuídas ao íon CO_3^- [88] ganham presença, e estão relacionadas a reações de carbonatação que ocorrem em torno de 500°C . No espectro da amostra 700-PCD, é possível notar a presença da banda em 925 cm^{-1} , que é atribuída a vibração de estiramento assimétrico das ligações $\nu_{\text{as}}(\text{Si-O})$ presentes nos novos nesosilicatos. As bandas em torno de 1497 - 1425 cm^{-1} , 874 cm^{-1} e 712 cm^{-1} , atribuídas ao íon carbonato, perdem presença significativa no espectro da amostra de 700-PCD, este fato ocorre devido a decomposição do CaCO_3 em dióxido de carbono e CaO em torno desta temperatura. No espectro da amostra de 900-PCD, a banda em 995 cm^{-1} ganha presença, e está relacionada com o avanço na formação do novo ortosilicato dicálcico com estrutura próxima do $\beta\text{-C}_2\text{S}$, como resultado da desidratação do gel de C-S-H [83].

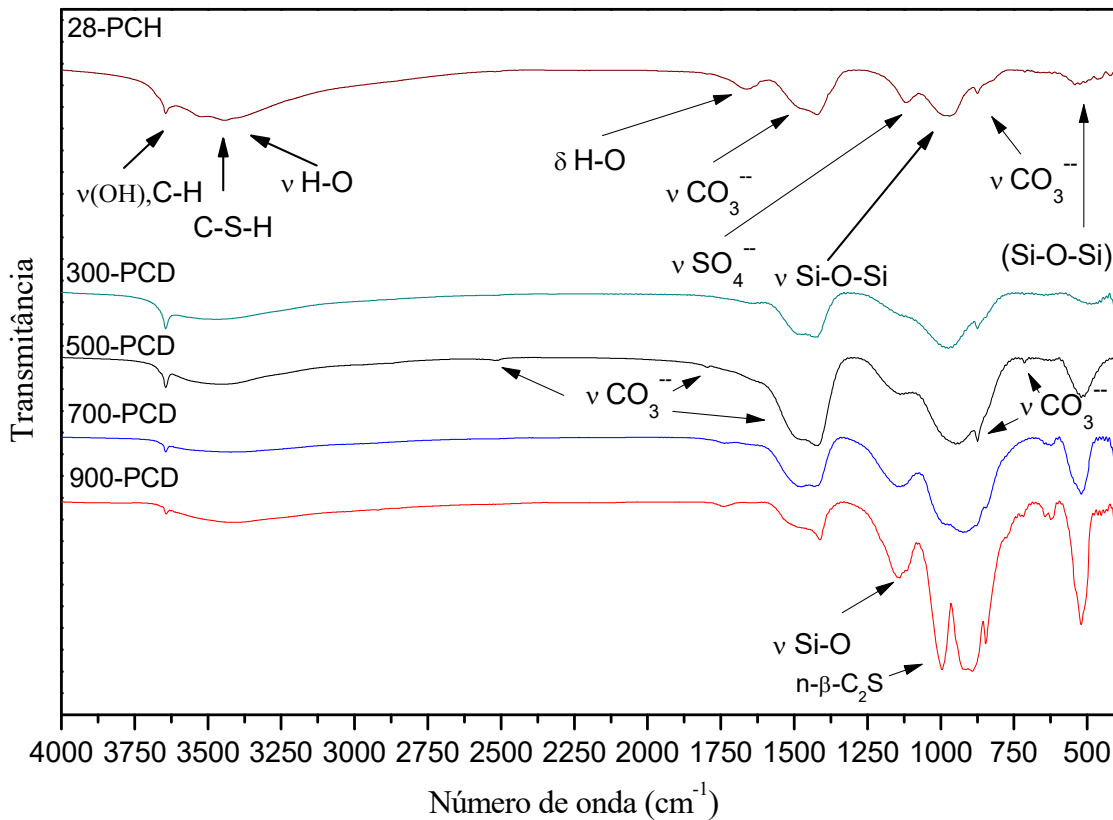


Figura 29: Espectros infravermelho da amostra de PCH após 28 dias de cura e das amostras de PCD obtidas a diferentes temperaturas.

A Figura 30 apresenta as micrografias da amostra de PCH após 28 dias de cura e da amostra de 900-PCD. Com a análise morfológica da microestrutura destas amostras, é possível notar que a microestrutura da amostra de 900-PCD apresenta partículas “soltas”, ao contrário da microestrutura da amostra de PCH após 28 dias de cura, que apresenta partículas de cimento anidro unidas por produtos de hidratação presentes na pasta de cimento hidratada. Este fato ocorre porque a desidratação da PCH é acentuada nesta temperatura, e os produtos de hidratação que envolviam as partículas no sistema, são desidratados levando a formação de partículas de PCD.

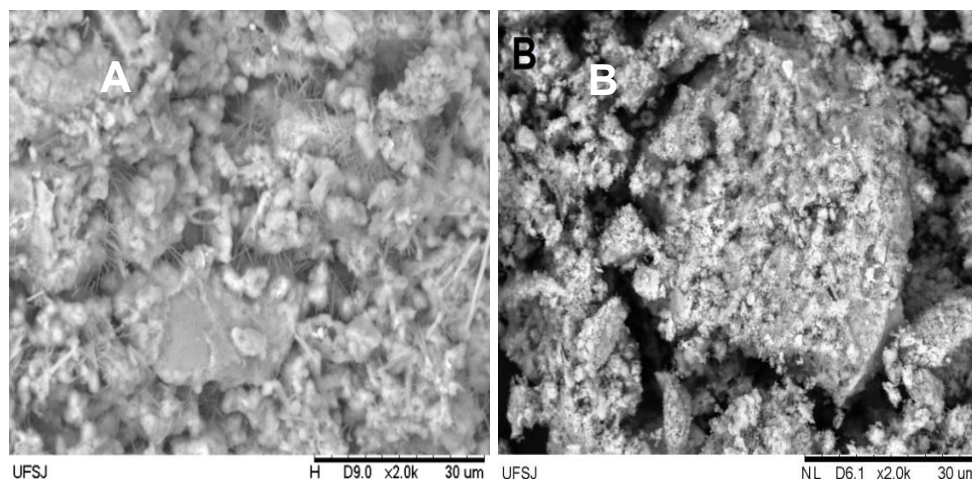


Figura 30: Micrografias das amostras de PCH após 28 dias de cura em A e de 900-PCD em B.

A Figura 31 apresenta as micrografias das amostras de PCH após 28 dias de cura, e das amostras de PCD obtidas a diferentes temperaturas. Com a análise morfológica realizada por meio das micrografias apresentadas na Figura 31, pode-se dizer que as amostras de PCD apresentam texturas semelhantes, embora seja possível notar a presença de estrutura em favos de C-S-H na micrografia da amostra de PCD obtida a 300 °C.

A Figura 32 apresenta as micrografias das amostras de CP-V, 700-PCD e 900-PCD. Com a análise destas, é possível notar a presença de partículas relacionadas a fases a serem hidratadas em todas as micrografias.

A Figura 33 apresenta a análise térmica gravimétrica da amostra de PCH após 28 dias de cura e sua derivada. Com a derivada da curva da análise térmica gravimétrica (DATG), é possível descrever a degradação térmica da amostra de PCH em basicamente três estágios mais acentuados. As duas acentuadas perdas de massa no primeiro estágio que ocorre até 170 °C, estão relacionadas com a desidratação da etringita e com a liberação de água fisicamente combinada.

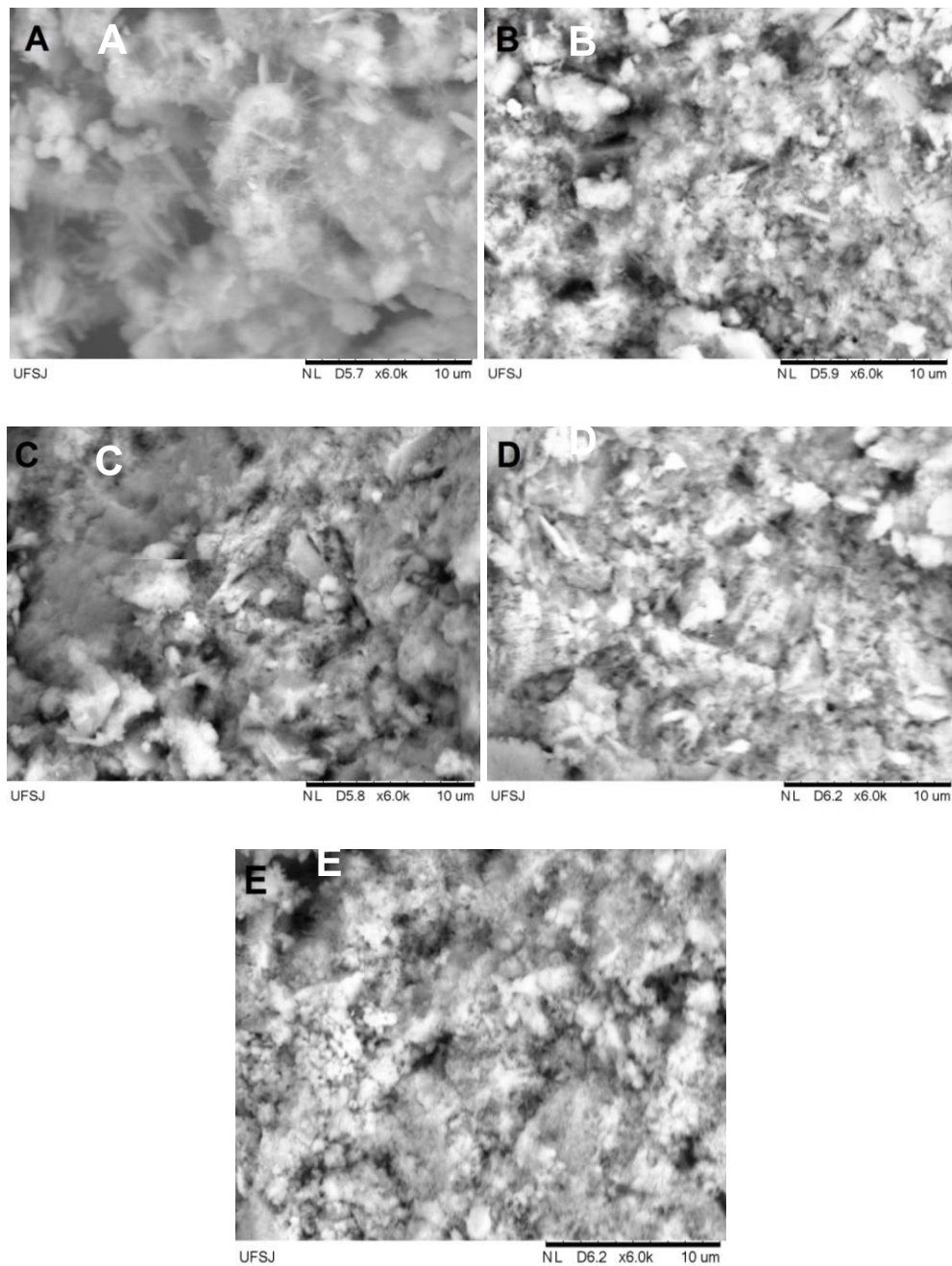


Figura 31: Micrografias das amostras de PCH após 28 dias de cura em A, 300-PCD em B, 500-PCD em C, 700-PCD em D e 900-PCD em E.

A perda de massa acentuada no segundo estágio em torno de 450°C, está associada a desidroxilação da portlandita representada pela Equação 2.2. A terceira e acentuada perda de massa que ocorre em torno de 700°C, está relacionado a decomposição da calcita representada pela Equação 2.3 [75, 78]. Ao final do tratamento térmico a amostra analisada perdeu 36% de sua massa inicial.



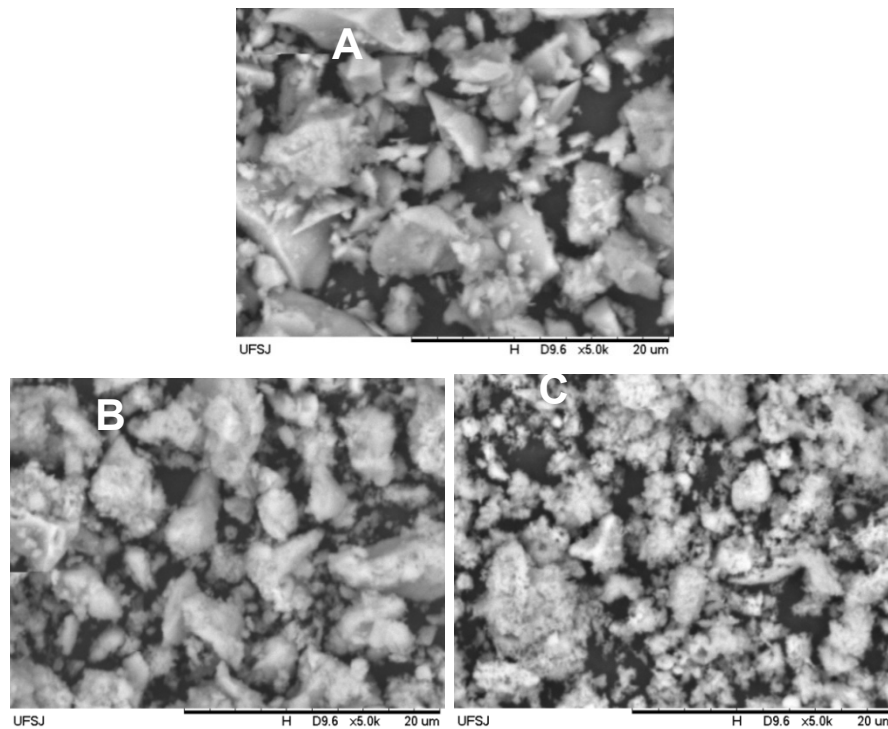
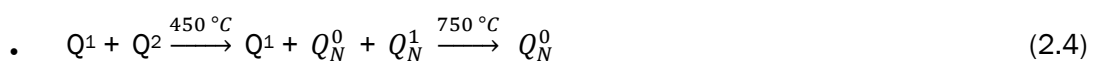


Figura 32: Micrografias das amostras CP-V em A, de 700-PCD em B e de 900-PCD em C.

Durante o tratamento térmico, ocorre contínua perda de massa devido a perda de água combinada a silicatos hidratados. O comportamento dos silicatos durante a despolimerização da rede de C-S-H é representado pela Equação 2.4 [73, 75, 78].



