

Monografia

"RESÍDUOS DA PASTA DE CIMENTO PORTLAND TRATADOS TERMOMECHANICAMENTE"

Autor: Guilherme Lanna Reis

Orientadora: Profa. Maria Teresa Paulino Aguilar

Dezembro/2014

GUILHERME LANNA REIS

**"RESÍDUOS DA PASTA DE
CIMENTO PORTLAND TRATADOS TERMOMECANICAMENTE"**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil
da Escola de Engenharia UFMG

Ênfase: Gestão e Avaliações nas Construções
Orientadora: Profa. Maria Teresa Paulino Aguilar

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2014

À minha família pelo apoio, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meus pais, minha família, meus amigos, meus mestres.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Resíduos da construção civil	13
2.2. Processo de produção do clínquer	16
2.3. Processo de hidratação do cimento.....	20
2.4. Desidratação do cimento	26
3. CONCLUSÃO	41
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de Ca^{2+} em solução (B) em processo de hidratação do cimento Portland. Indicação das etapas de reação: Estágio Inicial (I), Período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV) e Estágio final (V)	21
Figura 2. Noções de hidratação e pega do cimento Portland	21
Figura 3. Calor de hidratação do cimento	22
Figura 4. Composição de uma pasta de cimento em função da hidratação por 24 horas	25
Figura 5. Variação de massa das amostras de concreto aquecidas	31
Figura 6. Evolução da distribuição de tamanho de poros da pasta de cimento e da zona de transição expostas a altas temperatura	33
Figura 7. Evolução das fases cristalinas de cimento que possuem teor normal de aluminato tricálcio (C_3A)	34

LISTA DE TABELAS

Tabela I: Temperatura de reação dos compostos do clínquer.....	18
Tabela II: Principais compostos anidros e os respectivos hidratos.....	19
Tabela III: Processos ocorridos em tratamentos térmicos de pasta de cimento a 300, 500 e 650°C.....	29
Tabela IV: Resultados de resistência à compressão de argamassas confeccionadas com resíduos submetidos ou não a tratamento térmico em distintas idades de cura.....	30
Tabela V: Dados de publicações consultadas que tratam de desidratação ou reidratação de cimento.....	36

LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS

Al_2O_3 = trióxido de alumínio ou alumina

C_2S = belita ou silicato bicálcico

C_3S = alita ou silicato tricálcico

C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) = aluminato tricálcico

C_4AF ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) = ferro aluminato tetracálcico ou ferrita

$\text{C}_4\text{A}\dot{\text{S}}\text{H}_{12}$ ou AFm = monossulfoaluminato de cálcio

$\text{C}_6\text{A}\text{S}_3\text{H}_{32}$ = trissulfato hidratado ou etringita

CaO = óxido de cálcio, cal ou cal virgem

CaCO_3 = carbonato de cálcio ou calcita

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ = hidróxido de cálcio ou cal hidratada ou portlandita

Ca^{2+} = cálcio

CaSO_4 = sulfato de cálcio

$\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$ = xonotlite

$\text{Ca}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_2$ = hillebrandita

Ca_2SiO_4 = larnita

Cimento ou CP = cimento Portland

CO_2 = dióxido de carbono

$\text{CO}_{2\text{eq}}$ = dióxido de carbono equivalente

CSH = silicatos de cálcio hidratados ou tobermorita ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)

Fe_2O_3 = óxido de ferro III ou óxido férrico

GEE = Gases Causadores do Efeito Estufa

K_2O = óxido de potássio

K^+ = potássio

MgCO_3 = carbonato de magnésio

MgO = óxido de magnésio

Na_2O = óxido de sódio

Na^+ = sódio

OH^- = hidroxila

PIB = Produto Interno Bruto

RCD = resíduo de construção e demolição

SiO_2 = dióxido de silício ou sílica

SO_3 = anidrido sulfúrico

TiO_2 = óxido de titânio

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi fazer uma revisão bibliográfica sobre a hidratação do cimento Portland e sobre o uso de resíduos de pasta de cimento (cimento Portland) tratados termomecanicamente. Têm-se demonstrado que os finos de resíduos de concreto, contendo pasta de cimento, ao serem tratados termicamente, passam a apresentar certa capacidade de reidratação. O principal composto do cimento hidratado é o C-S-H, que forma-se em maior quantidade e determina a resistência mecânica. Logo, durante o processo de desidratação do cimento busca-se principalmente reobter a fase silicática anidra, por meio de tratamento térmico que possibilite a retirada da água de hidratação de compostos como os silicatos, aluminatos e sulfoaluminatos de cálcio hidratados e da portlandita. Portanto, o aquecimento pode resultar em reações químicas favoráveis como a formação de silicatos com uma forma mineralógica considerada intermediária, que pode ser reidratada, assim como ocorre a hidratação residual dos silicatos de cálcio anidros (alita e belita) disponíveis e expostos após a moagem desses materiais. Um dos trabalhos revisados relata que é possível por o tratamento térmico conferir reatividade à pasta de cimento hidratada até 500°C, acima da qual pode comprometer a reatividade, tornando-a lenta ou pouco reativa, o que implica na resistência mecânica. Relatos da literatura sugerem o estudo de resíduos de construção e demolição.

1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de cimento (cimento Portland) é um processo físico-químico de transformação de minerais naturais como calcário, argila e, se necessário, minério de ferro e areia, em uma mistura de minerais sintéticos que possuem a capacidade de reagir com a água e desenvolver propriedades de resistência à compressão. Essa mistura, denominada clínquer, possui como principais componentes mineralógicos os silicatos de cálcio, aluminatos, ferro-aluminatos, periclásio e CaO (óxido de cálcio) livre (DELABRIDA, 2011).

O processo de produção do clínquer é um dos principais responsáveis pela emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE), pelo consumo expressivo de matérias primas, que influencia na geração considerável de resíduos.

Muitas pesquisas já foram realizadas sobre a utilização de aproveitamento de RCD como agregado miúdo e graúdo para a produção de argamassas e concretos. Entretanto, houve poucos estudos sobre a inserção de RCD como adição na fabricação de cimento (DE ARAÚJO *et al.*, 2013).

Alguns estudos têm demonstrado que os finos de resíduos de concreto, contendo pasta de cimento, ao serem tratados termicamente, passam a apresentar certa capacidade de reidratação. A maioria das temperaturas utilizadas para tratamento estão abaixo de 650°C, o que reduz consideravelmente o processo de decarbonatação, principal responsável pelas emissões de CO₂ durante a produção de um ligante. Apesar do novo tipo de cimento ter resistência mecânica limitada, pode ser utilizado para aplicações como obras de geotecnia, elementos pré-fabricados não estruturais. Esse resíduo pode ser utilizado combinado com resíduos de cerâmica vermelha, que possui atividade pozolânica se o processo de calcinação ocorrer em temperaturas abaixo de 900°C. Essa combinação resulta em um tipo de ligante ainda melhor, pois ocorre a contribuição da atividade pozolânica no processo de reidratação do cimento, além de apresentar a vantagem de frequentemente constarem nos finos dos resíduos de construção civil. Normalmente, estes são constituídos por uma mistura de cimento hidratado, cerâmica vermelha e/ou argilominerais provenientes de solos e até 20% de

feldspato/quartzo, tornando o resíduo interessante para uso potencial como ligante (GUILGE, 2011).

O objetivo desta revisão bibliográfica foi relatar o uso de resíduos de pasta de cimento tratados termomecanicamente como aglomerante.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resíduos da construção civil

A população mundial de aproximadamente seis bilhões de pessoas cresce em média 1,3%, ou 73 milhões de pessoas por ano, atingindo 7,5 bilhões em 2020 e 9,4 bilhões em 2050 (LAL, 2001). Estima-se que, até 2020, 98% deste crescimento ocorrerá nos países em desenvolvimento, principalmente em áreas urbanas (SANCHEZ, 2000). O PIB (Produto Interno Bruto) per capita global aumentará em média 2,6% ao ano entre 1998 e 2030 (EICKHOUT *et al.*, 2006), com reflexos no incremento da demanda habitacional em quantidade e qualidade. Suprir essa demanda pode ser um incentivo à economia. Entretanto, torna-se cada vez mais evidente a necessidade desse crescimento ser sustentável sob os pontos de vista econômico, social e ambiental. Sobre as questões ambientais há necessidade de atentar-se para a contaminação da atmosfera, água, solos; geração de gases causadores do efeito estufa (GEE); consumo insustentável de matérias primas e geração de resíduos. De acordo com Isaia (2007), sob o ponto de vista global, o setor de construção civil é o que consome a maior quantidade de materiais no mundo. Segundo John (2007), vivemos em um mundo de materiais de construção.

No Brasil, o setor de construção civil é responsável por 9% do total de empregos e por 19% do PIB (NASCIMENTO; SANTOS, 2003). Até recentemente, havia falta de consciência ecológica nessa atividade econômica e conseqüente despreocupação quanto ao esgotamento dos recursos não renováveis utilizados e com os custos e prejuízos causados pelo desperdício de materiais e destino dados aos rejeitos produzidos nesta atividade. Um dos itens contemplados pela “Agenda 21” foi a Construção Sustentável, que visava o aumento das oportunidades ambientais para as gerações futuras e que consistia em uma estratégia ambiental com visão holística. Considerava toda a cadeia produtiva, desde a extração de matérias primas até a saúde dos trabalhadores envolvidos no processo e também dos consumidores finais das edificações. Baseava-se na redução da poluição, na economia de energia e água, na minimização da liberação de materiais perigosos no ambiente, na diminuição da pressão de consumos sobre matérias-primas naturais, no aprimoramento das condições de segurança e saúde dos

trabalhadores, e na qualidade e custo das construções para os usuários finais (FRAGA, 2006).

Em 2009, no Brasil, produziram-se 59,1 milhões de toneladas de cimento (GUILGE, 2011) e consomem-se mais de 250 milhões de toneladas de produtos a base de cimento (JOHN, 2007).