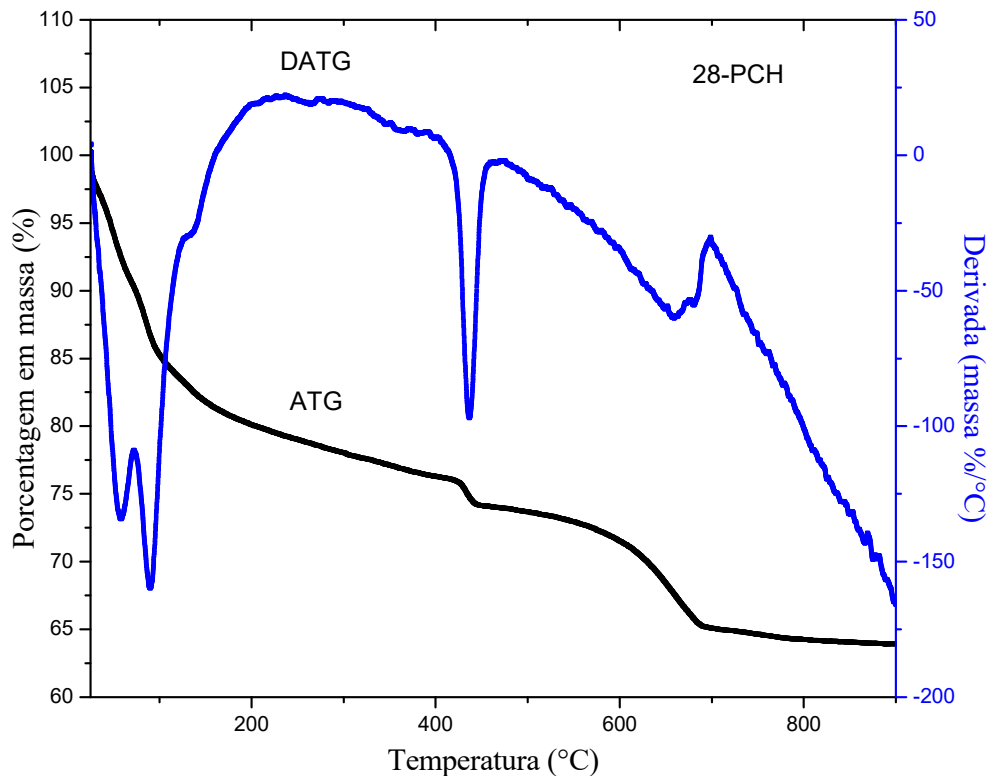


Figura 33: Análise térmica gravimétrica da amostra de PCH após 28 dias de cura e sua derivada.

Na Equação 2.4, Q^1 é um dímero que representa um tetraedro de silicato ligado a quatro átomos de oxigênio, onde um destes átomos de oxigênio está ligado a outra unidade Q , e representa o fim da cadeia de C-S-H. Q^2 representa um grupo intermediário cujo dois dos quatro átomos de oxigênio, estão ligados a duas unidade Q da cadeia de C-S-H. Q_N^0 representa um novo ortosilicato (SiO_4^{4-}). Q_N^1 representa um novo dímero.

5.1.2.3-ESTUDO DA ESTRUTURA E MICROESTRUTURA DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V) DURANTE SUA REIDRATAÇÃO

Amostras de PCR foram preparadas a partir de amostras de 700-PCD e de 900-PCD, em seguida estas foram curadas por 7 dias (7-700-PCR e 7-900-PCR), 14 dias (14-700-PCR e 14-900-PCR), 21 dias (21-700-PCR e 21-900-PCR) e 28 dias (28-700-PCR e 28-900PCR), respectivamente. Estas foram caracterizadas por difração de raios-X (XRD) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (EITF). As amostras de 7-700-PCR, 7-900-PCR, 28-700-PCR e 28-900-PCR foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os difratogramas de raios X da amostra de 700-PCD e das amostras de 700-PCR com diferentes tempos de cura são apresentados na Figura 34. Os difratogramas das amostras de 700-PCR estudadas em todos os tempos de cura apresentam-se semelhantes, contendo picos atribuídos a fase reidratada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e fase de carbonato de cálcio. A presença de produtos de reidratação, como etringita e portlandita nas amostras de 700-PCR em todos os tempos de cura, é comprovada pela presença de picos que correspondem estas fases nos difratogramas destas amostras. Por outro lado, picos atribuídos a fase de CaO não são notados nestes difratogramas. Isto porque quando a água entra em contato com a amostra de PCD, o óxido de cálcio presente reage rapidamente com esta formando hidróxido de cálcio, como representa a Equação 2.5 [84, 79, 94]. A portlandita formada, também é produto de reações de reidratação dos novos nesosilicatos. Reações químicas de carbonatação do hidróxido de cálcio ocorrem durante os dias de cura com o $\text{CO}_{2(g)}$ presente no ar, uma vez que picos relacionados a fase de CaCO_3 estão presentes nos difratogramas das amostras de 700-PCR, a Equação 2.6 representa esta reação.

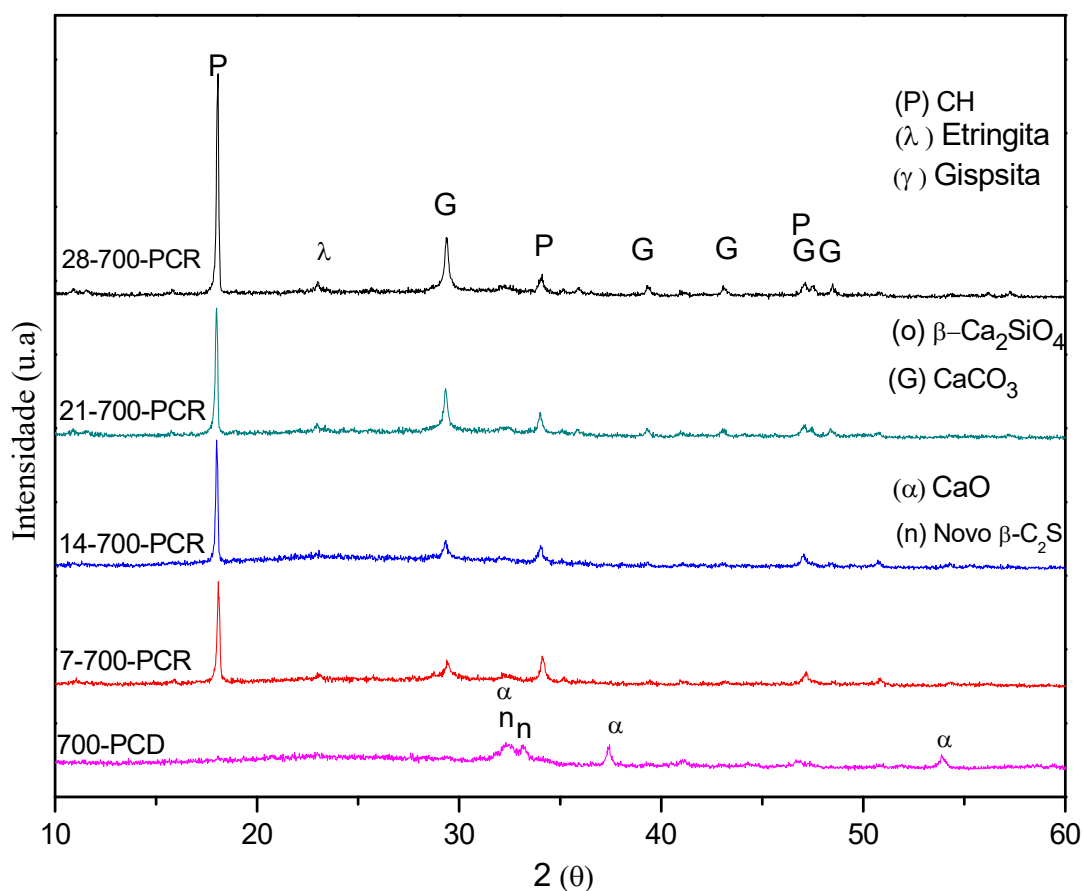


Figura 34: Difratogramas de raios X da amostra de 700-PCD e das amostras de 700-PCR com diferentes tempos de cura



A Figura 35 apresenta os difratogramas da amostra de 900-PCD e das amostras de 900-PCR com diferentes tempos de cura. Os difratogramas das amostras de 900-PCR estudadas em todos os tempos de cura apresentam-se semelhantes, contendo picos atribuídos a fases reidratadas de CH e de carbonato de cálcio [94]. A hidratação incompleta das amostras de 900-PCR, pode ser comprovada pela presença do pico em torno de 32° (2θ) nestes difratogramas, atribuído as fases de novos silicatos de dicálcio.

Os espectros infravermelho da amostra de 700-PCD e das amostras de 700-PCR com diferentes tempos de cura são apresentados na Figura 36.

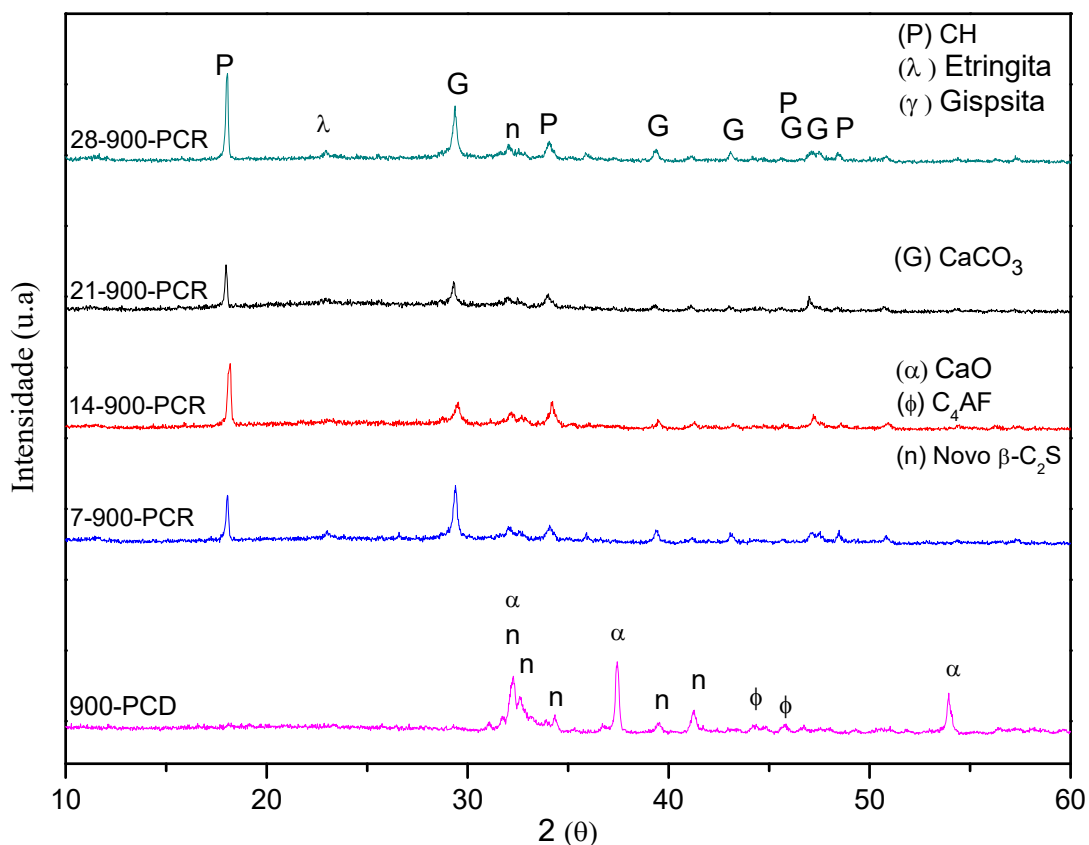


Figura 35: Difratogramas de raios X da amostra de 900-PCD e das amostras de 900-PCR com diferentes tempos de cura.

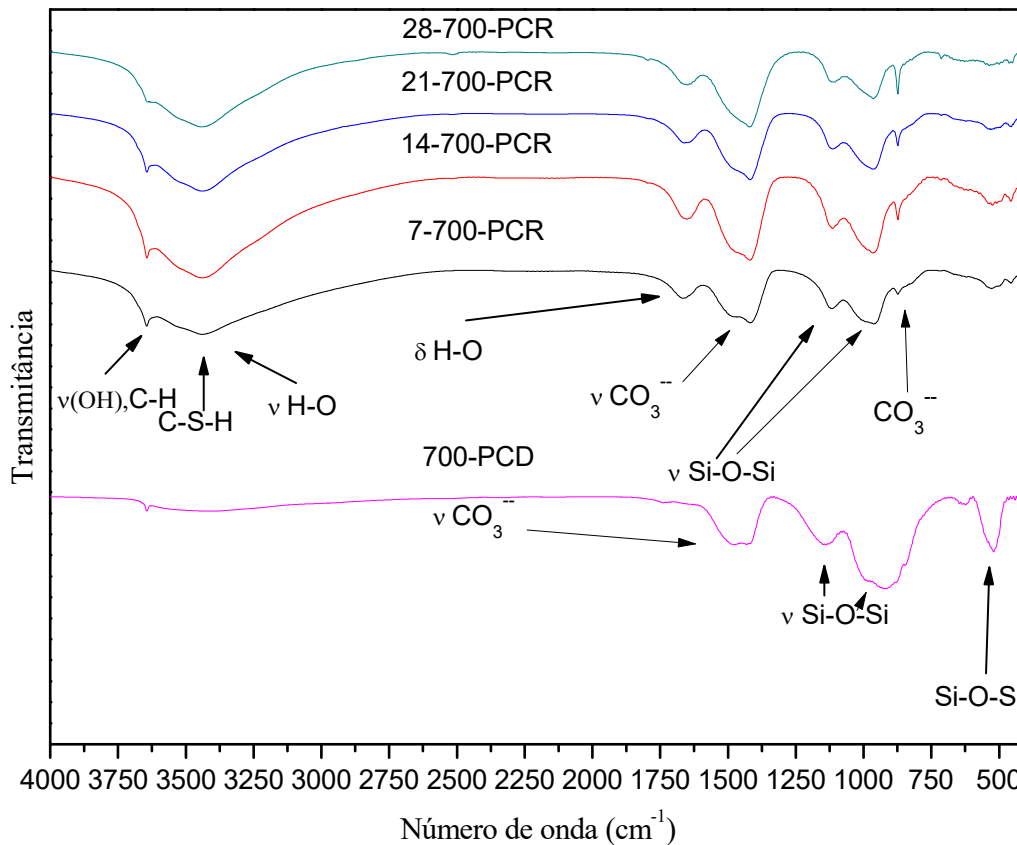
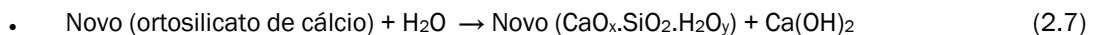


Figura 36: Espectros infravermelho da amostra de 700-PCD e das amostras de 700-PCR com diferentes tempos de cura.

Os espectros das amostras de 700-PCR estudadas em todos os tempos de cura apresentam-se semelhantes, contendo bandas relacionados a fases reidratadas e de carbonato de cálcio. As bandas centradas em 3450 e 1645 cm^{-1} são atribuídas a moléculas de água presente nas amostras. A banda em torno de 3440-3446 cm^{-1} é atribuída ao estiramento das ligações (O-H), presentes na fase do novo C-S-H, produto de reidratação de novos nesossilicatos com razão CaO/SiO_2 próxima do C-S-H original. A Equação 2.7 é uma generalização da representação da reação de reidratação dos novos nesossilicatos.



A presença da banda em 3640 cm^{-1} atribuída a modos vibracionais de estiramento da ligação (O-H) presente na portlandita [95], está relacionada com as reações de reidratação de novos nesossilicatos e do CaO livre. A polimerização das fases formadas por novos silicatos, é comprovada pela banda presente em torno de 965 cm^{-1} atribuída ao estiramento assimétrico das ligações $\nu_{\text{as}}(\text{Si-O})$ presentes nas fases de C-S-H. A Equação 2.8 representa o comportamento dos silicatos durante a reidratação. As bandas em torno de 1497-1425 cm^{-1} , 874 cm^{-1} e 712 cm^{-1} ,

atribuídas aos íons carbonato presentes nas amostras de 700-PCR, confirmam a ocorrência de reações de carbonatação durante os dias de cura.



Na Equação 2.8, Q_N^0 representa os novos ortosilicatos. Q_N^1 representa um novo dímero posicionado ao fim da cadeia do novo C-S-H. Q_N^2 representa um novo grupo intermediário cujo dois dos quatro átomos de oxigênio, estão ligados a duas unidades Q da nova cadeia de C-S-H.

A Figura 37 apresenta os espectros da amostra de 900-PCD e das amostras de 900-PCR com diferentes tempos de cura. Os espectros das amostras de 900-PCR estudadas em todos os tempos de cura apresentam-se semelhantes contendo bandas relacionadas a fases reidratadas da amostra de 900-PCR. A banda em torno de 525 cm^{-1} atribuída a modos vibracionais do íon silicato (SiO_4^{4-}) presente nas fases não reidratadas do cimento pode ser notada em todos os espectros das amostras de 900-PCR.

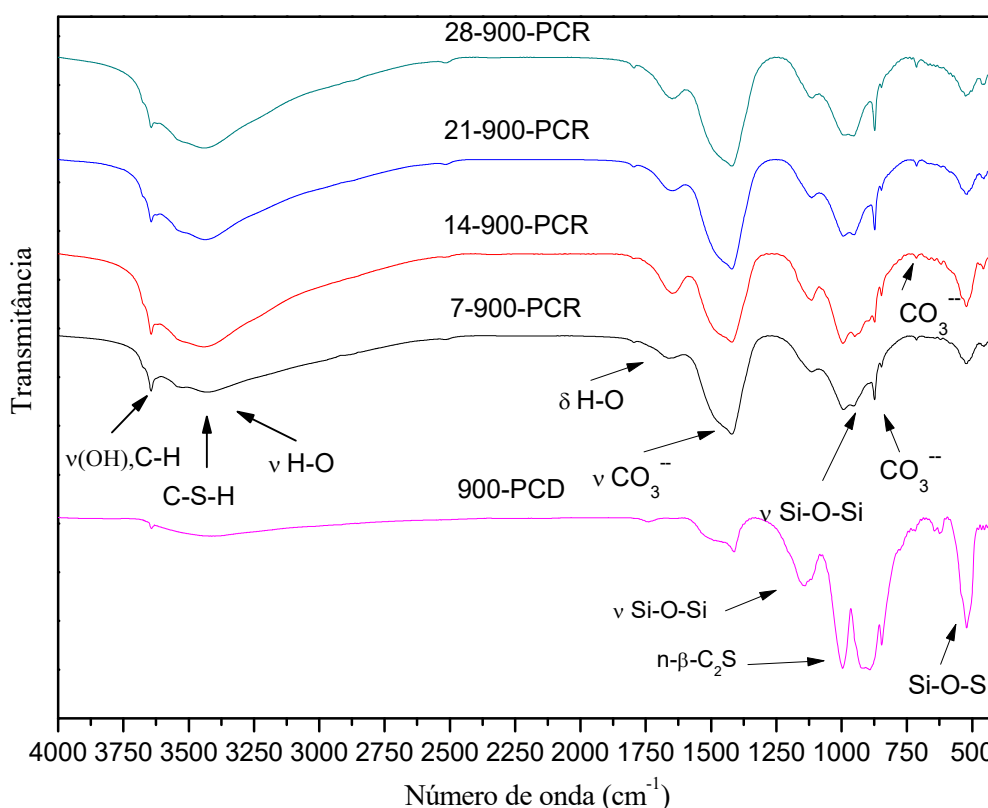
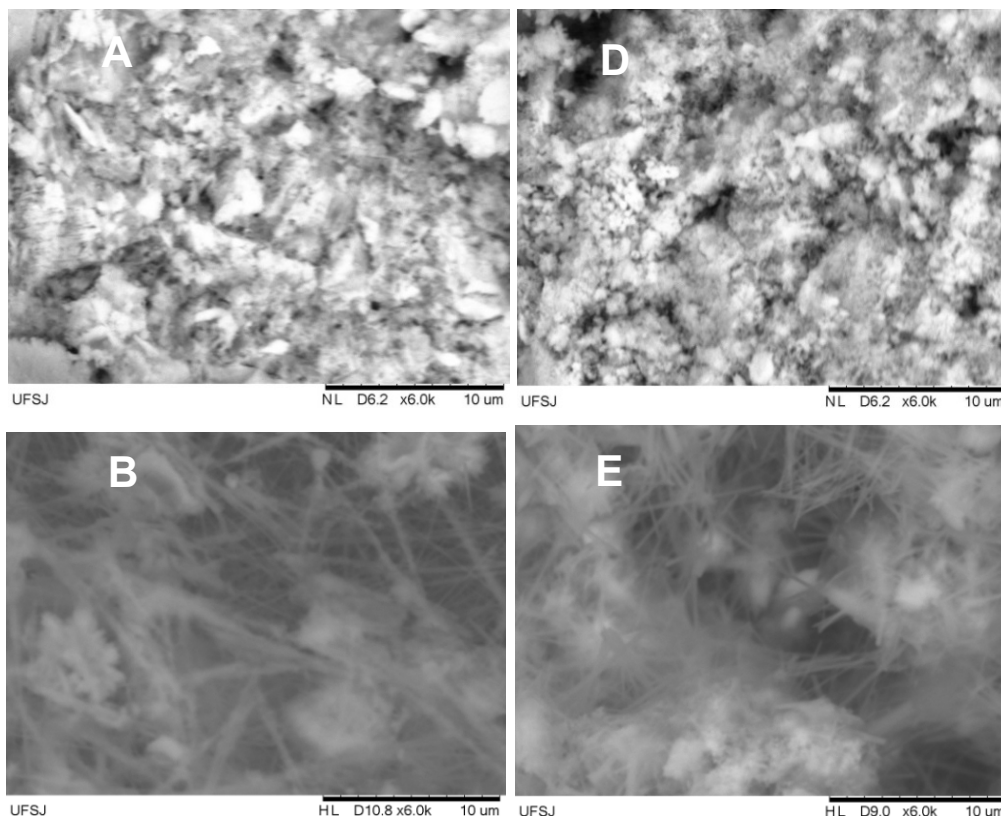


Figura 37: Espectros infravermelho da amostra de 900-PCD e das amostras de 900-PCR com diferentes tempos de cura.

A Figura 38 apresenta as micrografias da amostra de 700-PCD em A, 900-PCD em D, 7-700-PCR em B, 7-900-PCR em E, 28-700-PCR em C e 28-900-PCR em F. A Figura 39 apresenta as micrografias das amostras de 7-700-PCR e de 9-900-PCR com maior ampliação. Com a análise morfológica realizada por meio das micrografias, é possível dizer que as amostras de 700-PCR e de 900-PCR curadas em 7 e 28 dias, apresentam texturas semelhantes, com formação de agulhas de etringita, estrutura em favos de C-S-H. Estes produtos de reidratação não podem ser notados nas micrografias referentes as amostras de 700-PCD e de 900-PCD. Por meio do estudo do comportamento da estrutura e da microestrutura do cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI (CP-V) durante a hidratação em cura ambiente, é possível dizer que a hidratação é incompleta. Com o estudo é possível dizer que, não existem mudanças significativas na estrutura e microestrutura da PCH durante os tempos de cura. A presença de fases anidras na pasta de cimento endurecida comprova esta incompletude.



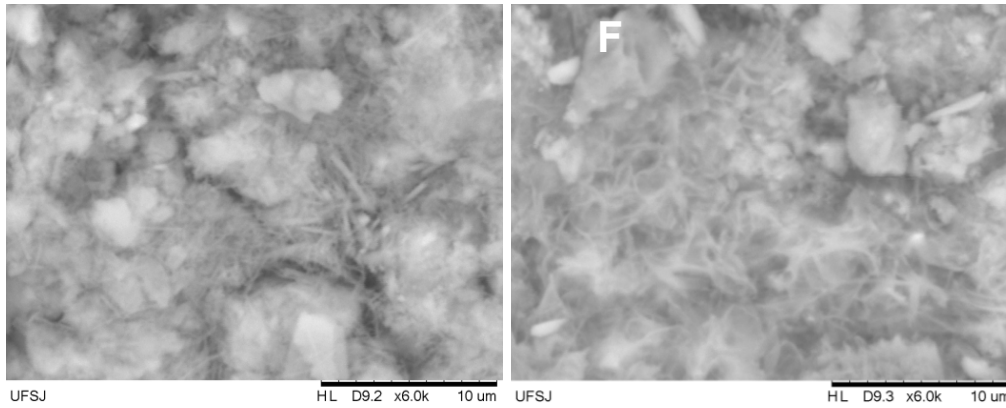


Figura 38: Micrografias das amostras de 700-PCD em A, 7-700-PCR em B, 28-700-PCR em C, 900-PCD em D, 7-900-PCR em E, e de 28-900-PCR em F.

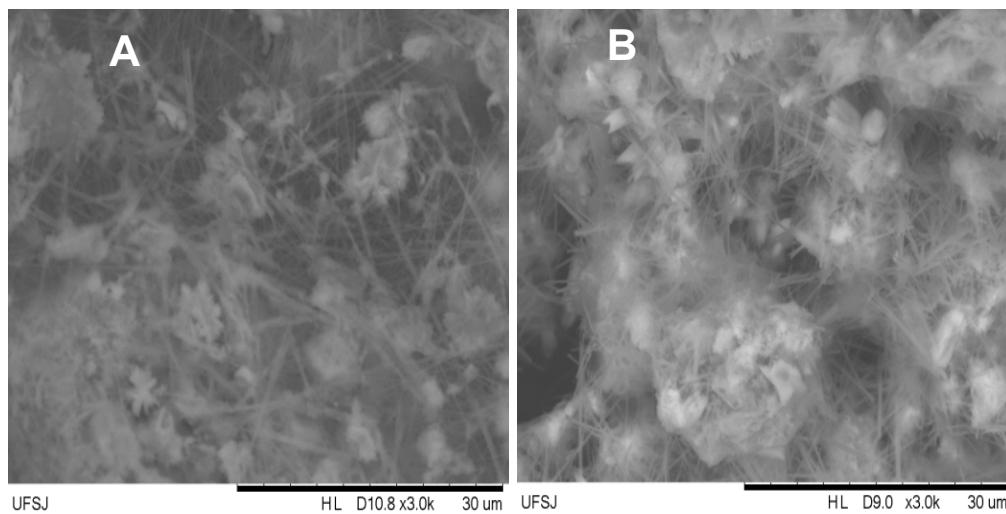


Figura 39: Micrografias das amostras de 7-700-PCR em A e de 7-900-PCR em B.

O estudo do comportamento da estrutura e microestrutura durante a desidratação da PCH curada ao ambiente obtida partindo de cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI (CP-V) e água, permite comprovar a formação de novos nesosilicatos com estrutura próxima da β -C₂S em temperaturas de 700 e 900 °C. Com o estudo de reidratação dos PCD desta pasta, foi possível comprovar a formação dos principais produtos de reidratação envolvidos no processo de obtenção da PCR, sem mudanças significativas durante os tempos de cura. O estudo de reidratação do PCD também permite dizer que a reidratação de pós de cimento desidratados obtidos a 900 °C não é completa. O estudo também mostrou que reações de carbonatação ocorrem durante o processo de reidratação das amostras de PCD.

5.1.2.4-ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS PARA CORPOS DE PROVA DE PCH

Corpos de prova de PCH curados por 7, 14, 21 e 28 dias, foram submetidos a ensaios físicos de absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, densidade volumétrica, permeabilidade e ensaios mecânicos de resistência à compressão.

A Figura 40 apresenta o comportamento da absorção de água e da porosidade aparente para corpos de prova de PCH com diferentes tempos de cura. É possível notar, uma pequena redução da média destas propriedades para os corpos de prova durante o período de cura. Já que corpos de prova de PCH após 28 dias de cura apresentam uma redução da absorção de água média de 1,3%, e da porosidade aparente média de 1,72%, em relação aos corpos de prova PCH curados por 7 dias. Os corpos de prova aos 28 dias de cura apresentam absorção de água média de 5,81%, e porosidade aparente média de 10,23%. Contudo, considerando o desvio padrão, não é possível notar uma redução significativa destas propriedades para corpos de prova de PCH com o avanço dos dias de cura. Com o decorrer do período de hidratação de uma pasta de cimento, hidratos de cimento, como por exemplo, estruturas de C-S-H com diferentes razões CaO/SiO_2 , Ca(OH)_2 e $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, preenchem os espaços vazios da pasta levando a um decréscimo em sua porosidade, contribuindo assim para a densificação da pasta [96, 97]. Ao mesmo tempo, a água livre contribui para a formação de poros durante o processo de evaporação. Assim, tanto a formação de hidratos de cimento, como a água evaporável presente na PCH estudada em cada tempo de cura, influenciam a magnitude destes resultados. Desta forma, de acordo com os resultados apresentados na Figura 40, é possível dizer que não houve acentuada evaporação de água da PCH, e nem acentuada formação de produtos de hidratação em poros abertos presentes na pasta, do 7° ao 28° dia de cura. Também é possível mencionar que a água pode penetrar nos poros abertos existentes na PCH.

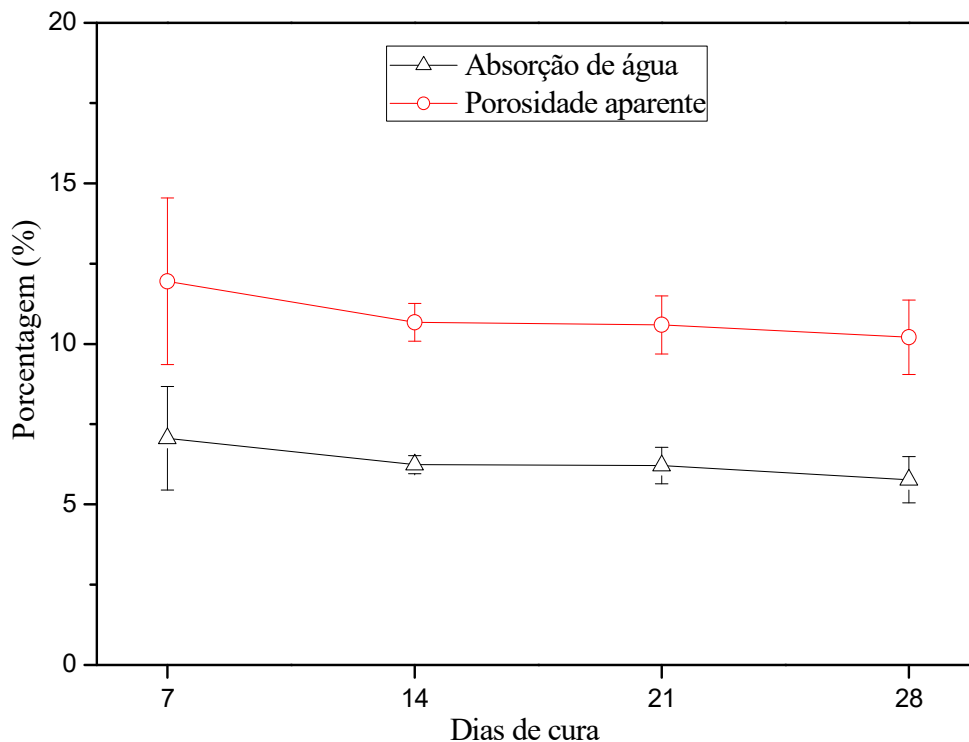


Figura 40: Comportamento da Absorção de água e da porosidade aparente para corpos prova de PCH com diferentes tempos de cura

O comportamento da densidade aparente e da densidade volumétrica, para corpos de prova de PCH com diferentes tempos de cura é apresentado na Figura 41. Os corpos de prova de 7-PCH apresentam densidade aparente média de $1,92 \text{ g/cm}^3$ e densidade volumétrica média de $1,69 \text{ g/cm}^3$. Já os corpos de prova de PCH após 28 dias de cura, apresentam densidade aparente média de $1,94 \text{ g/cm}^3$ e densidade volumétrica média de $1,72 \text{ g/cm}^3$. Considerando o desvio padrão, é possível notar que não ocorrem mudanças significativas destas propriedades para corpos de prova de PCH durante os dias de cura. Com o tempo de hidratação de uma pasta de cimento ocorre a formação de hidratos do clínquer em poros fechados. $\text{Si}_5\text{O}_{16}^{12-}$ e $\text{Si}_8\text{O}_{25}^{16-}$ são exemplos da combinação de tetraedros de SiO_4^{4-} presentes em silicato de cálcio hidratado, que em adição aos hidratos de C_3A e de C_4AF contribuem para o aumento da densidade do volume da PCH excluindo poros abertos [67]. Sendo assim, de acordo com os resultados apresentados na Figura 41, é possível dizer que não houve hidratação significativa do volume impermeável da PCH, durante o período de cura. Em complemento aos resultados de absorção de água e de porosidade aparente para PCH, a densidade volumétrica aponta que não houve a formação acentuada de hidratos de cimento em poros na PCH, do 7° ao 28° dia de cura.