Estima-se que a produção mundial de cimento deve aumentar 5% ao ano. Para produzir 1.000 kg de cimento necessita-se de 1.500 kg de matéria-prima e entre 80 a 140 kg de combustível, na forma principalmente de coque e carvão fóssil. Se contabilizar a energia utilizada para transporte e moagem das matérias-primas, estima-se que, para a produção dessa quantidade de cimento, há emissão de 900 kg de dióxido de carbono (CO₂) (BERTOLINI, 2010).

Em Minas Gerais, no ano de 2005, estima-se que a produção de cimento foi a principal responsável pelas emissões do setor de processos industriais e uso de produtos, com 43,9% do total de 7.086 Gg CO₂eq (CO₂ equivalente) sendo o CO₂ responsável por 89,8% desse total. As produções de cal e alumínio vieram a seguir com 38,2% e 13,0% de participação (INVENTÁRIO..., 2008).

Na média global, o setor industrial (cimento, siderurgia, produtos químicos, petróleo e gás e outras indústrias) representa 26% das emissões esperadas para 2030 e no Brasil, esse percentual é de 13%. O valor mais baixo pode ser atribuído à matriz energética e às características intrínsecas da produção brasileira. O setor de cimento é o que tem perspectivas de maior crescimento das emissões, 1,7 vezes entre 2005 e 2030, devido ao aumento da demanda. Mais de 70% das emissões das cimenteiras brasileiras estão associadas à calcinação do calcário e argila para produção de um produto intermediário na fabricação de cimento, o clínquer. A substituição deste por materiais alternativos, como a escória da produção siderúrgica ou cinzas da produção de energia em termoelétricas a carvão, reduz diretamente as emissões do setor. Uma pequena parcela das emissões é associada, no Brasil, a emissões indiretas pelo uso de eletricidade e pela queima direta de combustíveis (MATZINGER, 2009).

Estima-se que há geração de 2 a 3 bilhões de toneladas de entulho por ano em todo o mundo. Para um edifício, cuja massa de materiais equivale a 1.000 kg/m², o entulho gerado corresponde a aproximadamente 5% da massa total do edifício (VIEIRA; MOLIN, 2004).

A construção civil consome em torno de 40% da energia e dos recursos naturais e gera 40% dos resíduos produzidos por todo o conjunto de atividades humanas. No Brasil, as atividades de construção e demolição geram diretamente aproximadamente 400kg/habitante/ano de resíduos. Se considerar os resíduos da produção de materiais, elevaria significativamente esse valor (CUOGHI, 2006).

De Araújo *et al.* (2013) utilizaram RCDs calcinados nas temperaturas de 600°C e 900°C moídos em substituição do cimento CPV ARI em compósitos cimentícios. Apesar de os resíduos e cimento hidratado calcinados não terem apresentado pozolanidade pelo método de condutividade elétrica em solução saturada por Ca(OH)₂ (hidróxido de cálcio, cal hidratada ou portlandita), os resultados dos ensaios de resistência à compressão indicaram uma possível utilização dos resíduos calcinados e moídos como adição em compósitos cimentícios.

Frequentemente, a separação de RCD é manual e visual, retirando-se impurezas dos materiais, tais como madeiras, metais, plásticos, papéis, borrachas, gesso. Têm-se realizado pesquisas de uso dos resíduos de construção e demolição como agregados miúdo e graúdo. Esta aplicação sofre influência de vários fatores inerentes ao resíduo, como resistência mecânica, porosidade e contaminações. Acredita-se que há viabilidade técnica de adicionar até 35% de resíduo calcinado na fabricação de cimentos. Esta medida implicaria em ganhos ambientais como a redução da extração de matéria prima e menor gasto energético, pois as temperaturas de calcinação são inferiores às utilizadas na produção de cimento (DE ARAÚJO *et al.*, 2013).

A solidificação / estabilização de resíduos perigosos por quelantes à base de cimento é uma tecnologia que foi aplicada a muitos tipos de resíduos e efluentes

industriais, principalmente aqueles que contêm metais pesados. O processo tem o potencial para imobilizar efetivamente constituintes perigosos. Conseqüentemente, há interesse no desenvolvimento de ferramentas para determinar a composição de pastas de cimento (DWECK *et al.*, 2000).

2.2. Processo de produção do clínquer

Visualmente, o concreto é um material bifásico, constituído por partículas de agregados dispersas em uma matriz cimentícia. Em termos microscópicos, a estrutura do concreto é mais complexa, pois as duas fases da estrutura não são distribuídas homogeneamente. Há uma zona de transição na interface da pasta de cimento e as partículas de agregado. De maneira geral, o volume de vazios capilares na pasta reduz com o decréscimo da relação água cimento e com a idade (LIMA *et al.*, 2004).

No Brasil, há oito tipos básicos normalizados de cimento. Se considerar os subtipos e classes chega-se a quase 30 produtos, que se diferenciam de acordo com a proporção de clínquer, sulfatos de cálcio e adições acrescentadas durante o processo de moagem como escórias, pozolanas e fíler calcário. O cimento é obtido por meio da moagem do clínquer com 3 a 5% de gesso, em uma ou mais formas de sulfato de cálcio (CaSO_4). O objetivo do último componente é regular o tempo de pega ou endurecimento inicial do produto. Se não fosse usado, a pega seria praticamente instantânea, em menos de 10 minutos, praticamente inviabilizando a aplicação do concreto (BATTAGIN, 2010).

O clínquer é o material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação em um forno que chega a alcançar 1450°C de uma mistura de calcário (fonte de CaO , sob a forma de carbonato de cálcio - CaCO_3) e argila (fonte de Al_2O_3 (óxido de alumínio ou alumina)), Fe_2O_3 (óxido de ferro(III) (óxido férrico)) e também SiO_2 (dióxido de silício ou sílica)) e, quando necessário de componentes corretivos, empregados visando garantir a composição química da mistura dentro dos limites específicos (BATTAGIN, 2010).

A matéria-prima corretiva usada na indústria cimenteira tem como função fornecer elementos que não se encontram disponíveis nas matérias-primas principais, como a areia complementando a deficiência no teor de Sílica, a bauxita utilizada para suprir deficiência de Alumina e minério de ferro como fonte de ferro. A quantidade desses materiais corretivos é pequena em comparação com as matérias-primas principais. Além das substâncias obtidas das matérias-primas como CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, óxido de magnésio (MgO), anidrido sulfúrico (SO₃), óxido de titânio (TiO₂) e ainda substâncias em menores quantidades denominados álcalis como óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), há outras que são resultantes da incorporação de cinzas provenientes dos combustíveis. Tais constituintes finamente pulverizados e homogeneizados compõem o cru ou farinha (DELABRIDA, 2011).

A farinha contém aproximadamente 80% de CaCO₃, 15% de SiO₂, 3% de Al₂O₃ e quantidades menores de outros constituintes, como o ferro, o enxofre. Em forma pulverizada é conduzida à torre de ciclones. Nestas, realizando um trajeto descendente, é gradativamente pré-aquecida pelos gases que saem do forno a aproximadamente 1000°C em contracorrente. Nesta fase, iniciam-se as reações químicas durante as quais as partículas da farinha alcançam a temperatura de início da pré-calcinação do carbonato de cálcio, por volta de 800°C e que pode chegar até a 1100°C (DE PAULA, 2009).

Sinteticamente, há sucessivas reações, no forno de clínquer ou simuladores, de acordo com o incremento de temperatura:

Em temperatura em torno de 100°C ocorre evaporação da água livre num processo denominado de secagem (DELABRIDA, 2011).

Entre 150°C a 600°C, há evaporação da água de combinação das argilas.

Entre 400°C a 500°C, há decomposição do carbonato de magnésio (MgCO₃ → MgO + CO₂) (DE PAULA, 2009).

Em temperatura acima de 500°C, ocorre o processo denominado preaquecimento, no qual há desidratação da água combinada da argila (DELABRIDA, 2011).

Entre 800°C a 950°C, ocorre a calcinação, que é o processo de descarbonatação do material calcário, com produção de óxido de cálcio e liberação de CO₂ gasoso (DE PAULA, 2009). A calcinação ocorre de acordo com a reação química: CaCO₃ (carbonato de cálcio ou calcita) → CaO + CO₂ (DELABRIDA, 2011).

Entre 850 °C a 1450 °C, ocorre a reação entre o óxido de cálcio e as substâncias sílica-aluminosas, formando os principais componentes do clínquer, C₄AF, C₃A (aluminato tricálcico), C₂S (belita ou silicato bicálcico) e C₃S (alita ou silicato tricálcico), que constituirá o clínquer. Sendo que entre 1200 a 1300°C, há formação de C₃A: 3CaO + Al₂O₃ → 3CaO.Al₂O₃, e ferro aluminato tetracálcico (C₄AF): 4CaO + Al₂O₃ + Fe₂O₃ → 4CaO.Al₂O₃. Fe₂O₃ (DE PAULA, 2009).

Em temperaturas acima de 900 °C, tem início as reações entre CaO e Al₂O₃, Fe₂O₃ e SiO₂. Acima de 1200 °C ocorre a formação de fase líquida (DELABRIDA, 2011).

Entre 1350°C a 1450°C, há formação do Silicato Tricálcico:
3CaO + SiO₂ → 3CaO. SiO₂ (DE PAULA, 2009).

Resumidamente as temperaturas de reação dos compostos do clínquer são apresentadas na tabela I.

Tabela I - Temperatura de reação dos compostos do clínquer (PAULA (2009)).

Temperatura	Reação dos compostos do clínquer
Acima de 800°C	Início do processo de calcinação do CaCO ₃ .
Entre 800°C e 1200°C	Formação de C ₂ S.
Entre 1095°C e 1205°C	Formação de C ₃ A e C ₄ AF.
De 1260°C até 1455°C	Formação de C ₃ S a partir do C ₂ S com quase extinção da cal livre (CaO).
De 1455°C a 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.

O resfriamento do clínquer é importante para o término da reação química do clínquer. Ao sair do forno com temperatura de aproximadamente 1100°C, ainda incandescente e na forma de pelotas, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó (DELABRIDA, 2011).