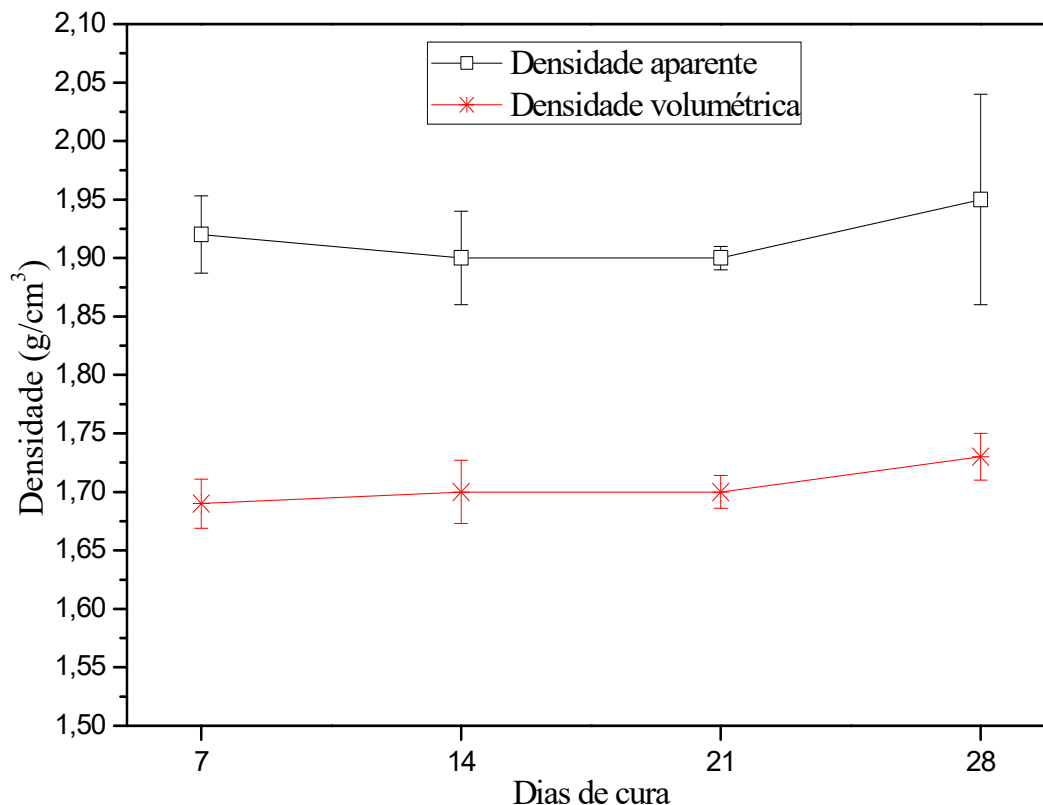


Figura 41: Comportamento da Densidade aparente e da densidade volumétrica para corpos de prova com diferentes tempos de cura

A permeabilidade ao oxigênio para corpos de prova de PCH durante os dias de cura pode ser observada na Figura 42. As médias desta propriedade apresentam uma pequena oscilação durante os dias de cura, provavelmente devido a alguma retração por secagem durante este período. Mas de uma forma geral, considerando o desvio padrão destes resultados, não ocorrem variações significativas da permeabilidade para corpos de prova de PCH com o avanço do tempo de cura. A capacidade que uma PCH tem de ser transpassada por fluxo de gás oxigênio reduz com o tempo de hidratação, uma vez que os poros interconectados podem não apenas reduzir o seu tamanho, mas também apresentar estrangulamento. Já que hidratos β -C₂S e C₃S podem tomar lugar nestes capilares [97,98]. Desta forma, de acordo com os resultados apresentados na Figura 42, é possível dizer que os poros interconectados presentes na PCH não apresentam mudanças significativas durante os 28 dias de cura. Este fato pode ser associado a um rendimento não significativo das reações de hidratação durante o período de cura.

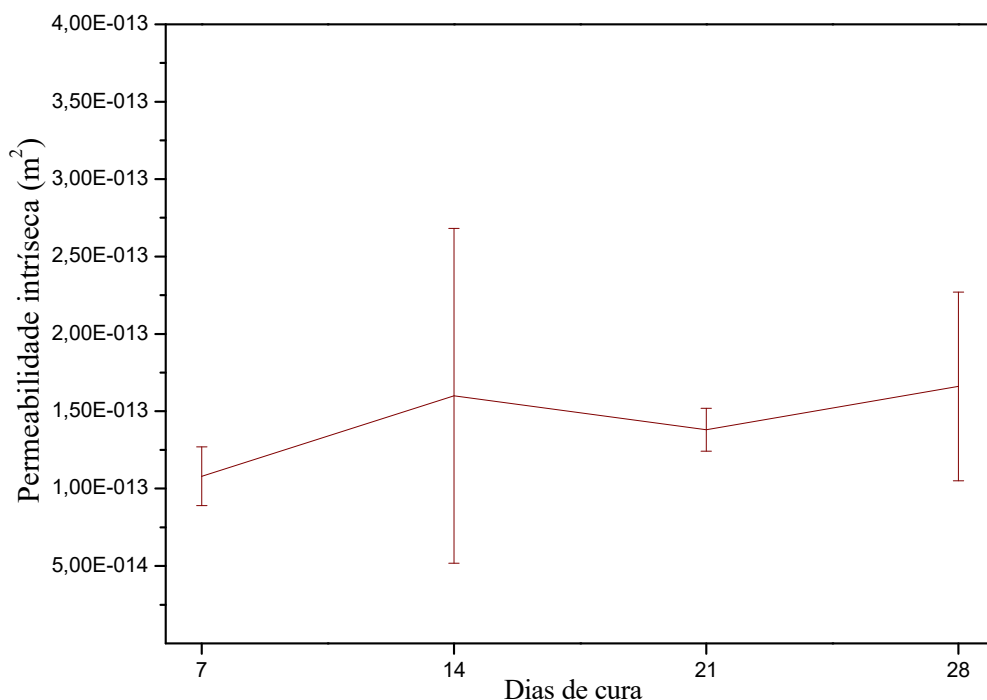


Figura 42: Comportamento da Permeabilidade ao oxigênio para corpos de prova com diferentes tempos de cura.

De acordo com os resultados dos ensaios físicos apresentados, é possível dizer que os poros presentes na PCH não apresentam mudanças significativas durante os 28 dias de cura. Este fato pode ser associado a um rendimento não significativo das reações de hidratação durante este período.

A Figura 43 apresenta o comportamento da resistência à compressão para corpos de prova de PCH com diferentes tempos de cura. Ao 28º dia de cura, os corpos de prova apresentam resistência à compressão média de 26,55 MPa, tendo um aumento de 16,38% em relação à resistência média apresentada para corpos de prova com 7 dias de cura. Sendo assim, os corpos de prova de PCH estudados em todos os dias de cura, não apresentam uma resistência à compressão superior a resistência considerada média baixa (20-45 MPa) pela construção civil [29]. De acordo com o desvio padrão, é possível notar que não ocorre aumento significativo na resistência à compressão durante os tempos de cura para os corpos de prova de PCH.

A Figura 44 apresenta o comportamento do módulo de elasticidade para corpos de prova de PCH com diferentes tempos de cura. O módulo de elasticidade assume comportamento semelhante ao comportamento da resistência à compressão, para os corpos de prova de PCH durante o período de cura.

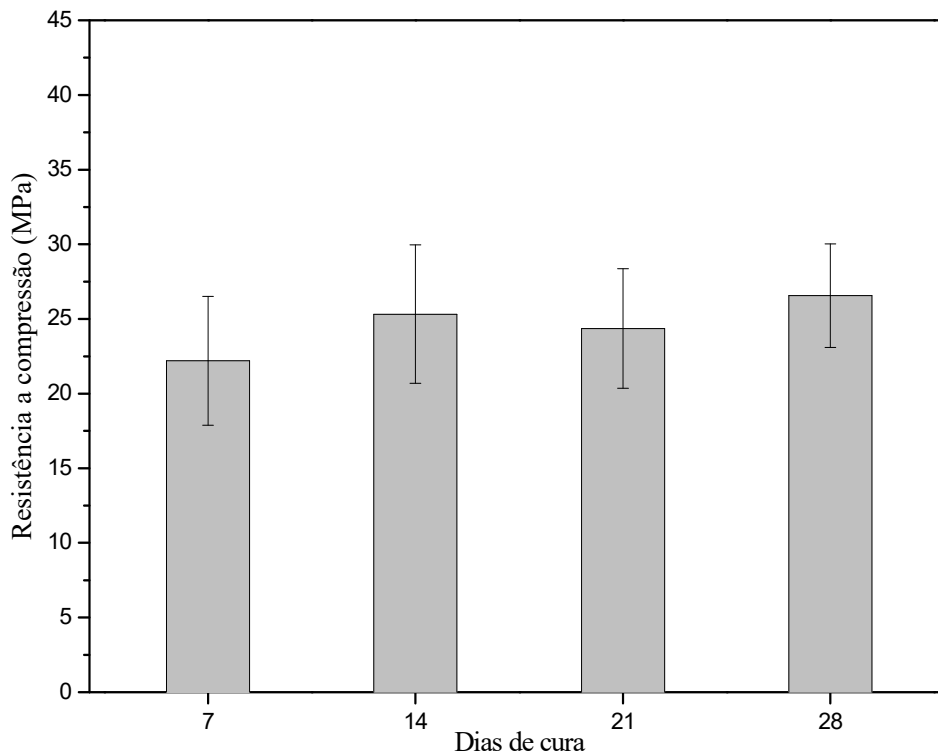


Figura 43: Resistência mecânica à compressão para corpos de prova de PCH com diferentes tempos de cura.

De uma forma geral, o preparo, o tipo de cimento e as condições de cura de uma pasta de cimento Portland tem influência em suas propriedades mecânicas [96, 99, 100]. O comportamento das propriedades mecânicas dos corpos de prova de PCH durante o período de cura, não está relacionado apenas com a porosidade da PCH, mas também com o rendimento das reações de hidratação nesta. Uma vez que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) proporciona rigidez a PCH por meio de forças de dipolo-induzido, contribuindo para as propriedades mecânicas desta. Neste contexto, o C-S-H pode ser encontrado na forma de $[\text{Ca}_4(\text{Si}_3\text{O}_9\text{H})_2]\text{Ca} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ e na forma de $[\text{Ca}_8(\text{Si}_3\text{O}_9\text{H})_2(\text{OH})_8]\text{Ca} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ onde estas cadeias podem se interagir por meio de campos eletromagnéticos. Embora em menor intensidade, outros produtos de hidratação também contribuem para as propriedades mecânicas da PCH, como por exemplo, hidratos de alumínio na forma de C_2AH_8 e C_4AH_{19} . Desta forma, de acordo com os resultados apresentados nas Figuras 43 e 44, é possível dizer que não ocorreu significativa hidratação durante o período de cura, a ponto de influenciar a resistência mecânica.

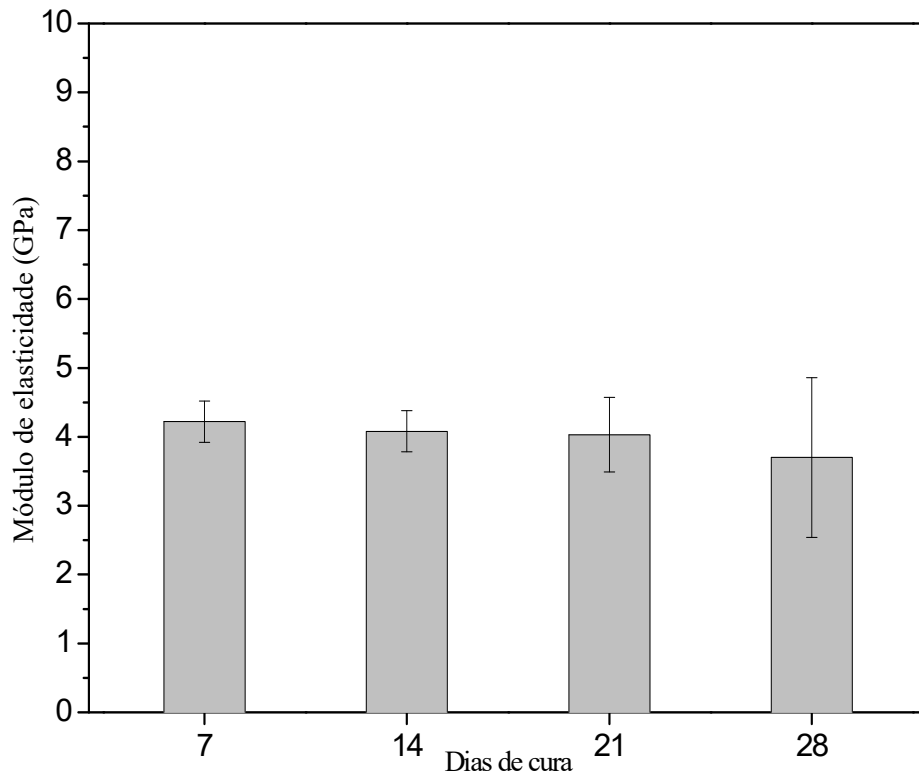


Figura 44: Módulo de elasticidade para corpos de prova de PCH com diferentes tempos de cura.

5.1.2.5-ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DA MICROESTRUTURA PARA CORPOS DE PROVA DE PCR

Corpos de prova de pasta de cimento preparados a partir de 2, 5, 10, 20, 40, 50 e 60% de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V, foram nomeados 2-700-PCR, 2-900-PCR, 5-700-PCR, 5-900-PCR, 10-700-PCR, 10-900-PCR, 20-700-PCR, 20-900-PCR, 40-700-PCR, 40-900-PCR, 50-700-PCR, 50-900-PCR, 60-900-PCR e 60-900-PCR, respectivamente. Após 28 dias, estes foram submetidos a ensaios físicos de absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, densidade volumétrica e ensaios mecânicos de resistência à compressão. Os corpos de prova de 20-700-PCR, 40-700-PCR e 60-700-PCR também foram caracterizados por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e submetidos a ensaios físicos de permeabilidade.

A Figura 45 apresenta o comportamento da absorção de água para corpos de prova de PCH após 28 dias de cura e para corpos de prova preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V. Corpos de

prova preparados com até 40% de PCD obtidos a 700 e 900 °C, apresentam médias próximas com tendência ascendente desta propriedade. Corpos de prova de 2-700-PCR e de 2-900-PCR apresentam absorção de água média de 4,54 e de 3,31%, respectivamente. Corpos de prova de 10-700-PCR e de 10-900-PCR apresentam diferença das médias desta propriedade de 1,25%. Os corpos de prova de 40-700-PCR e de 40-900-PCR, também apresentam valores médios aproximados de absorção de água assumindo 8,19 e 7,24%, respectivamente. Por outro lado, corpos de prova de 50-700-PCR e de 50-900-PCR não apresentam esta proximidade das médias desta propriedade, apresentando assim uma diferença de 4,52%. Este comportamento se acentua para corpos de prova preparados a partir de 60% de PCD, já que corpos de prova de 60-700-PCR apresentam absorção de água média de 11,95% enquanto corpos de prova de 60-900-PCR apresentam média de 31,19% desta propriedade.

A Figura 46 apresenta o comportamento da porosidade aparente, semelhante ao comportamento da absorção de água para corpos de prova de PCH após 28 dias de cura e para corpos de prova preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD. Corpos de prova de 2-700-PCR e de 2-900-PCR apresentam porosidade aparente média de 5,9 e de 7,98%, respectivamente. Corpos de prova de 10-700-PCR e de 10-900-PCR apresentam diferença das médias desta propriedade de 2,01%. Corpos de prova de 40-700-PCR e de 40-900-PCR também apresentam valores médios aproximados da porosidade aparente assumindo 12,46 e 14,27%, respectivamente. Contudo, corpos de prova de 50-700-PCR e de 50-900-PCR não apresentam esta proximidade das médias desta propriedade, apresentando uma diferença de 6,15%. Este comportamento se acentua para corpos de prova preparados a partir de 60% de PCD, uma vez que corpos de prova de 60-700-PCR apresentam porosidade aparente média de 19,3%, e corpos de prova de 60-900-PCR apresentam média de 39,39% desta propriedade. Considerando o desvio padrão, corpos de prova preparados com até 40% de 900-PCD e com até 50% de 700-PCD, não apresentam diferenças significativas tanto da absorção de água como da porosidade aparente. Já corpos de prova de 50-900-PCR e de 60-700-PCR apresentam maiores absorção de água e porosidade aparente. E corpos de prova de 60-900-PCR maiores ainda. A viscosidade de uma pasta de cimento contendo PCD aumenta devido a reatividade deste pó frente à água [73, 76], o que leva a formação de poros devido a baixa fluidez durante a preparação da pasta de cimento.

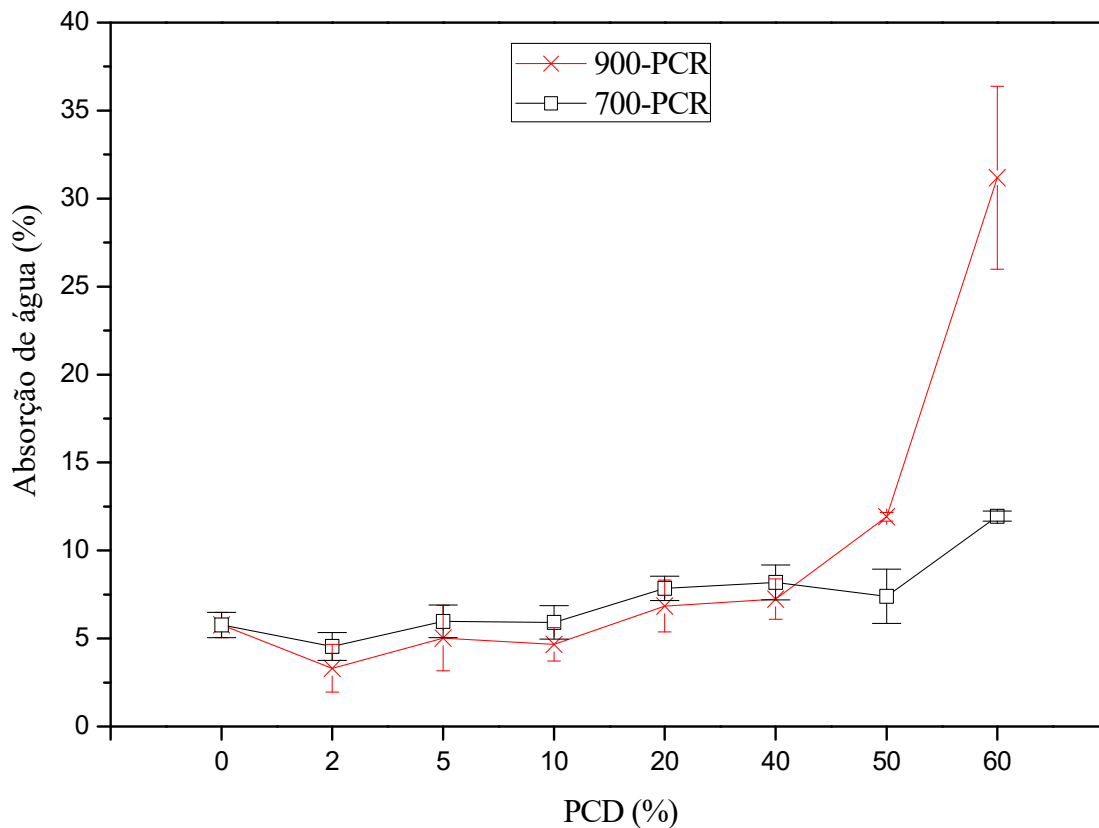


Figura 45: Comportamento da Absorção de água para corpos de prova de pasta de cimento preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 45 e 46 é possível dizer que, corpos de prova preparados com até 40% de 900-PCD e com até 50% de 700-PCD, não apresentam acentuada formação de produtos de hidratação e de reidratação em poros aberto, como por exemplo, C-S-H, novo C-S-H e Ca(OH)_2 . Corpos de prova preparados com até 40 e 50% de PCD, também não apresentam aumento significativo de poros abertos. Estes resultados mostram que o uso de PCD em elevadas concentrações, assim como o uso de PCD obtido a altas temperaturas na preparação da pasta de cimento, leva a formação de poros abertos. Isto devido a elevada reatividade, tanto dos novos ortosilicatos de cálcio com estrutura próxima da $\beta\text{-C}_2\text{S}$, como do CaO presente na pasta de cimento.

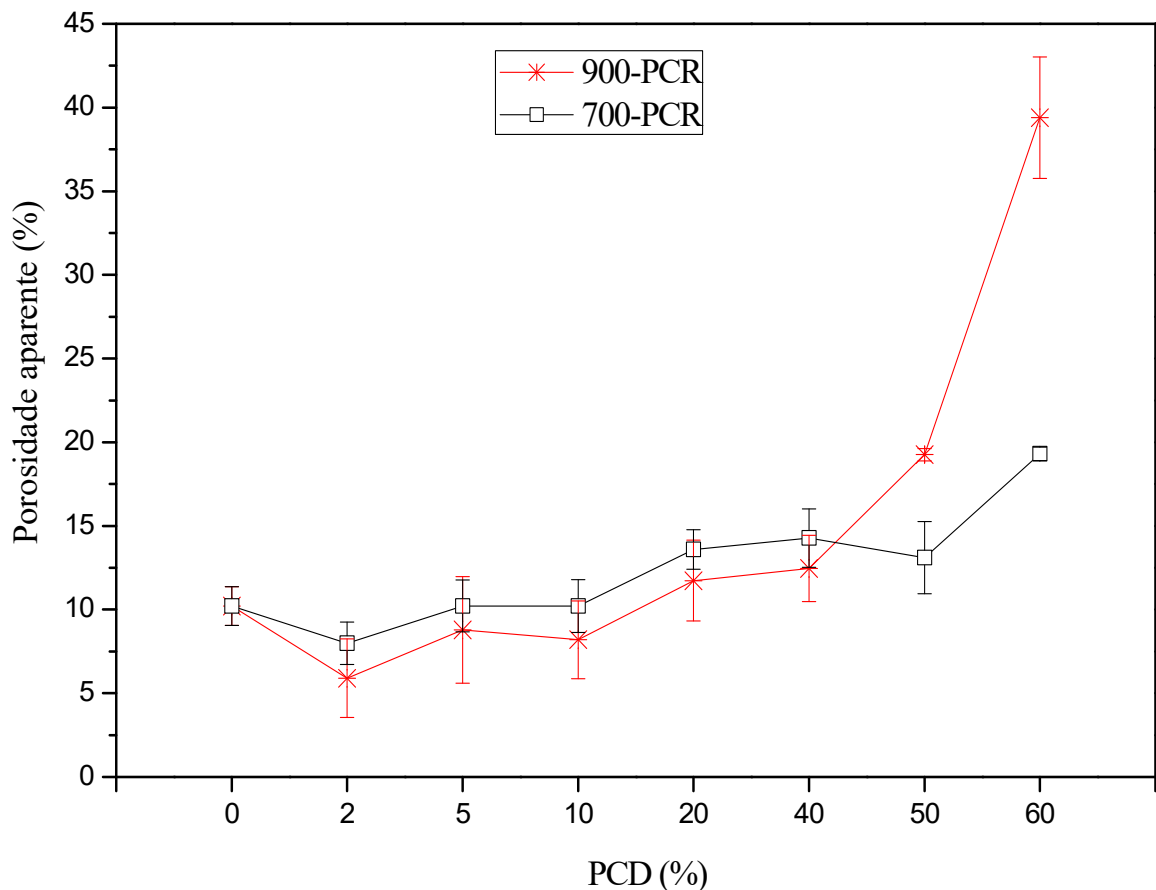


Figura 46: Comportamento da Porosidade aparente para corpos de prova de pasta de cimento preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V.

A Figura 47 apresenta o comportamento da densidade aparente, para corpos de prova de PCH após 28 dias de cura e para corpos de prova preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V. Corpos de prova preparados com todas as concentrações de PCD obtidos a 700 e a 900°C, apresentam médias próximas e comportamento aleatório desta propriedade. Corpos de prova de 2-700-PCR e de 2-900-PCR apresentam densidade aparente média de 1,91 e 1,88 g/cm³, respectivamente. Corpos de prova de 5-700-PCR e de 5-900-PCR apresentam uma diferença das médias desta propriedade de 0,03 g/cm³. Corpos de prova de 20-700-PCR e de 20-900-PCR, também apresentam valores médios aproximados de densidade aparente assumindo 1,97 e 1,94 g/cm³, respectivamente. Corpos de prova de 50-700-PCR e de 50-900-PCR apresentam uma diferença das médias da densidade aparente de 0,02 g/cm³. Corpos de prova preparados a partir de 60% de PCD obtidos a 700 e a 900°C apresentam uma diferença das médias desta propriedade de 0,07 g/cm³. Considerando o desvio padrão não houve variação da densidade aparente para corpos de prova preparados

com até 50 % de PCD. Embora corpos de prova preparados com 60% de 700-PCD e de 900-PCD não tenham apresentado valores comuns desta propriedade no desvio padrão, a diferença da média desta propriedade entre eles não é acentuada. Durante o preparo de uma PCR, obtida a partir de PCD, ocorre a incorporação de ar na mesma, devido o aumento da viscosidade desta [81]. De acordo com os resultados apresentados na Figura 47, não ocorre a formação acentuada de poros fechados nas PCR com o aumento da concentração de PCD utilizado na preparação destas. Nem tão pouco a formação acentuada de produtos de hidratação e de reidratação, como aqueles formados por reações de polimerização envolvendo íons SiO_4^{4-} .

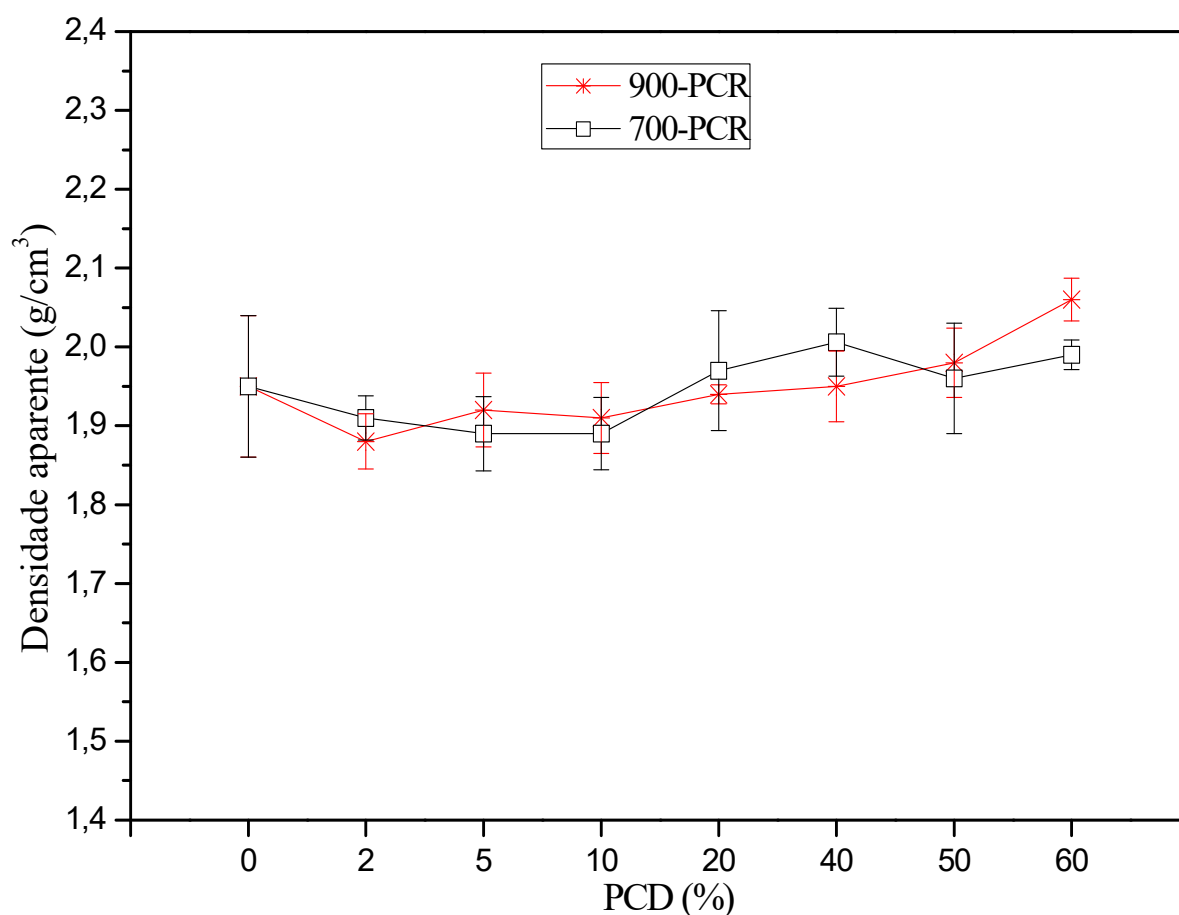


Figura 47: Comportamento da Densidade aparente para corpos de prova de pasta de cimento preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V.