O clínquer é constituído basicamente por 67% CaO, 22% SiO₂, 5% Al₂O₃, 3% Fe₂O₃ e 3% de outros componentes. As quatro fases principais são os silicatos alita e belita, em torno de 75%, e em menor quantidade pela fase aluminato, aluminato tricálcico (C₃A), e fase ferrítica, ferro aluminato tetracálcico (C₄AF). Ressalta-se que a alita é o principal responsável pela resistência à compressão dos concretos aos 28 dias (DE PAULA, 2009), compreendendo 40 a 70% em massa (BATTAGIN, 2010). A belita constitui 15 a 30% em peso do clínquer e as fases aluminato, 5 a 10% e a ferrítica de 5 a 15% (DE PAULA, 2009).

A notação específica, utilizada na linguagem de química de cimento, para as principais fases anidras e hidratadas do cimento Portland consta na tabela II.

Tabela II: Principais compostos anidros e os respectivos hidratos (GUILGE, 2011).

Compostos anidros			Compostos hidratados		
Nome	Fórmula química	Notação*	Nome	Fórmula química	Notação
Alita	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	Silicato de cálcio hidratado	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O	C-S-H
Belita	2 CaO.SiO ₂	C ₂ S	Etringita / Monossulfoaluminato de cálcio hidratado / aluminato de cálcio hidratado	C ₆ AŠ ₃ H ₃₂ / C ₄ AŠH ₁₆ / C ₄ AH ₁₃	AFt / AFm / C-A-H
Aluminato de cálcio	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A			
Ferro – aluminato de cálcio	3CaO.Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF			

*As notações C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF se referem às fases puras. No clínquer estas fases contêm impurezas, como Fe, Mg, Na, K, S e Al, sendo chamadas de alita, belita, aluminato de cálcio e brownmillerita (GUILGE, 2011).

2.3. Processo de hidratação do cimento

Trata-se de um fenômeno complexo que supera a simples reação química água com uma dada espécie química, que converte-se em hidrato, pela introdução de água em sua molécula. Didaticamente, divide-se o mecanismo de hidratação do

cimento em cinco etapas: estágio inicial, período de indução, período de aceleração, período de desaceleração, estágio final ou de reação lenta (Figura 1). Ao adicionar a água ao cimento, aumenta rapidamente a concentração iônica, com solubilização de fases anidras do clínquer e da gipsita. O meio líquido progressivamente passa a ficar saturado de íons cálcio (Ca^{2+}), originários do cimento, íons hidroxila (OH^-), resultantes da hidrólise da água, íons sulfato, de origem da solubilização de sulfatos alcalinos do clínquer e da gipsita. Dissociam-se também íons sódio (Na^+) e potássio (K^+), originários do cimento. Tem início a precipitação das fases hidratadas, a etringita ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ou trissulfato hidratado) e aluminatos de cálcio (Figura 2). A dissolução das fases anidras do clínquer resulta na formação de compostos de solubilidade menor, resultando na precipitação de hidratos, componentes da pasta endurecida. Nas reações de hidratação, o teor de sulfato de cálcio exerce influência retardando a pega com consequente redução da velocidade de endurecimento da pasta de cimento. A fase de enrijecimento ou densificação da pasta resulta da mudança de um sistema de núcleos aglomerados em uma suspensão concentrada e logo depois, em um sólido estruturado viscoelástico, resistente a tensões aplicadas em tempos reduzidos sem deformações consideráveis (QUARCIONI, 2008).

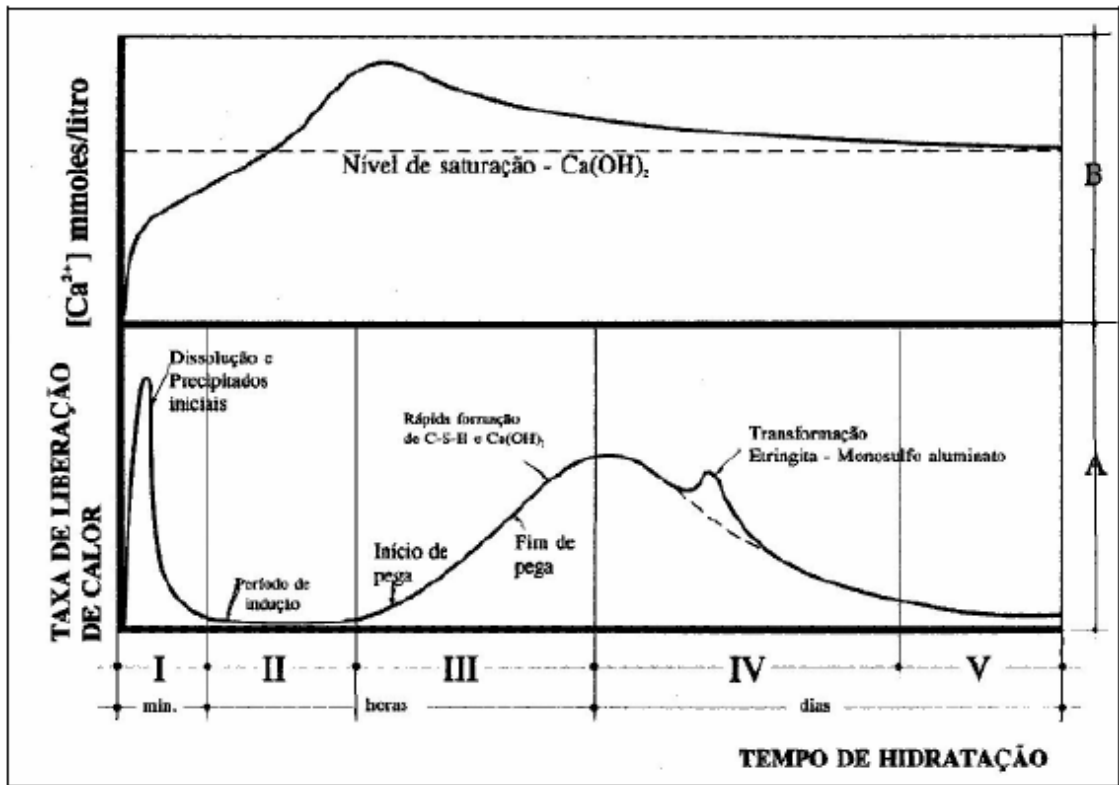


Figura 1: Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de Ca^{2+} em solução (B) em processo de hidratação do cimento Portland. Indicação das etapas de reação: Estágio Inicial (I), Período de indução (II), Período de aceleração (III), Período de desaceleração (IV) e Estágio final (V) (QUARCIONI, 2008).

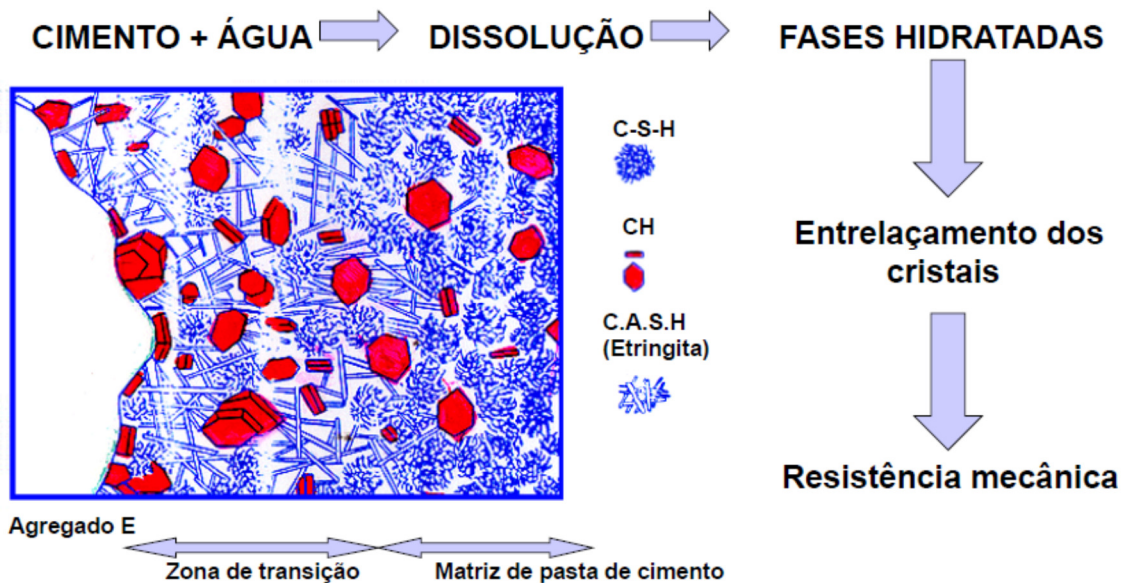


Figura 2: Noções de hidratação e pega do cimento Portland (BATTAGIN, 2010). Guilge (2011) sugere a utilização de quatro períodos de hidratação referente à liberação de calor (figura 3).

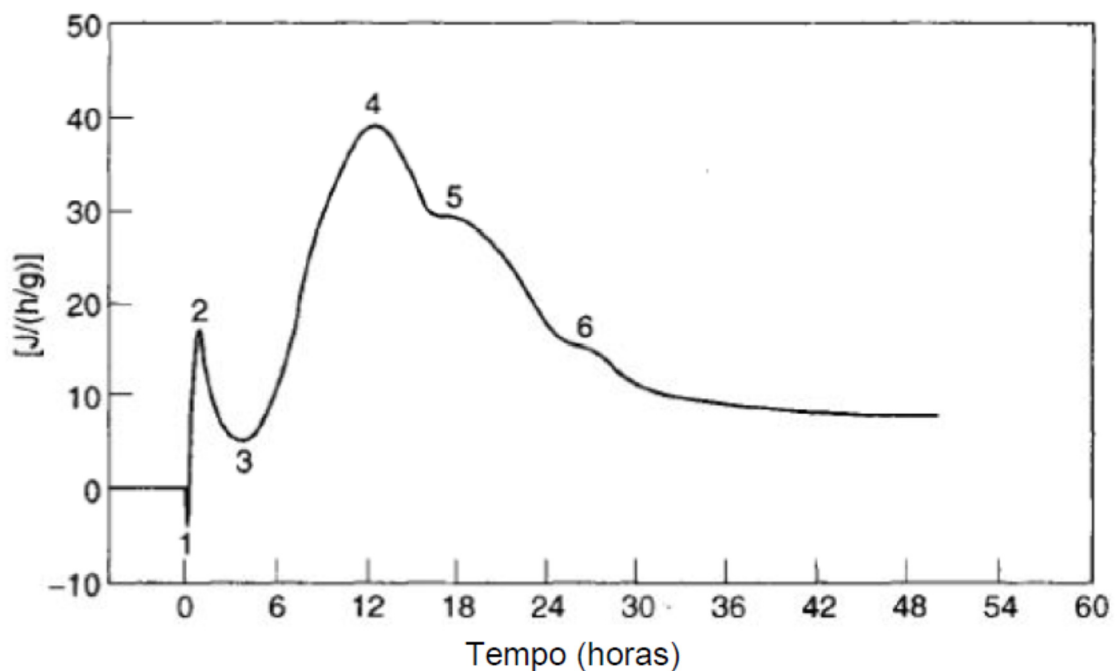


Figura 3: Calor de hidratação do cimento (GUILGE, 2011).

O primeiro período está representado pelos pontos 1 e 2 e é denominado por período de reações iniciais. Ocorre significativa liberação de energia na forma de calor por três motivos principais: molhagem das partículas, dissolução rápida do C_3S e dissolução do C_3A , composto altamente reativo. O C_3S é solubilizado nos primeiros segundos após contato com água e contribui significativamente para a liberação de calor. Essas reações duram poucos minutos e dão origem à etringita, conforme a seguinte equação: $3C_3A + 3CSH_2 + 26H_2O \rightarrow C_6A\dot{S}_3H_{32}$.

O segundo período descrito por Guilge (2011) é denominado como de indução, dormência ou de reações lentas devido à redução na velocidade das reações de hidratação (ponto 3). Essa velocidade é influenciada pela escassez de ions Ca^{2+} e $H_2SiO_4^-$ em solução. Nesse período, começam a serem formados os compostos hidratados como o C-S-H conforme a seguinte equação: $2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$. O resfriamento rápido do C_3S resulta na redução do período de indução, devido a defeitos cristalográficos. A calcinação de C_3S a $650^\circ C$ possibilita a correção de tais defeitos, tornando o cristal mais estável e com menor área disponível para reação, resultando no aumento significativo no tempo de indução.

O terceiro período relatado por esse autor é o de aceleração, representado na figura 2, entre os pontos 3 e 4. Em contraposição às reações lentas, típicas do período de indução, as reações de hidratação ocorrem em uma taxa maior. As reações de formação do C-S-H passam a ocorrer mais rapidamente resultando em resistência mecânica do cimento. Assim, o início e o fim de pega do cimento ocorrem nesse período, que é influenciado pelo fenômeno de dissolução e precipitação, dentro de determinado equilíbrio. Ao ocorrer o crescimento de C-S-H, a área disponível para reação diminui e, conseqüentemente, o mesmo para a taxa de reação.

O último período descrito por esse autor é o de desaceleração (entre os pontos 4 e 6), caracterizado por redução gradativa da taxa de reação e início de inversão na curva após atingir o calor máximo liberado tendendo a zero no final dessa etapa. As reações que ocorrem nesse período são determinadas pelo fenômeno de difusão, que é influenciado por fatores como teor de água e área específica do cimento. Entre o início da liberação de calor e o fim do período de aceleração, as reações de hidratação consomem a maioria das partículas menores que 3 µm. Por outro lado, as partículas maiores, por terem menor área de reação, são consumidas mais lentamente. A taxa de hidratação do cimento reduz devido à escassez de água no sistema quando a pasta está enrijecida, após o final da pega. A hidratação do cimento resulta em redução do espaço para solubilização e precipitação dos compostos hidratados, pois ocorre crescimento e conseqüente densificação da matriz de pasta por esses produtos. Assim, ocorre redução da taxa de hidratação devido à atuação conjunta de três fatores principais: granulometria das partículas e redução da disponibilidade de água e espaço. Enfim, esse é o período no qual as reações de formação do C-S-H reduzem, mas há formação de outras fases como a conversão de etringita em monossulfoaluminato de cálcio (C₄AŠH₁₂ ou AFm), hidratação da belita residual e formação de etringita secundária. O AFm é formado quando acaba a reserva de cálcio disponível e a relação Al/SO₃ aumenta. O C₄AŠH₁₂ é formado a partir dos seguintes reagentes: 3C₃A, C₆AŠ₃H₃₂ e 4H₂O. A reação tardia da gipsita com o C₃A resulta na etringita secundária. A belita possui vazios intersticiais menores que a alita o que a torna menos reativa. Quando hidratada origina o C-S-H de acordo com a seguinte equação: $2C_2S + 4H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$. Em idades avançadas, quando não houver mais a mobilidade iônica

necessária para que ocorra a dissolução-precipitação, as reações serão de superfície.

A hidratação do cimento é um processo que ocorre lentamente, e medidas de desempenho mecânico são tipicamente realizadas após 28 dias de cura (DWECK *et al.*, 2000). Para a formação de hidratos com maior ganho de resistência mecânica, a atividade pozolânica demanda a presença de Ca(OH)_2 e de álcalis do cimento, pH elevado para a solubilização da fase vítrea da pozolana. A resistência mecânica da pasta de cimento e de seus compósitos resulta da hidratação principalmente do silicato tricálcico ou alita e do silicato bicálcico ou belita. Esta reação resulta na formação de Ca(OH)_2 que cristaliza no meio após saturação da água de mistura e início da formação dos silicatos de cálcio hidratados (CSH), que liberam calor. Quando completamente hidratado, composição aproximada é $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$. Estudos demonstram que aproximadamente 70% de C_3S presente no cimento até 28 dias e 100% em um ano reagiu e formou etringita, portlandita e silicato de cálcio hidratado. Comparando-se pastas com até 23 anos de diferença, encontra-se um grau de cristalinidade superior na pasta mais antiga. A reatividade do clínquer é influenciada por fatores como tamanho e distribuição de partículas, que são influenciadas pela moagem e taxa de resfriamento do clínquer. A presença de elementos substituintes, como sódio e potássio na C_3S e C_2S , hidratam-se mais rapidamente que o C_3S e C_2S puros. A taxa de hidratação nos primeiros dias obedece à seguinte ordem crescente: C_2S , C_4AF , C_3S e C_3A (QUARCIONI, 2008).

Ao analisar o processo de hidratação por 24 horas (Figura 4), constatou-se que o sulfato de cálcio aparentemente é consumido para formar a etringita. O conteúdo total de carbonato de cálcio apresenta pequena elevação devido à carbonatação durante o processo (DWECK *et al.*, 2000).

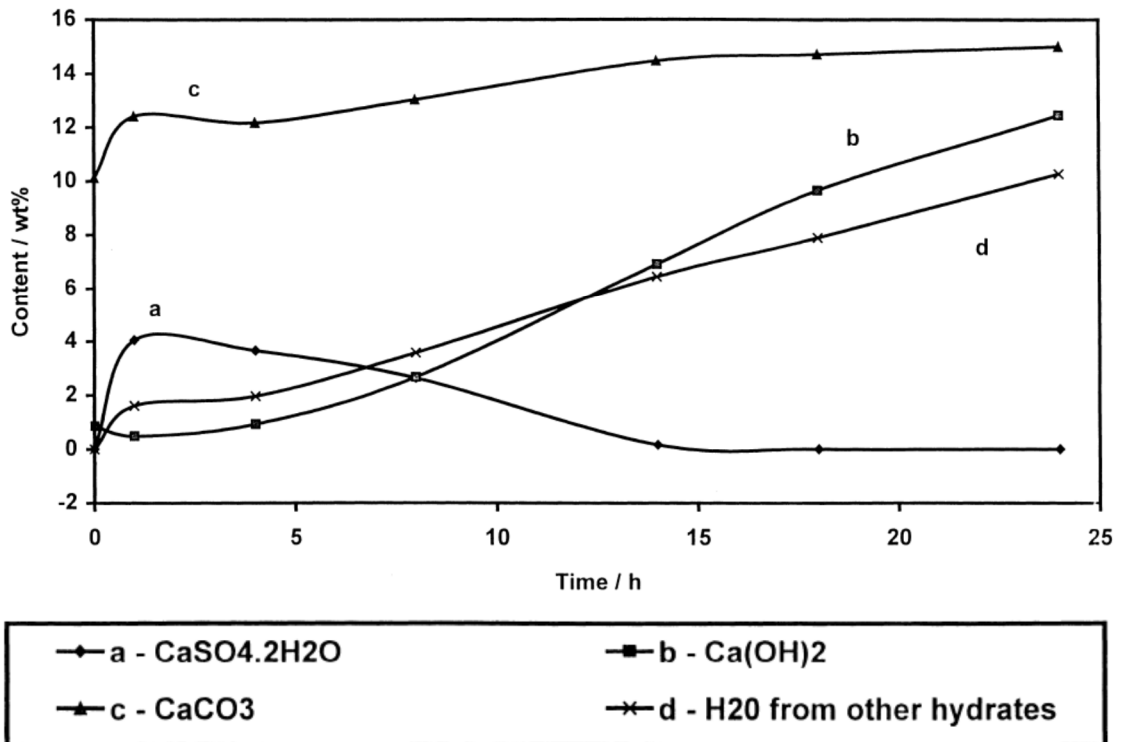


Figura 4: Composição de uma pasta de cimento em função da hidratação por 24 horas ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (a), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (b), CaCO_3 (c), água de outros hidratos (d)) (DWECK *et al.*, 2000).