A Figura 48 apresenta o comportamento da densidade volumétrica, para corpos de prova de PCH após 28 dias de cura e para corpos de prova preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V. Corpos de prova preparados com até 40% de PCD obtidos a 700 e 900 °C, apresentam médias próximas com tendência descendente desta propriedade. Corpos de prova de 2-700-

PCR e de 2-900-PCR apresentam densidade volumétrica média de 1,75 e de 1,77 g/cm³, respectivamente. Corpos de prova de 10-700-PCR e de 10-900-PCR apresentam diferença das médias desta propriedade de 0,02 g/cm³. Corpos de prova de 40-700-PCR e de 40-900-PCR assumem os mesmos valores médios da densidade volumétrica, 1,71 g/cm³. Por outro lado, corpos de prova de 50-700-PCR e de 50-900-PCR apresentam diferença das médias desta propriedade de 0,2 g/cm³. Este comportamento ainda é mais acentuado para corpos de prova preparados a partir de 60% de PCD, já que corpos de prova de 60-700-PCR apresentam densidade volumétrica média de 1,6 g/cm³ e corpos de prova de 60-900-PCR apresentam média de 1,27 g/cm³ desta propriedade. Considerando o desvio padrão, corpos de prova preparados com até 40% de 900-PCD e com até 50% de 700-PCD, não apresentam diferenças significativas da densidade volumétrica. Já corpos de prova de 50-900-PCR e de 60-700-PCR apresentam menores densidades volumétricas. E corpos prova de 60-900-PCR menores ainda. De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 48, é possível dizer que, corpos de prova preparados com até 40% de 900-PCD e com até 50% de 700-PCD, não apresentam acentuada formação de produtos de hidratação e de reidratação em poros. Também é possível dizer que corpos de prova preparados com maiores concentrações de PCD obtidos a 700 e 900°C, apresentam queda da densidade volumétrica. Isto ocorre devido ao efeito reativo dos novos nesosilicatos e CaO, que nestas condições se pronuncia. Estes ocasionam aumento da viscosidade com consequente aumento de espaços vazios na pasta.

O comportamento da permeabilidade ao oxigênio, para corpos de prova preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V, é apresentado na Figura 49. Corpos de prova preparados a partir de 20% de PCD apresentam menores valores de permeabilidade média que corpos de prova de PCH. Corpos de prova de 20-700-PCR e de 20-900-PCR apresentam valores médios de permeabilidade aproximados, assumindo $7,35 \times 10^{-14}$ e $1,23 \times 10^{-13}$ m², respectivamente. Corpos de prova de 40-700-PCR apresentam a permeabilidade média de $3,7 \times 10^{-13}$ m², sendo superior a permeabilidade média apresentada para corpos de prova de 40-900-PCR, que por sua vez é de $7,45 \times 10^{-14}$ m². Com a análise dos resultados também é possível notar que, corpos de prova de 20-700-PCR e de 40-700-PCR apresentam valores médios de permeabilidade aproximados. Já corpos de prova preparados com 60% de 700-PCD, apresentam permeabilidade média de

$2,46 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ e corpos de prova preparados com 60% de 900-PCD, apresentam permeabilidade média de $7,7 \times 10^{-13} \text{ m}^2$. Considerando o desvio padrão, corpos de prova de 20-700-PCR e de 40-700-PCR apresentam menor permeabilidade que corpos de prova de PCH. Por outro lado, corpos de prova de 60-900-PCR apresentam maior permeabilidade que corpos de prova de PCH.

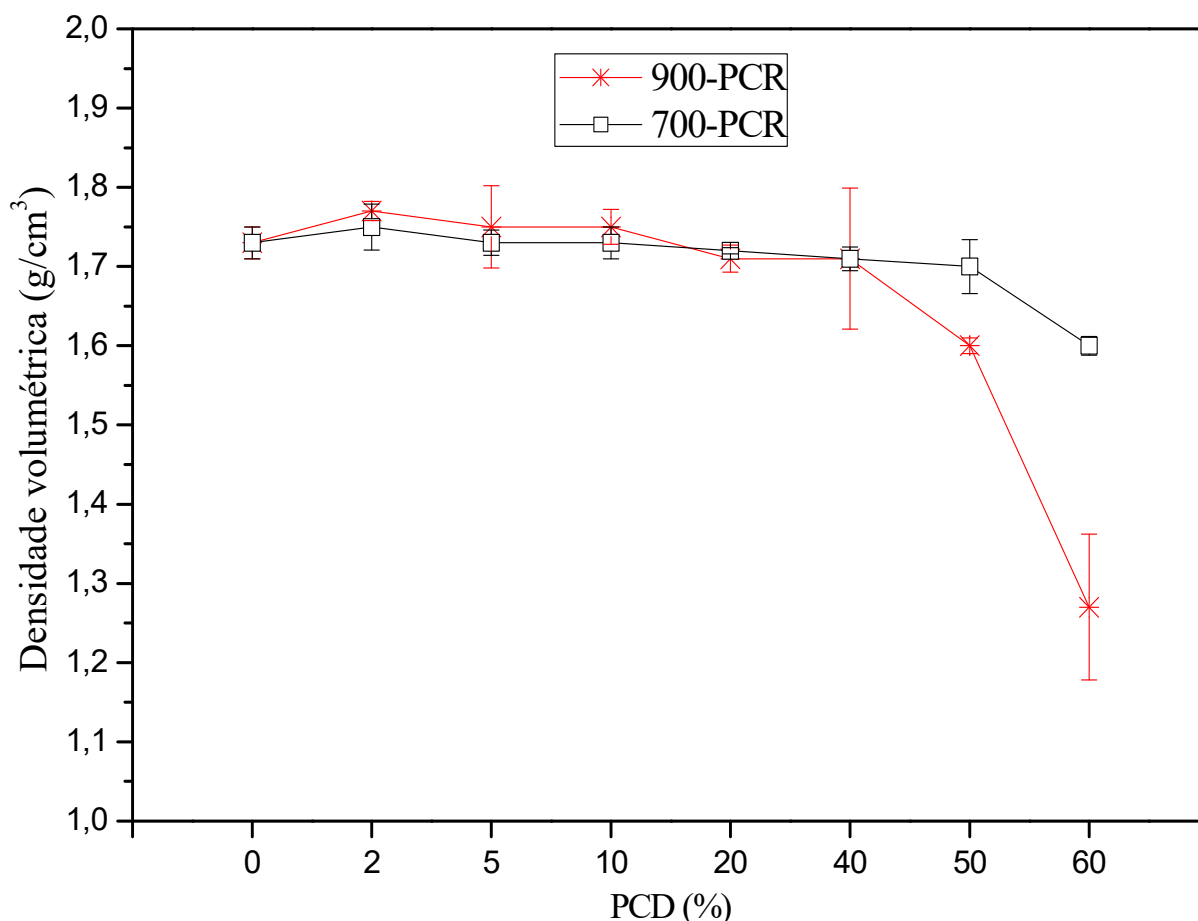


Figura 48: Comportamento da Densidade volumétrica para corpos de prova de pasta de cimento preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e 900-PCD em relação ao CP-V.

Desta forma, de acordo com os resultados apresentados na Figura 49, é possível dizer que corpos de prova preparados a partir de 20 e 40% de 700-PCD, apresentam menor quantidade de poros interconectados que corpos de prova de PCH e de 60-700-PCR. Isto porque, nestes casos pode ter ocorrido estrangulamento de poros interconectados por meio da formação de produtos de hidratação e de reidratação, ou carbonatação com formação de $\text{CaCO}_3(\text{s})$ [69]. Corpos de prova de 60-900-PCR apresentam maior permeabilidade média em relação aos corpos de prova preparados com todas as concentrações de PCD. Isto está relacionado à elevada viscosidade da pasta, que por sua vez permitiu a formação de poros interconectados.

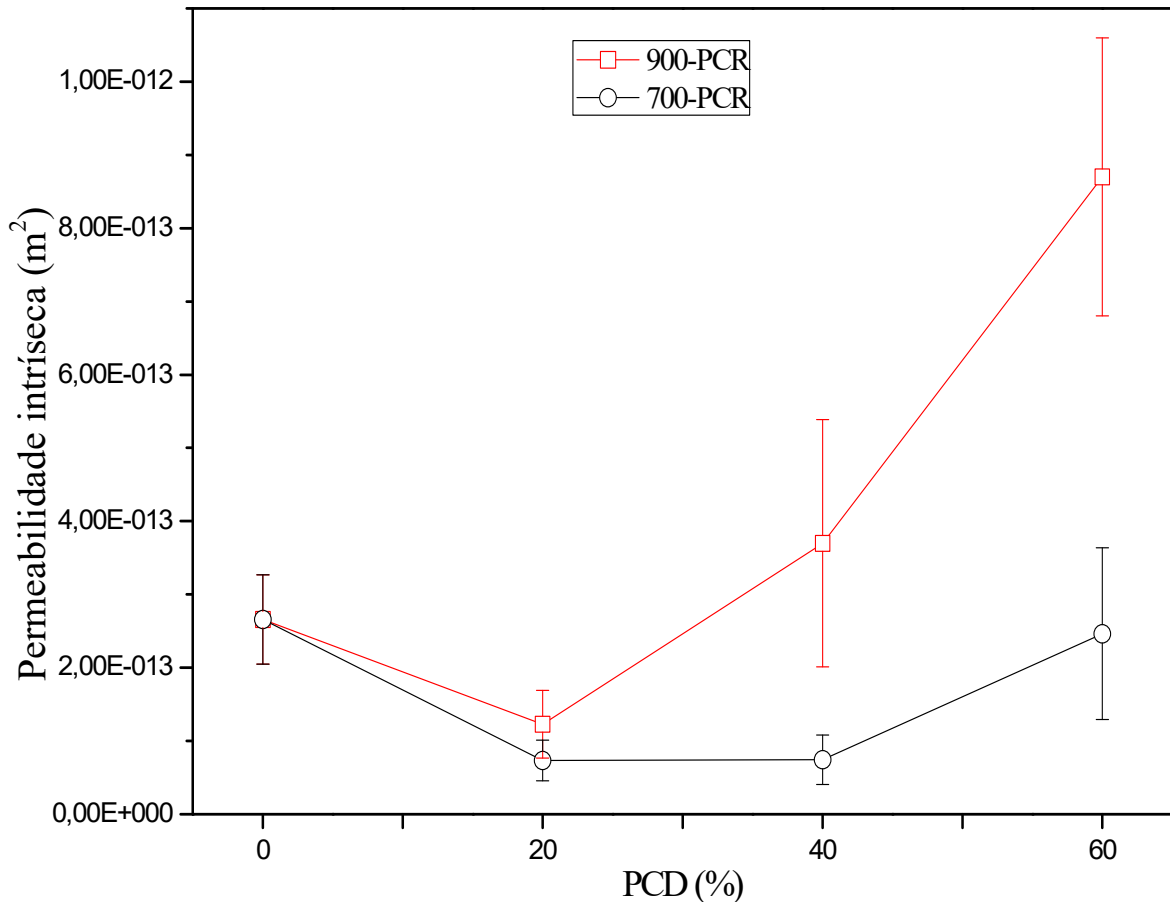


Figura 49: Comportamento da permeabilidade ao oxigênio para corpos de prova de pasta de cimento preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V.

A Figura 50 apresenta o comportamento da resistência à compressão para corpos de prova de pasta de cimento, preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V, respectivamente. Corpos de prova preparados com até 40% de PCD apresentam médias próximas de resistência à compressão. Corpos de prova de 5-700-PCR e de 5-900-PCR apresentam resistência à compressão média de 22,44 e de 28,71 MPa, respectivamente. Corpos de prova preparados com 10% de 700-PCD e de 900-PCD, apresentam diferença das médias desta propriedade de 2,74 MPa. Corpos de prova de 40-700-PCR e de 40-900-PCR, apresentam resistência à compressão média de 22,51 e de 21,49 MPa, respectivamente. Já a resistência a compressão média, para os corpos de prova de 50-700-PCR é de 14,22 MPa, e para os corpos de prova de 50-900-PCR é de 7,41 MPa. Corpos de prova de 60-700-PCR apresentam resistência à compressão média próxima a resistência média apresentada para corpos de 50-

900-PCR. Corpos de prova preparados com 60% de 900-PCD apresentam a menor resistência à compressão média, 0,2 MPa. Considerando o desvio padrão, corpos de prova preparados com até 40% de 900-PCD e com até 50% de 700-PCD, não apresentam diferenças significativas desta propriedade.

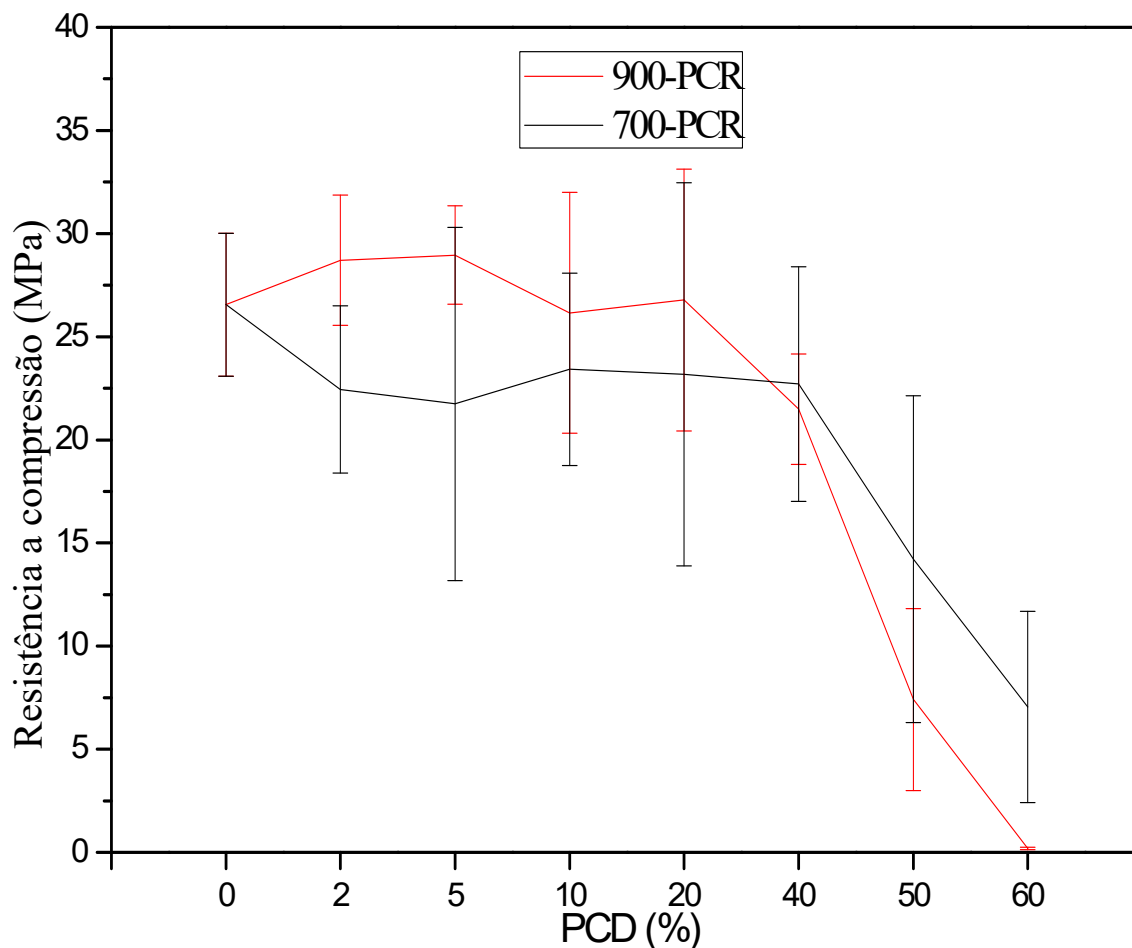


Figura 50: Resistência à compressão para corpos de prova de pasta de cimento preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V.