A fase CSH constitui de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento totalmente hidratada. Logo, é a fase mais importante e determina as propriedades da pasta. Não é um composto bem definido. A relação C/S varia entre 1,5 a 2,0 e o conteúdo de água estrutural varia ainda mais. A resistência à compressão do material é atribuída principalmente às forças de Van Der Waals. Os cristais da portlandita compõem de 20 a 25% do volume da pasta de cimento hidratada, influenciando menos que o CSH na resistência a compressão. Os sulfoaluminatos de cálcio correspondem de 15 a 20% do volume sólido da pasta de cimento hidratada. Durante os estágios iniciais da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina da solução geralmente favorece a formação de trissulfato hidratado, $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$, etringita. Alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratadas, mesmo muito tempo depois da hidratação. Com o avanço do processo de hidratação, as partículas menores se dissolvem primeiro e desaparecem do sistema. Em seguida, as partículas maiores se tornam menores. A principal responsável pelas

resistências nos produtos sólidos da pasta de cimento hidratada é a existência das forças de Van der Waals (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.4.Desidratação do cimento

Define-se desidratação como um fenômeno relacionado à perda de água de compostos hidratados quando submetidos a ambiente de temperatura adequada em atmosfera de umidade relativa reduzida. Considera-se reidratação o fenômeno em que o material desidratado ao ser colocado em contato com a água pode resultar em novos compostos de hidratação. Há estudos que demonstraram que ao moldar novamente o resíduo de cimento endurecido moído, ocorre a hidratação, mas a resistência mecânica é baixa, sendo necessário adicionar pozolanas. Mesmo após longo período, é comum encontrar determinado teor de C_2S residual no cimento hidratado, o que ocorre devido à dificuldade de reação da belita, em relação à alita. Esse fenômeno, denominado cimentação residual, é constatado em pastas de cimento. Como o principal composto do cimento hidratado é o C-S-H, durante o processo de desidratação do cimento busca-se principalmente reobter a fase silicática anidra, por meio de tratamento térmico que possibilite a retirada da água de hidratação de compostos como os silicatos, aluminatos e sulfoaluminatos de cálcio hidratados e da portlandita. O C-S-H quando submetido a $80^\circ C$ sofre pequena decomposição e perde água livre e adsorvida. A $150^\circ C$, esse composto sofre colapso ou desestruturação mineralógica. Ao atingir, 220 a $300^\circ C$, já ocorre decomposição pronunciada do mesmo. Devido ao colapso da microestrutura e conseqüente perda de água do C-S-H, ocorre aumento da porosidade. Essa água pode ser recuperada quando o C-S-H é exposto a ambiente com maior umidade relativa (GUILGE, 2011).

De acordo com Cuoghi (2006), a exposição do concreto a altas temperaturas ainda é um processo pouco compreendido, tanto sob os aspectos macroestrutural quanto microestrutural. Na temperatura de $530^\circ C$, a portlandita se decompõe e é transformada em óxido de cálcio (CaO), que ao resfriar, pode se re-hidratar, formando novamente a portlandita. Portanto, o aquecimento pode resultar em reações químicas favoráveis.

Materiais cimentícios são expostos a variações significativas de temperatura devido a fatores como condições climáticas locais, aplicação de calor externo em concreto pré moldado e calor advindo da reação exotérmica de hidratação do cimento (DESCHNER *et al.*, 2013). As estruturas de concreto não são estáveis a altas temperaturas. Ocorrem transformações físico-químicas em agregados e na pasta, resultando em alterações das propriedades mecânicas. A principal mudança química responsável por danos internos no concreto é a formação dos hidratos (ALONSO; FERNANDEZ, 2004).

O cimento é composto principalmente de gel de silicato de cálcio hidratado, cristal de hidróxido de cálcio. Devido à complexidade da estrutura do gel, as diferentes moléculas de água requerem quantitativos distintos de energia para serem liberadas (ZHANG; YE, 2012). Esses autores aqueceram amostras de pastas de cimento de 30 a 1100°C com diferentes taxas: 1, 2, 5, 10 e 30°C/min. Quando atingia-se 200 e 400°C, mantinham-se essas temperaturas por 60 minutos até aumentar o aquecimento novamente. A reação de desidratação ocorre tanto no segmento isotérmico quanto não isotérmico. Como a energia de ativação aumenta durante a desidratação, a taxa de reação reduz gradualmente no segmento isotérmico. Conclui-se que na pasta fresca de cimento, seca a 105 °C, CSH e CH são os principais produtos da hidratação. A energia de ativação da desidratação do CH é de 151,82 kJ/mol e a do CSH varia entre 83,69 a 371,93 kJ/mol. Essa variação ocorre devido a complexidade da estrutura globulosa a alta temperatura. O modelo cinético global da pasta de cimento e os parâmetros mensurados foram verificados por comparação da perda de massa com dados experimentais.

Guilge (2011) avaliou o desempenho como ligante de resíduo de pasta de cimento endurecida e de cerâmica vermelha. A pasta de cimento CPV foi hidratada aos 28 dias e moída abaixo de 150µm. Posteriormente, diferentes alíquotas foram submetidas a tratamento térmico a 300, 500 e 650°C. A temperatura mais baixa foi escolhida por ser a que a maior parte do C-S-H se desidrata e forma um composto metaestável que pode reagir com a água. A 500°C, não há desprendimento de CO₂ do material supostamente carbonatado e ocorre aumento da quantidade de C-S-H

desidratado e pode ocasionar a quantidade de compostos metaestáveis. A partir de 500°C, os eventos térmicos estão relacionados a volatilização de CO₂ dos carbonatos. Optou-se por 650°C, pela possibilidade de ocorrer desidratação total do C-S-H quando tratado com temperaturas entre 600 e 750 °C. Apesar de que na temperatura de 750 °C tenha maior possibilidade de desidratação total, também acontece maior descarbonatação, o que é indesejável sob o aspecto ambiental. O tratamento térmico resultou em silicatos com uma forma mineralógica considerada intermediária, que pode ser reidratada, assim como ocorre a hidratação residual dos silicatos de cálcio anidros (alita e belita) disponíveis e expostos após a moagem desses materiais. Esses silicatos hidratam-se novamente resultando em um aumento de portlandita de até 10%. Os processos ocorridos em tratamentos térmicos de pasta de cimento e os resultados de resistência à compressão de argamassas confeccionadas com resíduos submetidos ou não a tratamento térmico (0°C, 300°C, 500°C e 650°C) em distintas idades de cura, obtidos por esse autor são apresentados, respectivamente, nas tabelas III e IV.

Para todas as idades, percebe-se um aumento da resistência mecânica até 500°C e depois decréscimo. Nessa temperatura, ao desidratar o cimento, é possível atingir a resistência mecânica máxima aos sete dias. Fica demonstrado que o tratamento térmico consegue conferir reatividade à pasta de cimento hidratada até determinada temperatura, acima da qual pode comprometer a reatividade, tornando-a lenta ou pouco reativa. Ressalta-se que a resistência mecânica do material composto por finos de agregado de concreto é de praticamente metade, 4,7 MPa, da obtida por material composto por cimento hidratado, 8,3 MPa. A adição de pozolanas (metacaulinita ou tijolo cerâmico) contribui para o incremento da resistência mecânica exceto no resíduo tratado a 650°C. As pozolanas aumentam a velocidade de reidratação do material e conseqüentemente a quantidade de calor liberado pelos mesmos, o que pode ser atribuído ao efeito físico de nucleação. Sugere-se repetir a mesma metodologia utilizada nesta pesquisa em finos de RCD de diferentes naturezas, obtidos em usinas de reciclagem para verificar a viabilidade da utilização destes materiais como ligantes hidráulicos alternativos e de baixo impacto ambiental. Outros estudos demonstram que ao adicionar cinza

volante ou 5% de cimento puro, a resistência passa de 4,7 MPa para 10,7 MPa e 18,4 MPa, respectivamente (GUILGE, 2011).

Tabela III: Processos ocorridos em tratamentos térmicos de pasta de cimento a 300, 500 e 650°C (GUILGE (2011)).

Processos	Temperatura		
	300°C	500°C	650°C
Remoção de água combinada dos hidratos (%)	65	92	95
Formação de silicatos intermediários	~3%	~17,8%	Elevada quantidade de silicatos intermediários. Praticamente, nenhuma quantidade de amorfo.
Quantidade de material amorfo	45,8%	~40 %	Praticamente, nenhuma quantidade de amorfo.
Portlandita	Até 10%	Readquire a Cristalinidade.	Parte do CaO se reidrata numa forma de portlandita menos cristalina.
Formação de etringita	Teores similares ao cimento hidratado inicialmente	Teores similares ao cimento hidratado inicialmente	Não ocorre nova formação da etringita.

Tabela IV: Resultados de resistência à compressão de argamassas confeccionadas com resíduos submetidos ou não a tratamento térmico em distintas idades de cura (GUILGE, 2011).

Argamassas	Resistência à compressão (MPa)		
	7 dias	28 dias	63 dias
Sem tratamento térmico	1,2	1,5	1,7
Tratamento térmico a 300°C	3,6	4,4	4,6
Tratamento térmico a 500°C	7,4	7,6	8,3
Tratamento térmico a 650°C	3,3	4,2	5,7

Sousa (2009) estudou o comportamento do concreto ao ser submetido a um tratamento térmico que simula uma situação de incêndio, com resfriamento brusco ou lento. Por meio da microscopia eletrônica de varredura constatou uma reidratação mais marcante nas amostras resfriadas bruscamente, indicando que o concreto, ao ser reidratado após o aquecimento, pode recuperar parte da resistência mecânica inicial. A elevação de temperatura resulta em gradientes térmicos e migração de água, assim como perda de umidade e transformações cristalinas implicando em mudanças significativas na micro e macroestrutura do concreto. Após a fase de resfriamento, algumas das fases cimentícias, ao se reidratarem, formam géis ou compostos cristalinos. A cal formada reidrata-se, expande-se e resulta em microfissuras na pasta. Outros estudos demonstram que podem ocorrer variações de massa distintas para concretos de resistência moderada ($f_{ck} = 37\text{MPa}$; $a/c = 0,56$) e de alta resistência ($f_{ck} = 57\text{MPa}$; $a/c = 0,60$) ao serem aquecidos até 600°C (Figura 5). Mudanças de fases ou transformações químicas podem influenciar essas variações. Até 70°C, esses tipos de concreto conservam até 99% da massa inicial, apesar da perda um pouco maior no concreto de resistência moderada. Entre 70°C e 120°C, ocorre evaporação da água livre do concreto. Entre 120°C e 350°C, devido à desidratação do C-S-H, a perda de massa é máxima. Entre 400°C e 600°C, há decomposição de portlandita e a perda de massa é menor.

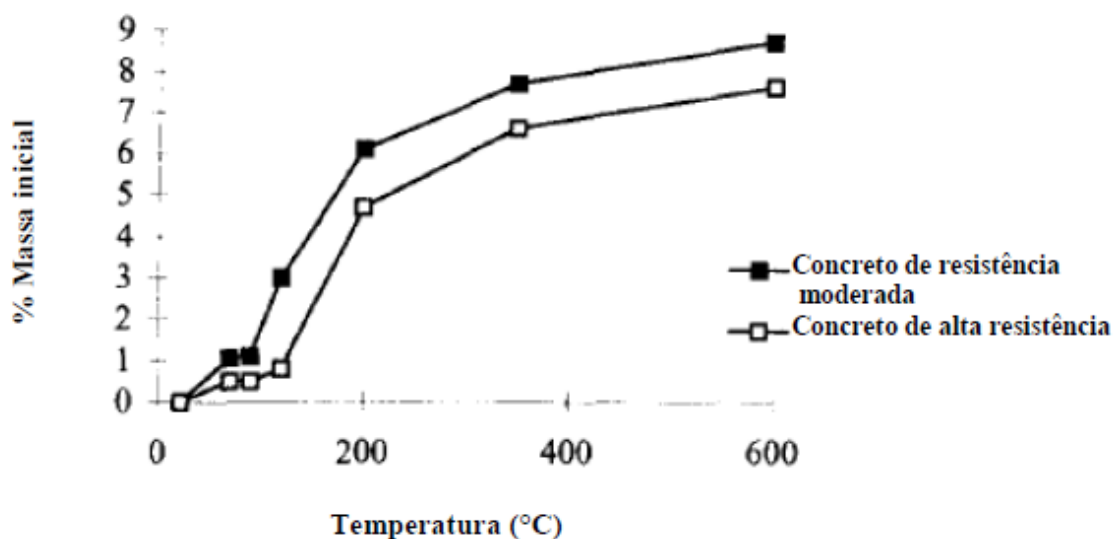


Figura 5: Variação de massa das amostras de concreto aquecidas (SOUSA, 2009).

Alonso e Fernandez (2004) aqueceram pastas de cimento a 100, 200, 450 e 750°C com o objetivo de identificar o efeito do tratamento térmico sobre as mudanças microestruturais nas transformações dos minerais. Perceberam que uma sequência de eventos ocorre durante o aquecimento, como a liberação de vapor de água e a transformação de CSH, desidratação do hidróxido de cálcio e etringita, que ocorre abaixo de 100°C. Antes de atingir 100°C, a etringita desaparece. A temperaturas acima de 200°C, há aumento de portlandita e formação de um nesossilicato. A 450°C, ocorre a transformação do gel de CSH. Acima dessa temperatura, percebe-se aumento progressivo da formação de calcita. A rehidratação de amostras aquecidas entre 450 e 750°C mostram a recristalização da calcita, portlandita e etringita e a formação de CSH a partir do novo nesossilicato. A 750°C, a transformação de CSH é completa na forma de nesossilicato com um C_2S estequiométrico próximo a larnita (Ca_2SiO_4), mas menos cristalino. Nessa temperatura, a portlandita e a calcita são convertidas para calcário. A fase anidro inicial como larnita e ferrita (tetracálcio aluminaferrita - C_4AF) permanecem inalteradas durante o aquecimento e rehidratação. Por meio da técnica de radiação sincrotrônica ou eletromagnética perceberam que a tobermorita ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot xH_2O$ ou CSH) e xonotlite ($Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$), transformam em wollastonita ($CaSiO_3$), enquanto hillebrandita ($Ca_2SiO_3(OH)_2$) evolui para larnita em pastas de cimento. Experimentos com difração de nêutrons durante aquecimentos até 620°C, confirmaram que a etringita perde a forma cristalina a aproximadamente

80°C, as fases cristalinas de CSH, como tobermorita, transformam a aproximadamente 400°C. A portlandita é decomposta pelo calor após 510°C e parcialmente recuperada com o resfriamento com diferentes fases cristalinas.

Dweck *et al.* (2000), por meio da análise da variação das massas, analisaram as reações que ocorrem durante o aquecimento de 0 a 1000°C do cimento CP (cimento Portland) II F 32 (que contém sulfato de cálcio e carbonato de cálcio). As desidratações do gel de tobermorita e etringita ocorre em temperaturas entre 100 a 135°C. Sobre as perdas de massa em função da temperatura, para a tobermorita há um pequeno pico entre 40 e 60°C. Entre 110 e 145°C, há regeneração de sulfato de cálcio dihidratado e ocorre um pequeno pico devido à decomposição de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, durante 410 e 460°C. Devido à liberação de CO_2 durante a decomposição de CaCO_3 , há um pico significativo entre 520 e 730°C. Há um pico devido a desidratação de componentes com menor participação principalmente entre 400 a 450°C. Por meio da difração de raios X, perceberam que entre 600 e 750°C ocorre a decomposição das três formas cristalinas do CaCO_3 , vaterite, aragonita e calcita, fracamente cristalizadas. A 800°C ocorre a decomposição da calcita bem cristalizada.

Alguns desses dados estão de acordo com os dados apresentados por Lima *et al.* (2004). De acordo com esse trabalho, após a temperatura de 100°C, as águas livre e capilar, presentes na pasta de cimento começam a evaporar. Até 100°C, a quantidade de portlandita decresce, devido à desidratação e à carbonatação, que se acelera em atmosferas ricas em CO_2 , como é o caso de muitos incêndios. Entre 200 e 300°C, ocorre evaporação total da água capilar, mas ainda não ocorrem alterações significativas na estrutura do cimento hidratado. O processo de desidratação do gel do CSH ocorre entre 100°C e 400°C. A 530°C, a portlandita se decompõe rapidamente e é transformada em óxido de cálcio (CaO). A portlandita pode ser novamente formada quando o CaO se rehidrata, entretanto esta apresenta um arranjo cristalino menos estável e sofrer processo de decomposição a temperaturas mais baixa que a original.

A figura 6 representa as alterações dos poros da pasta de cimento e a zona de transição de argamassas quando expostas a altas temperaturas. Entre 100 e

300°C, ocorre aumento do volume dos poros em função da perda da água associada à estrutura do silicato de cálcio hidratado. A elevação da temperatura resulta no aumento dos poros, chegando a mais de 1 µm devido ao surgimento de microfissuras. Até 450°C, não há alteração significativa no diâmetro dos poros. Acima dessa temperatura, devido à desidratação dos produtos hidratados do cimento, as modificações ocorrem de maneira mais intensa. Na zona de transição entre os agregados e a pasta, devido à diferença de movimentos desses, há surgimento das microfissuras (SOUSA, 2009).

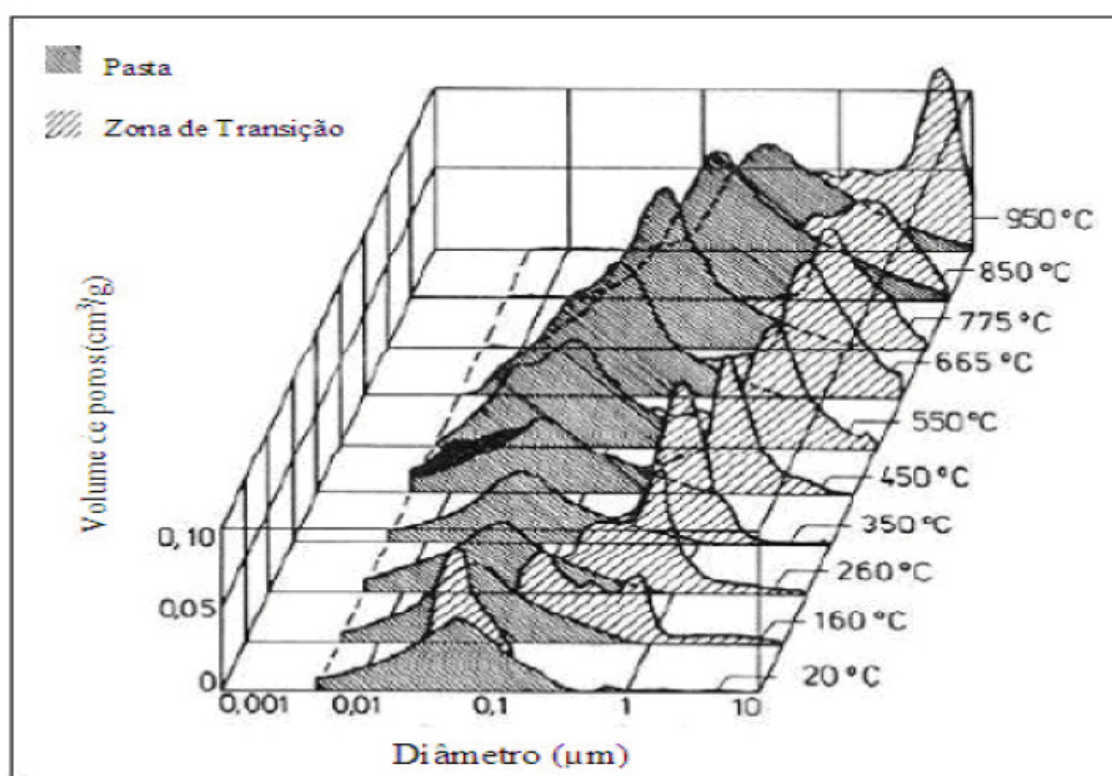


Figura 6: Evolução da distribuição de tamanho de poros da pasta de cimento e da zona de transição expostas a altas temperatura (SOUSA, 2009).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto é capaz de conservar resistência suficiente para permitir o resgate de pessoas e evitar o colapso estrutural por períodos relativamente longos quando submetido a temperaturas de 700 a 800°C. Os diversos tipos de água (livre, adsorvida e capilar) são perdidos rapidamente com o aumento da temperatura do concreto. Entretanto, a temperatura do concreto não aumenta até que toda a água evaporável for removida. Quando a temperatura aproxima-se de 300°C, a água interlamelar do CSH e parte da água

quimicamente combinada do CSH e dos sulfoaluminatos hidratados também se perdem. A 500°C, começa a ocorrer uma posterior desidratação da pasta de cimento devida à decomposição do hidróxido de cálcio. Temperaturas de aproximadamente 900°C são necessárias para a decomposição completa de CSH. O concreto de alta resistência, em relação ao concreto de resistência normal, tem perda de resistência diferente quando submetido a cargas térmicas, com maior tendência a lascas de maneira explosiva.