A Figura 51 apresenta o comportamento do módulo de elasticidade para corpos de prova de pasta de cimento, preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V, respectivamente. O módulo de elasticidade assume comportamento semelhante ao comportamento da resistência à compressão, para corpos de prova preparados a partir de diferentes concentrações de PCD. Silicatos de cálcio hidratado, com diferentes razões Ca/SiO_4 presentes em uma PCH contribuem para a resistência à compressão e para o módulo de elasticidade, não apenas preenchendo estes espaços vazios na pasta, mas também por meio de forças de interação eletrostática do tipo Van der Waals [96, 97, 100].

Quando a água entra em contato com o PCD, pequenas partículas de PCD reagem rapidamente com esta, levando a formação de Ca(OH)_2 , de etringita e de um novo gel de C-S-H com razão CaO/SiO_4 próxima a razão do C-S-H original [81, 101].

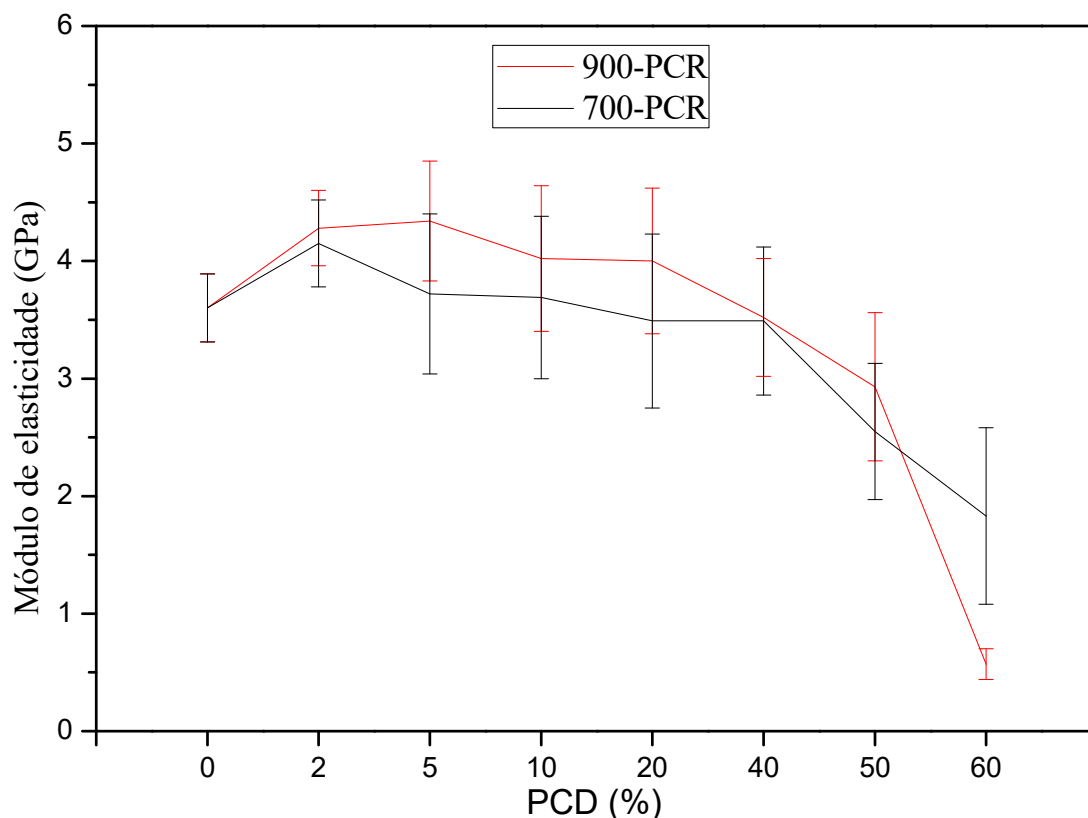


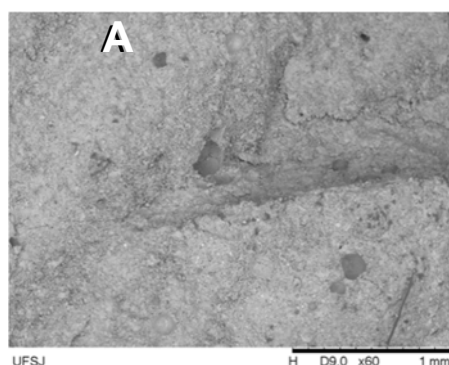
Figura 51: Módulo de elasticidade para corpos de prova de pasta de cimento preparados a partir de diferentes concentrações de 700-PCD e de 900-PCD em relação ao CP-V.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 50 e 51, os principais eventos que influenciam a resistência mecânica à compressão e o módulo de elasticidade para corpos de prova preparados com até 40% de PCD, não ocorrem de forma significativa, uma vez que as propriedades mecânicas para os corpos de prova preparados com até esta concentração de PCD, apresentam-se semelhantes. Como por exemplo, a formação de produtos de hidratação em espaços vazios, envolvendo $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, e a formação de produtos de reidratação nestes espaços, envolvendo CH, ou a formação significativa de poros em corpos de prova preparados com até estas concentrações de PCD. Além do mais, a semelhança das propriedades para corpos de prova preparados com até 40% de PCD obtido a 700 e 900°C pode ser atribuída ao método de cura adotado, que por sua vez pode ter limitado potenciais reações de reidratação do 900-PCD. A diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, para corpos de prova preparados a partir

de 50% de 900-PCD, de 60% de 700-PCD e de 60% de 900-PCD, está relacionada ao aumento da porosidade das pastas, em função do aumento de CaO e de novos nesossilicatos de cálcio nos sistemas de pasta reciclada. Estes compostos atuam de forma reativa frente a água de mistura [84], fazendo com que a viscosidade do sistema aumente, levando a formação de poros abertos. Além do mais o PCD não tem a capacidade de recuperar totalmente os hidratos de cimento pela reidratação [73, 76, 84], desta forma esta incompletude também influencia a queda destas propriedades.

Na tentativa de eliminar estes defeitos de volume que prejudicam a resistência mecânica destes corpos de prova, tentou-se utilizar uma solução de policarboxilato, contudo, não foi possível confeccionar os corpos de prova, isto provavelmente devido elevada reatividade entre a água de mistura proporcionada pelo aditivo e os 900-PCD e 700-PCD, que por sua vez levaram a um aumento de viscosidade tal que impediu a fabricação destes corpos de prova.

A Figura 52 apresenta as micrografias da amostra de 28-PCH em A, 20-700-PCR em B, 20-900-PCR em D, 60-700-PCR em C e de 60-900-PCR em E. Com a análise morfológica realizada por meio das micrografias apresentadas na Figura 52, é possível dizer que a amostra de 60-700-PCR apresenta mais poros abertos que a amostra de 40-700-PCR. Já a amostra de 40-900-PCR apresenta poros maiores que amostras preparadas com 40 e 60% de 700-PCD. A amostra de 60-900-PCR apresenta uma superfície de baixa densidade em relação a todas as outras. Este comportamento está relacionado tanto com a quantidade do PCD como a temperatura de obtenção deste.



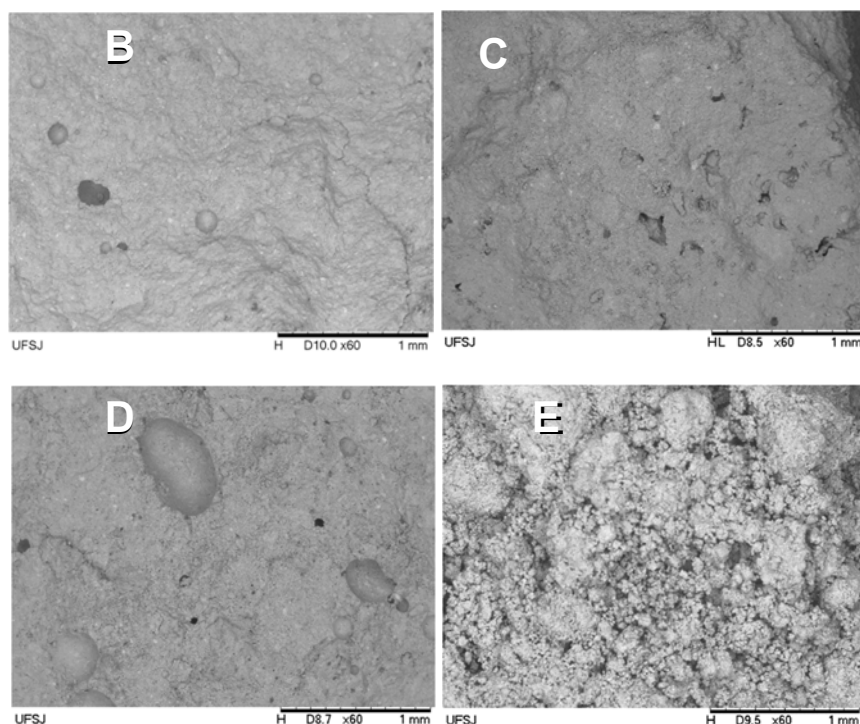


Figura 52: Micrografias das amostras de PCH em A, 20-700-PCR em B, 60-700-PCR em C, 20-900-PCR em D e de 60-900-PCR em E

5.1.3-CONCLUSÕES DO ESTUDO DA HIDRATAÇÃO, DESIDRATAÇÃO E REIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL CP V-ARI (CP-V)

Com os resultados parciais de pesquisa apresentados nesta obra sobre o estudo da hidratação, desidratação e reidratação do cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI, é possível concluir que a inversão das reações de hidratação, ocorre tratando a pasta de cimento a 700 e a 900 °C. Apresentando o pó de cimento desidratado novos nesosilicatos de cálcio e CaO com elevada reatividade frente a água, em comparação aos silicatos presentes no pó original de cimento Portland do tipo CP V-ARI. Também é importante mencionar com base neste estudo, que a pasta de cimento reidratada obtida partindo de PCH tratada a 700 e 900 °C apresenta sinais claros de carbonatação. Adicionalmente, esta pesquisa também permite dizer que os novos nesosilicatos de cálcio e CaO levam a pasta de cimento reidratada a ter propriedades mecânicas inferiores, às propriedades mecânicas apresentadas pela pasta original de cimento Portland do tipo CP V-ARI. Isto devido à pasta de cimento reidratada, apresentar poros abertos quando preparada com elevadas concentrações de pó de cimento desidratado. Estes resultados também permitem dizer que o pó de cimento desidratado pode ser adicionado ao cimento

Portland de alta resistência inicial CP V-ARI, até 50% em massa sem prejudicar as propriedades físicas e mecânicas da pasta reciclada.

6-CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Com a presente obra torna-se explicitamente claro ao leitor que pesquisadores de diversas universidades e institutos de pesquisa presentes em diferentes países, não têm medido esforços para romper as limitações apresentadas pelos métodos existentes de reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Esta obra permitiu ao leitor compreender que o avanço na reciclagem de RCD, depende muitas vezes da compreensão do universo microscópico e composicional destes materiais. Uma vez que preocupados com os problemas gerados pela velha pasta aderida ao agregado natural presente no agregado reciclado, os cientistas utilizaram a Química Aplicada como alternativa, e voltaram a atenção para a potencial reciclagem da pasta de cimento Portland. Desta forma, sob a perspectiva da Química Aplicada e da Engenharia Mecânica foi possível encontrar na literatura científica, sinais bastante claros do avanço das pesquisas nesta área. Especificamente, o estudo apresentado de forma parcial neste livro sobre a hidratação, desidratação e reidratação do cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI, desenvolvido na Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ), permite dizer que a reciclagem deste tipo de cimento apresenta-se potencialmente interessante. Contudo, ainda não se pode pensar em executar projetos de implementação de uma infraestrutura que permita a reciclagem da pasta de cimento Portland, uma vez que é necessário avançar ainda mais no desbravar das fronteiras da ciência nesta área. Diante destes desafios fazendo uso da Química Aplicada em laboratórios e em diferentes instituições, os pesquisadores relutam inquietos e desassossegados durante dia e noite incansavelmente para superar estas limitações. Embora de nobreza inquestionável, a justificativa para tal vai além do escopo da preocupação com a preservação do meio ambiente. Esta importância se encontra cristalizada e bem publicada, no cenário econômico internacional onde é inaceitável dizer que as pesquisas científicas e tecnológicas em sustentabilidade, não constituem importantes pilares que sustentam as maiores potências desenvolvidas do planeta em suas posições.

REFERÊNCIAS

- [1] **ANGULO, S. C. VARIABILIDADE DE AGREGADOS GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS. 2000. 155P. DISSERTAÇÃO (MESTRADO). ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. SÃO PAULO.**
- [2] **C. Ulsen, H. Kahn, G. Hawlitschek, E.A. Masini, S.C. Ângulo. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. Waste Management. v.33, (2013), p.656.**
- [3] **C. Leiva, J. Solís-Guzmám, M. Marrero, C.G. Arenas. Recycled blocks with improved sound and fire insulation containing construction and demolition waste. Waste Management. v.33, (2013), p.663.**
- [4] **E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, A. Bahadori. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. Journal of Cleaner Production. v.51, (2013), p.142.**
- [5] **John, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102p. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.**
- [6] **H. Ogawa, T. Nawa. Improving the quality of recycled fine aggregates by selective removal of brittle defects. J. Adv. Concr. Technol. v.10, (2012), p.395.**
- [7] **k. Shi-Cong, P. Chi-Sun, M. Etxeberria. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. Cement & Concrete Composites. v.33, (2011), p.286.**
- [8] **C. Lima, A. Caggiano, C. Faella, E. Martinelli, M. Pepe, R. Realfonzo. Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash. Construction and Building Materials. v.47, (2013), p.547.**

[9] R. Yu, Z. Shui, **Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials**. Construction and Building Materials. v.49, (2013), p.841.

[10] Angulo, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. (Tese Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

[11] Resolução CONAMA n° 307/2002. **Classificação dos Resíduos**. Ministério do Meio Ambiente. Brasil.

[12] José Antonio Ribeiro de Lima. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassa e concretos**. 1999. Dissertação (Mestrado). São Carlos.

[13] Fujikawa, E. S. **Incorporação do resíduo "Serragem Cromada" em Materiais de Construção Civil**. 2002. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da UNESP. Bauru/SP.

[14] Pinto, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

[15] Carina Ulsen. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição**. 2006. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

[16] Alex Fabiane Fares da Silva. **Gerenciamento de Resíduos da construção civil de acordo com a resolução conama n°.307/02- Estudo de caso para um conjunto de obras de pequeno porte**. 2007. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

- [17] A.Abbas, G. Fathifazlb, B. Fournierc, O.B. Isgord, R. Zavadile, A.G. Razaqpurf, S. Foog **Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis**. *Materials characterization*. V.60, (2009), p.716-728.
- [18] C. Hoppen, K. F. Portella, A. Joukoski, O. Baron, R. Franck, A. Sales, C. V. Andreoli, V. A. Paulon. **Disposal of centrifuged sludge from Water Treatment Plant (WTP) in concrete matrix: an alternative method for environmental protection**. *Cerâmica*. V.51, (2005), p.85-95.
- [19] João Paulo Vargas Tavares Manhães e José Nilson França de Holanda. **Caracterização e classificação de resíduos sólidos “pó de rocha granítica” gerado na indústria de rochas ornamentais**. *Quim. Nova*, v.31, (2008), p.1301-1304.
- [20] Georg Robert Sadowski. **O batólito quartzo-sienítico da serra da baixa verde, Pernambuco**. *Boletim IG. Instituto de Geociências, USP*. V. 4, (1973), p.39-46.
- [21] Santos, P.S. **Tecnologia das argilas aplicada às argilas brasileiras**. São Paulo, 1995, Edgard Blücher, ed. Universidade de São Paulo.
- [22] De Pauw, C Lauritzen, (1994). **Disaster planning, structural assessment, demolition and recycling**. Rilem report 9. Londres, E&FN Spon.
- [23] Hansen TC, Narud H. **Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate**. *Concrete*. v.5, (1983), p.79-83.
- [24] Y. Kasai. In: **Proceedings of the second international symposium held by RILEM, Reuse of demolition wastes**. v.2, (1988), p.746-55.
- [25] Poon C.S., Kou S.C., Lam L. **Use of recycled aggregate in molded concrete bricks and blocks**. *Construct Build Mater*. v.16, (2002), p.281-9.
- [26] José Antônio Ribeiro de Lima. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduos de construção reciclado**. 1999. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo.

- [27] Vivian W.Y. Tama, K.Wang, C.M. Tamb. **Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis.** Journal of Hazardous Materials. v.152, (2008) p.703–714.
- [28] Chaves, A.P. **Teoria e prática do tratamento de minérios.** São Paulo: Signus, 1996.v.2, p.424.
- [29] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra. **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.** Cement and Concrete Research. v.37, (2007), p.735-742.
- [30] Jianzhuang Xiaoa, Jiabin Lia, Ch. Zhang. **Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading.** Cement and Concrete Research. v.35, (2005), p.1187-1194
- [31] Carmine Lima, Antonio Caggiano, Ciro Faella, Enzo Martinelli, Marco Pepe, Roberto Realfonzo. **Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash.** Construction and Building Materials. v.47, (2013), p.547-559.
- [32] Aldo Giuntini de Magalhães. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno.** 2007. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.
- [33] Coutinho A. S. **Fabrico e propriedades do betão.** 1988, v.1, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [34] Zampieri, V. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico.** 1993. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo.

- [35] Goguel, R. L.; St John, D.A. **Chemical identification of Portland cements in new Zealand concretes: the Ca-Sr-Mn plot in cement identification and the effect of aggregates.** Cement and Concrete Research, Tarrytown, v.23, (1993), p.283-93.
- [36] Luiz Gonzaga de Paula. **Análise Termo-econômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-processamento de Misturas de Resíduos.** 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá/ MG.
- [37] Donald A. J., Poole A. W., Sims I. **Concrete Petrography.** A handbook of investigative techniques. 1998. first edition, New York, USA.
- [38] Maria Luíza Lopes de Oliveira Santos. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** 2008. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN.
- [39] Maekawa K., Chaube R., Kishi T. **Modeling of Concrete Performance, Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport.** 1999. First edition, E & FN Spon, London.
- [40] Metha P. K., Monteiro P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 1994. 1ª edição, Editora Pini, São Paulo.
- [41] Júlia Paulo Vieira. **Interação Cimento-superplastificante, avaliação da estabilidade do comportamento.** Dissertação (Mestrado) 2010. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa/ Portugal.
- [42] Andreza Kelly Costa Nóbrega. **Formulação de pastas cimentíceas com adição de suspensões de qutosana para cimentação dos poços de petróleo.** 2009. Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN.
- [43] Carlos Augusto de Souza Oliveira. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concreto de alto desempenho produzidos com metacaulim.** 2007. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN.

[44] Valdecir Angelo Quarcioni. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais de hidratação do cimento portland: estudo em pasta.** 2008. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

[45] Bonaveti V, Donaz H, Rahhal V, Irassar E. **Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement.** Cem Concr Res v.30, (2000), p.703-8.

[46] Neville, A. M. 1997. **Propriedades do concreto.** Segunda edição. Tradução: Salvador E. Giamusso. Ed. Pini. São Paulo.

[47] Ern T. **Estudo das propriedades térmicas do concreto de média e alta resistência. Contribuição a critérios de projeto e construção.** 2003. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

[48] Raphael Coelli Ivanov. **Influência do dicromato de potássio no comportamento do cimento aluminoso visando ao processo de S/E de resíduos com cromo.** 2013. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco.

[49] Livesey P., Donnelly A., Tomlinson C. **Measurement of the heat of hydration of cement.** Cement and Concrete Composites. (1991), p.177-185.

[50] Paulon V. A. **O fenômeno térmico no concreto.** 1997. Associação Brasileira do Cimento Portland. São Paulo - SP.

[51] Vargas A. S., Masuero A. B., Vilela A. C. **Estudo microestrutural e determinação do calor de hidratação em pastas de cimento portland com pó de aciaria elétrica (PAE).** Ambiente Construído. (2004), p.7-18.

[52] Buekett, J. **International admixture standards.** Cement and Concrete Composites, Elsevier. v.20, (1998), p.137-140.

[53] Rixom M. R, Mailvaganam N. P. **Chemical admixtures for concrete.** 1999. Third Edition. E &FN Spon. New York.

- [54] Uchikawa H, Sawaki D, Hanehara S. **Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste.** Cement and Concrete Research, Pergamon, v.25, (1995), p.353-364.
- [55] Flatt R. J. **Interparticle forces and superplasticizers in cement suspensions.** 1999. Tese (Doutorado). École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne.
- [56] Marcelo Veronez. **Estudo da influência do tipo de aditivo superplastificante e de adição mineral no comportamento termo-mecânico dos concretos de alto desempenho.** Dissertação. (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2006.
- [57] Carino N. J, Lew H. S. **Model of mechanism for naphthalene series water-reducing agent.** ACI Journal. v.80, (1983), p.177-182.
- [58] Andersen, P. J. **The effect of superplasticizers and air-entraining agents on the zeta potential of cement particles.** Cement and Concrete Research, Pergamon. v. 16, (1986) p.931-940.
- [59] Foissy A, Pierre A. **Les mécanismes d'action des fluidifiants.** Ciments, Betons, Plâtres, Chaux, p.18-19.
- [60] Jianzhuang Xiao, Jiabin Lia, Ch. Zhang. **Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading.** Cement and Concrete Research. v.35, (2005), p.1187-1194.
- [61] Carmine Lima, Antonio Caggiano, Ciro Faella, Enzo Martinelli, Marco Pepe, Roberto Realfonzo. **Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash.** Construction and Building Materials. v.47, (2013), p.547-559.

- [62] Marinkovic S., Radonjanin V., Malesev M., Ignjatovic I. **Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete.** Waste Manage. v.30, (2010), p. 2255-2264.
- [63] Thomas C., Sosa I., Setién J., Polanco J., Cimentada A. **Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete.** J. Clean. Prod. v.65, (2014), p. 397-405.
- [64] Medina C., Frías M., Sánchez de Rojas M. **Leaching in concretes containing recycled ceramic aggregate from the sanitary ware industry.** J. Clean. Prod. v.66, (2014), p.85-91.
- [65] André A., Brito J., Rosa A., Pedro D. **Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste.** J. Clean. Prod. v.65, (2014), p.389-396.
- [66] Fabio P. C., Caio C. D. M., Tulio H. P., Aloízio G. A. J, Paulo Henrique Ribeiro Borges, Fabrizio Scarpac. **Mechanical properties and ASR evaluation of concrete tiles with waste glass aggregate.** Sustainable Cities and Society. V.16, (2015), p. 49-56.
- [67] Rodrigues F., Carvalho M.T., Evangelista L., Brito J. **Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants.** J. Clean. Prod. v.52, (2013), p. 438-445.
- [68] M.C.R. Farage, J. Sercombe, C. Galle. **Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300°C.** Cement and Concrete Research. v.33, (2003), p.1047-1056.
- [69] Yu-Fang Fu, Yuk-Lung Wong, Chi-Sun Poon, Chun-An Tang, Peng Lin. **Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures.** Cement and Concrete Research. v.34, (2004), p.789-797.

- [70] Matthew J. DeJong, Franz-Josef Ulm. **The nanogranular behavior of C-S-H at elevated temperatures (up to 700 °C)**. Cement and Concrete Research. v.37, (2007), p.1-12.
- [71] Zhonghe Shui, Dongxing Xuan, Wei Chen, Rui Yu, Rui Zhang. **Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures**. Construction and Building Materials. v.23, (2009). p.531-537.
- [72] Qi Zhang and Guang Ye. **Microstructure Analysis of Heated Portland Cement Paste**. Procedia Engineering. v.14, (2011), p.830-836.
- [73] D. X. Xuan, and Z. H. Shui. **Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature**. Fire Mater. v.35, (2011), p.481-490.
- [74] G.F. Peng, Z.S. Huang. **Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures**. Construction and Building Materials. v.22, (2008), p.593-599.
- [75] Marta Castellote, Cruz Alonso, Carmen Andrade, Xavier Turrillas, Javier Campo. **Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction**. Cement and Concrete Research. v.34, (2004), p. 1633-1644.
- [76] Zhonghe Shui, Dongxing Xuan, Huiwen Wan, Beibei Cao. **Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment**. Construction and Building Materials. v.22, (2008), p.1723-1729.
- [77] Aloízio G. A. J., Leandro J. S., Túlio H. P., Adriano G. S. A. e Kurt S. **Hydration and dehydration of high initial strength Portland cement type CP V-ARI**. Materials Science Fórum. V. 869, (2016), p.106-111.
- [78] C. Alonso, L. Fernandez. **Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments**. Journal of materials science. v.39, (2004), p.3015-3024.

- [79] Lucia Alarcon-Ruiz, Gerard Platret, Etienne Massieu, Alain Ehrlicher. **The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste.** Cement and Concrete Research. v.35, (2005), p.609-613.
- [80] V. Martin, P. Bayer, M. Chroma, P. Rovnanikova. **Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes.** Constr. Build. Mater. v.54, (2014), p.413-420.
- [81] R. Yu, Z. Shui, R. Yu. **Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious Materials.** Journal of Cleaner Production. v.78, (2014), p.202-207.
- [82] Luciano Senff. **Caracterização do compósito cimentício com a adição de particulados de madeira- Espécie Pinus Taeda.** 2004. Dissertação (Mestrado). Santa Catarina. UDESC.
- [83] E.T. Stepkowska, J.M. Blanes, F. Franco, C. Real, J.L. Pérez-Rodríguez. **Phase transformation on heating of an aged cement paste.** Thermochemica Acta. V.420, (2004). p.79-87.
- [84] Zhonghe Shui, Dongxing Xuan, Huiwen Wan, Beibei Cao. **Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment.** Construction and Building Materials. v.22, (2008), p.1723-1729.
- [85] S.W. Tang, Z.J. Li, H.Y. Shao, E. Chen. **Characterization of early-age hydration process of cement pastes based on impedance measurement.** Construction and Building Materials. v.68, (2014), p.491-500.
- [86] S.W. Tang, H.G. Zhu, Z.J. Li, E. Chen, H.Y. Shao. **Hydration stage identification and phase transformation of calcium sulfoaluminate cement at early age.** Construction and Building Materials. v.75, (2015), p.11-18.
- [87] Denyo Silva e Nito Angelo Debacher, Armando Borges de Castilhos Junior e Fabio Rohers. **Caracterização físico-química e microestrutural de conchas de moluscos**

bivalves provenientes de cultivos da região litorânea da ilha de santa Catarina. Quim. Nova. v.33, (2010), p.1053-1058.

[88] Lavat A.E, Trezza M.A., Poggi. M. **Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture.** Waste management. v.29, (2009).

[89] F. Puertas, I. García-Díaz, M. Palacios, M.F. Gazulla, M.P. Gómez, M. Orduña. **Clinkers and cements obtained from raw mix containing ceramic waste as a raw material.** Characterization, hydration and leaching studies. Cement & Concrete Composites. v.32, (2010), p.175-186.

[90] Hidalgo, A. et al. **Microstructural characterization of leaching effects in cement pastes due to neutralization of their alkaline nature Part I: Portland cement pastes.** Cement Concrete Research. v.37, (2007), p.63.

[91] Foteini Kontoleontosa, Petros Tsakiridisb, Apostolos Marinosa, **Dry-grinded Ultrafine Cements Hydration. Physicochemical and Microstructural Characterization.** Materials Research. v.16, (2013), p.404.

[92] Lin TD, Chou S. Concrete fire test programs in Taiwan. In: Phan LT, Carino NJ, editors. **Proceedings of an international workshop on fire performance of high-strength concrete.** Gaithersburg, MD, USA. National Institute of Standards and Technology; 1997. p. 55–8..

[93] S. Lim, P. Mondal, **Micro and nanoscale characterization to study the thermal degradation of cement-based materials.** Materials Characterization. v.92, (2014), p.15.

[94] M. Esperanza, A. Carmen, V. Luis, **Study of dehydration and rehydration processes of portlandite in mature and young cement pastes.** J. Therm. Anal Calorim. v.110, (2012), p.443.

- [95] Georgeseu, M. et al. **Thermoanaly and infrared spectroscopy investigations of some mineiral pastes containing organic polymers.** Cement concrete research. v.32, (2002), p.1269.
- [96] Yong-Xin Li, Yi-Min Chen, Jiang-Xiong Wei, Xing-Yang He Hong-Tao Zhang, Wen-Sheng Zhang. **A study on the relationship between porosity of the cement paste with mineral additives and compressive strength of mortar based on this paste.** Cement and Concrete Research. v.36, (2006), p.1740-1743.
- [97] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, M. Sánchez de Juan. **Durability of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials. v.40, (2013), p.1054-1065.
- [98] A.A. Hamami, Ph. Turcry, A. Aït-Mokhtar. **Influence of mix proportions on microstructure and gas permeability of cement pastes and mortars.** Cement and Concrete Research. v.42, (2012), p.490-498.
- [99] Fathollah Sajedi, Hashim Abdul Razak. **Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars.** Construction and Building Materials. v.25, (2011), p.2036-2045.
- [100] P.C. Hewlett, **Lea´s Chemistry of Cement and Concrete**, 2010. Furth ed., Printed and abound in the United kingdon, p. 247.
- [101] A. G. de Araújo Jr, A. E. Vale, A. G de S Azevedo, k. Strecker. **Estudo do Reaproveitamento do cimento Portland de alta resistência Inicial.** Cerâmica. v.63 (2017), p.58-64.

Sobre o autor



Aloizio Geraldo de Araújo Júnior. Pós Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ). Doutor em Física e Química de Materiais pela UFSJ. Possui Mestrado em Física e Química de Materiais pela UFSJ. Possui Graduação em Química pelo Centro Universitário de Caratinga (UNEC) e é Técnico em Química Industrial pela Escola Técnica Vale o Aço (ETVA). É Membro do Comitê de Revisores dos Periódicos Científicos Ambiente Construído e Revista Escola de Minas no Brasil e é Membro do Comitê de Revisores do Periódico Científico Advances in Materials Science and Engineering no Egito. Atua na Iniciativa Privada
E-mail: aloizio.geraldo@yahoo.com.br

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-93243-97-4