Após ser exposto ao fogo, e começar a esfriar e a ter contato com a umidade do ar, o processo de rehidratação inicia na pasta de cimento, que junto a mudanças no volume e na massa, leva a um aumento da porosidade e a formação de fissuras que ocorre durante o aquecimento (ALONSO; FERNANDEZ, 2004).

Sousa (2009) apresenta graficamente a evolução das fases cristalinas de cimento que possuem teor normal de aluminato tricálcio (C_3A) ao serem aquecidas (Figura 7).

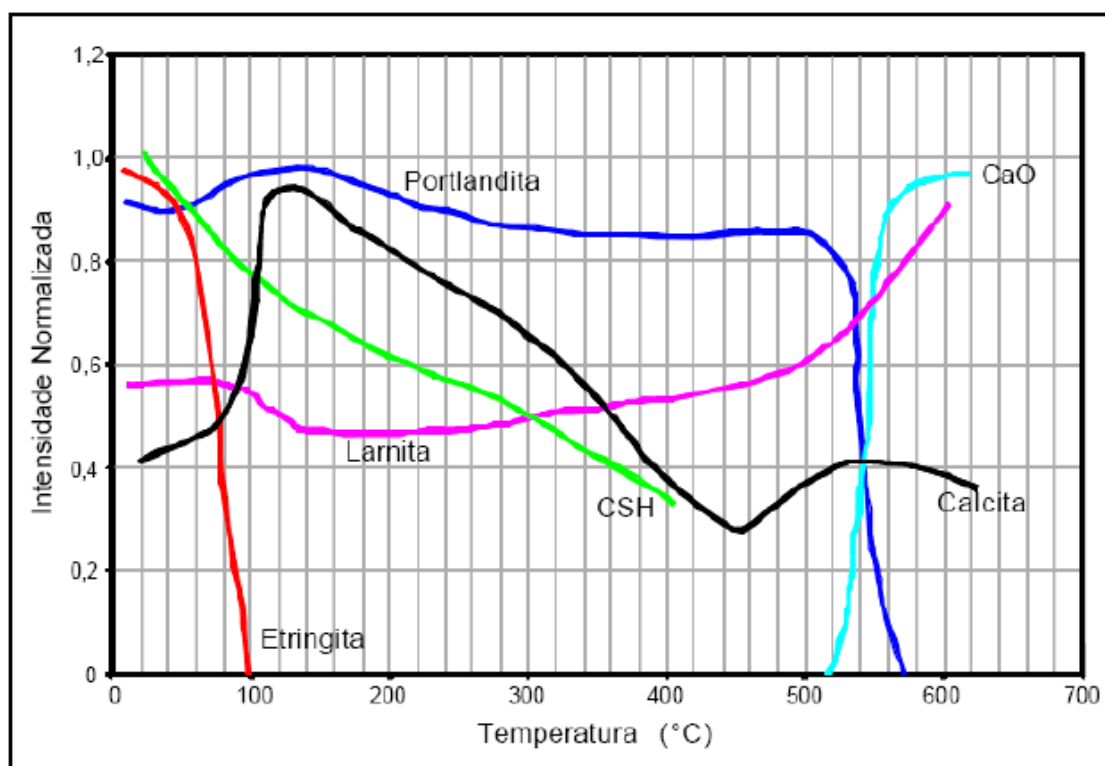


Figura 7: Evolução das fases cristalinas de cimento que possuem teor normal de aluminato tricálcio (C_3A)(SOUSA, 2009).

Na busca por uma opção de ligante mais sustentável, a desidratação do cimento hidratado para posterior reidratação tem despertado interesse mundial. Os principais métodos de desidratação ou reidratação de cimento e respectivos resultados são apresentados na tabela V (GUILGE, 2011).

Tabela V: Dados de publicações consultadas que tratam de desidratação ou reidratação de cimento (GUILGE, 2011).

Título, Autor (es), Publicação	Objetivo	Metodologia experimental				Resultados, dados e interpretações
		Amostras	Preparação	Ensaio		
				Tipo	Observações	
Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments ALONSO; FERNANDEZ Journal of Materials Science (2004)	Avaliação da microestrutura de pasta de cimento após exposição a altas temperaturas e reidratação.	Cimento com baixo C ₃ A e alcalis.	Relação a/c 0,4. Moldado em cilindros de 23x30 mm, selado e cura de 70 dias ambiente.	²⁹ Si MAS-NMR, TG/DTG, XRD	Aquecimento dos CPs a 100, 200, 450 e 750°C, com aquecimento e resfriamento lentos. Reidratação em câmara 100% UR, 3,5 meses.	Confirmou-se a perda de água de hidratação. As fases não hidratadas não foram alteradas. Um novo CSH foi encontrado a partir de 200°C e foi totalmente transformado a 450°C em um nesosilicato similar ao C2S mas com menor Cristalinidade e com relação CaO/SiO ₂ = 2. A 750°C não se encontra mais C-S-H.
The cause and influence of selfcementing propertiers of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound subbase POON; QIAO; CHAN Waste Management (2006)	Verificar as causas da autocimentação e seu mecanismo de ação em sub-bases de pavimentação.	Agregado natural, Agregados reciclados de concreto (diversas granulometrias)	Separação de 3 tamanhos (<0,15, 0,15-0,3, 0,3-0,6mm). Moldagem com a/c 0,5.	XRD, pH, RC e Permeabilidade	XRD das três granulometrias. pH com 5 g e 100 ml de H ₂ O sob agitação em diversos espaços de tempo. RC nas diferentes frações e cura a 25 e 65°C para ruptura em 7 dias.	A principal causa da autocimentação são a parte fina e a parcela de cimento não hidratado. A idade do material e a quantidade de cimento presente são fatores que regem esta capacidade autocimentante.

Tabela V (cont.): Dados de publicações consultadas que tratam de desidratação ou reidratação de cimento (GUILGE, 2011).

Título, Autor (es), Publicação	Objetivo	Metodologia experimental				Resultados, dados e interpretações
		Amostras	Preparação	Ensaio		
				Tipo	Observações	
<p>Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300°C.</p> <p>FARAGE; SERCOMBE; GALLE</p> <p>Cement and Concrete Research (2003)</p>	<p>Estudo da evolução da microestrutura de materiais cimentícios submetidos a altas temperaturas e subsequente ressaturação.</p>	<p>Pasta cimento moldado e curado devidamente.</p>	<p>a/c 0,4, 100 % de UR por 48 h.</p> <p>Colocados em plásticos selados por 7 anos.</p>	<p>MIP, Modulo elástico e</p> <p>Permeabilidade a gás.</p>	<p>80, 150, 220 e 300°C foram as</p> <p>Temperaturas de tratamento.</p>	<p>Colapso da microestrutura do C-S-H gel ente 80-150°C.</p> <p>Depois da ressaturação as pastas de cimento recuperaram a porosidade do material inicial devido a reidratação do CSH e hidratação de grãos ainda não hidratados.</p>
<p>Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment</p> <p>SHUI; XUAN; WAN; CAO</p> <p>Construction and Building Materials (2008)</p>	<p>Estudo do emprego de finos de RCA tratados termicamente como principal componente de argamassas de construção.</p>	<p>Pasta de cimento endurecida,</p> <p>Finos de RCA, OPC e fly ash (5 e 20% respectivamente).</p>	<p>Separação por leve moagem e peneiramento.</p> <p>Moldagem da pasta 20x20x20 mm e argamassa 40x40x160 mm.</p>	<p>TG/DTG, XRD, SEM, RC.</p>	<p>Materiais tratados termicamente a 500°C.</p> <p>RC a 7 e 28 dias.</p>	<p>A composição do FRCA tratado foi basicamente: areia, CSH desidratado, C₂S, CaO e Portlandita. As fases como C-S-H gel, etringita e portlandita foram recompostas, mas a microestrutura é mais pobre. A adição de cimento e fly ash melhora muito o comportamento mecânico e acelera a reidratação.</p>

Tabela V (cont.): Dados de publicações consultadas que tratam de desidratação ou reidratação de cimento (GUILGE, 2011).

Título, Autor (es), Publicação	Objetivo	Metodologia experimental				Resultados, dados e interpretações
		Amostras	Preparação	Ensaio		
				Tipo	Observações	
<p>Inversion of the cement hydration as a new method for identification and/or recycling?</p> <p>SPLITTGERBER; MUELLER</p> <p>International Congress on the Chemist of Cement (2003)</p>	<p>Avaliar a possibilidade de se obter fases anidras do cimento a partir do tratamento térmico e verificar a possibilidade de um ciclo de uso do material.</p>	<p>Fases puras, Escoria de AF, Argamassas.</p>	<p>Moldagem, Cura 180 dias,</p> <p>Moagem das pastas (63Ym) e argamassa (1 mm), aquecimento (600, 900, 1100, 1200 e 1400 °C).</p>	<p>TG/DTG, Calorimetria, XRD, RC, Dist. Part., Area esp.,AQ.</p>	<p>XRD foi o principal instrumento de análise.</p>	<p>As fases do cimento são completamente reversíveis se aquecidas a temperatura de clinquerização se não existirem adições.</p> <p>E possível identificar o tipo de cimento utilizado de acordo com as temperaturas empregadas.</p> <p>O uso deste material tratado serve para argamassa, mas com adições, pois tem potencial hidráulico reduzido.</p>

Tabela V (cont.): Dados de publicações consultadas que tratam de desidratação ou reidratação de cimento (GUILGE, 2011).

Título, Autor (es), Publicação	Objetivo	Metodologia experimental				Resultados, dados e interpretações
		Amostras	Preparação	Ensaio		
				Tipo	Observações	
<p>Reactivity in recycled concrete aggregate</p> <p>KARLSSON International PhD Symposium in Civil Engineering (1998)</p>	<p>Estudo da reatividade de agregados de concreto e da moagem como ativador de grãos não hidratados.</p>	RCA	<p>Moldagem, Cura, britagem e moagem até granulometria do cimento.</p> <p>Remoldagem a/c 0,5.</p>	RC, TG/DTG	<p>RC : 8 (remoldado e retestado aos 36 e 52 dias), 28 (remoldado e retestado aos 31 dias) e 44 dias (remoldado e retestado aos 8 e 15 dias).</p>	<p>A moagem ate finura do cimento não ajuda na hidratação dos núcleos não hidratados do cimento. Moagem causa aumento no teor de amorfo, quando utilizado superplastificante na moagem, e destrói também os grãos de sílica. Estes reagem com a portlandita formando C-S-H (reações pozolânicas).</p>
<p>Cement minerals at elevated temperature: Thermodynamic and structural characteristics</p> <p>BRUTON; PHILLIPS; MEIKE; MATIN; VIANI</p> <p>Lawrence Livermore National Laboratory (1993)</p>	<p>Estudo da termodinâmica e mecânica de hidratação e desidratação dos silicatos de cálcio do cimento.</p>	C-S-H sintético	Não informa.	<p>Modelagem molecular, NMR, XRD com câmara ambiental.</p>	<p>Modelagem por software.</p> <p>XRD antes e depois do aquecimento.</p>	<p>O CSH com aquecimento pode mudar de estrutura, Ex: de tobermorita 14 A para 11 A.</p> <p>Picos de C-S-H dependem do grau de polimerização.</p>

Tabela V (cont.): Dados de publicações consultadas que tratam de desidratação ou reidratação de cimento (GUILGE, 2011).

Título, Autor (es), Publicação	Objetivo	Metodologia experimental				Resultados, dados e interpretações
		Amostras	Preparação	Ensaio		
				Tipo	Observações	
<p>Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures</p> <p>SHUI; XUAN; CHEN; YU; ZHANG</p> <p>Construction and Building Materials (2009)</p>	<p>Estudar as características cimentícias e a capacidade de</p> <p>Reidratação dos cimentos tratados termicamente.</p>	<p>Cimento comum</p>	<p>a/c 0,5. 30 dias de cura em câmara úmida.</p> <p>Britagem menor que 25 mm e secagem 80°C.</p> <p>Moagem 75µm.</p> <p>Calcinação 300,....,900 °C.</p>	<p>Consistência,</p> <p>Tempo de pega,</p> <p>Grau de hidratação,</p> <p>RC, SEM</p>	<p>Consistência e tempo de pega foram de acordo com a ASTM sendo finalizado quando o material apresentou limitações. RC 3, 7 e 28 dias.</p>	<p>Aumentou a quantidade de água de amassamento com o aumento da temperatura.</p> <p>A resistência deste material e devido a hidratação de grãos não hidratados e também a reidratação.</p> <p>Reidratação rápida formando estrutura áspera e irregular.</p> <p>Redução do tamanho dos grãos de acordo com a temperatura.</p> <p>E a capacidade cimentícia do Material depende também da temperatura.</p>

6. CONCLUSÃO

Têm-se demonstrado que os finos de resíduos de concreto, contendo pasta de cimento, ao serem tratados termicamente, podem reidratar. O principal composto do cimento hidratado é o C-S-H, que forma-se em maior quantidade e determina a resistência mecânica. Logo, durante o processo de desidratação do cimento busca-se principalmente reobter a fase silicática anidra, por meio de tratamento térmico que possibilite a retirada da água de hidratação de compostos como os silicatos, aluminatos e sulfoaluminatos de cálcio hidratados e da portlandita. Portanto, o aquecimento pode resultar em reações químicas favoráveis como a formação de silicatos com uma forma mineralógica considerada intermediária, que pode ser reidratada, assim como ocorre a hidratação residual dos silicatos de cálcio anidros (alita e belita) disponíveis e expostos após a moagem desses materiais.

Um dos trabalhos revisados relata que o tratamento térmico consegue conferir reatividade à pasta de cimento hidratada até 500°C, acima da qual pode comprometer a reatividade, tornando-a lenta ou pouco reativa, o que implica na resistência mecânica. A maioria das temperaturas utilizadas para tratamento estão abaixo de 650°C, o que reduz consideravelmente o processo de decarbonatação, principal responsável pelas emissões de CO₂ durante a produção de um ligante. Esta medida implicaria em ganhos ambientais como a redução da extração de matéria prima e menor gasto energético, pois as temperaturas de calcinação, de 800°C a 950°C, são inferiores às utilizadas na produção de cimento.

Apesar do novo tipo de cimento ter resistência mecânica limitada, pode ser utilizado para aplicações como estabilização de pavimentos, obras de geotecnia, elementos pré-fabricados não estruturais. A resistência mecânica pode ser incrementada se o resíduo for utilizado combinado com resíduos de cerâmica vermelha, que possui atividade pozolânica, com cinzas volantes e com pequenas quantidades de cimento puro. A adição de pozolanas (metacaulinita ou tijolo cerâmico) contribui para o incremento da resistência mecânica exceto no resíduo tratado a 650°C. As pozolanas aumentam a velocidade de reidratação do material e conseqüentemente a quantidade de calor liberado pelos mesmos, o que pode ser atribuído ao efeito físico de nucleação. Outros estudos demonstram que ao

adicionar cinza volante ou 5% de cimento puro, a resistência passa de 4,7 MPa para 10,7 MPa e 18,4 MPa, respectivamente. Em contrapartida, há pesquisas estudos que concluem que sobre viabilidade técnica de adicionar até 35% de resíduo calcinado na fabricação de cimentos.

Sugere-se testar o tratamento térmico para finos de resíduos de construção e demolição (RCD) de diferentes naturezas, obtidos em usinas de reciclagem para verificar a viabilidade da utilização destes materiais como ligantes hidráulicos alternativos e de baixo impacto ambiental.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, C., FERNANDEZ, L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. **Journal of Materials Science**. v. 39, p 3015-3024, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.
- BATTAGIN, A.F. O cimento Portland no Brasil. IN: **Materias de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Ed. ISAIA, G.C. 2. ed. - São Paulo: Editora Ibracon, 2010. p.761-790.
- CUOGHI, R. S. **Aspectos da análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Paulo: Universidade de São Paulo-Escola Politécnica, 2006.
- DE ARAÚJO, S.M.C., NOGUEIRA, M.S., DA SILVA, M.J., NETO, J.T.S., BEZERRA, A.C.S. Resíduos da construção e demolição calcinados em compositos cimentícios. **Revista Sodebras**. v. 8, n. 95, Nov. 2013.
- DESCHNER, F., LOTHENBACH, B., WINNEFELD, F., NEUBAUER, J. Effect of temperature on the hydration of Portland cement blended with siliceous fly ash. **Cement and Concrete Research**. n.52, p.169–181, 2013.
- DWECK, J., BUCHLER, P.M., COELHO, A.C.V., CARTLEDGE, F.K. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. **Thermochimica Acta**. v.346, p.105-113, 2000.
- DELABRIDA, M. G. **Melhoria em um processo de produção de uma indústria cimenteira no centro-oeste – MG**. Trabalho conclusão de curso (Graduação Engenharia de Produção). Formiga: Unifor-MG, 2011.
- DE PAULA L.G. **Análise Termo econômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-processamento de Misturas de Resíduos**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Itajubá-MG: Universidade Federal de Itajubá, 2009.
- EICKHOUT, B.; BOUWMAN, A.F.; VAN ZEIJTS, H. The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 116, p.4-14, 2006.
- FRAGA, M. Panorama da Geração de Resíduos da Construção Civil em Belo Horizonte: Medidas de Minimização com base no projeto e Planejamento de

- obras, 2006. Disponível em: <<http://seumeioambiente.blogspot.com/2008/07/impactos-ambientais-da-construo-civil.html>> Acesso em: 15 jul. 2011.
- GUILGE, M.S. **Desenvolvimento de ligante hidraulico a partir de resíduos de Cimento Hidratado, Tijolo Cerâmico e Metacaulinita**. Dissertação (Mestrado em Habitação). São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de Sao Paulo, 2011.
- INVENTÁRIO de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Minas Gerais. [Belo Horizonte, Brasil]: FEAM / UFRJ - CENTRO CLIMA, 2008. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/inventario_gee%5B1%5D.pdf> Acesso em 10 dez. 2009.
- ISAIA, G. C. 2007 Prólogo IN: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Ed. ISAIA, G. C. – São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). 2007, 2v. 1712p.
- JOHN, Vanderley M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**: ISAIA, G. C. Vol. 1. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). 2007. p. 95-118.
- LAL, R. Managing world soils for food security and environmental quality. **Advances in Agronomy**, v. 74, p. 155-192, 2001.
- LIMA, R.C.A. Efeito de altas temperaturas no concreto. **Anais do II Seminário de Patologia das Edificações**. Porto Alegre: LEME/UFRGS: 2004.
- MATZINGER, S. Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil, 2009. Disponível em: <http://www.mckinsey.com.br/sao_paulo/carbono.pdf>, acesso em 10 jul. 2011.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Editora Ibracon, 2008. 2 v. 248 p.
- NASCIMENTO, L.A., SANTOS, E.T. A indústria da construção na era da informação. **Ambiente construído**, v.3, n.1, p.69-81, 2003.
- QUARCIONI, V.A. **Influência da cal hidratada nas idades da hidratação do cimento Portland – estudo em pasta**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

- VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 4, p. 47-63, out./dez. 2004.
- SANCHEZ, P.A. Linking climate change research with food security and poverty reduction in the tropics. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.82, p.371-383, 2000.
- ZHANG, Q., YE, G. Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v.110, p.153–158, 2012.