

CAVALCANTE; Ana Valéria Duarte<sup>1</sup>, RIBAS; Luciane Farias<sup>2</sup>

### RESUMO

**1. RESUMO** A escassez de insumos oriundos de recursos naturais e os impactos do processo de produção do cimento são razões para o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis. Reduzir o consumo de cimento é uma dessas alternativas, e isso pode ser feito reciclando materiais cimentícios hidratados por meio da reidratação. Por isso o objetivo desse artigo é compreender o processo de reidratação de argamassas e concretos desidratados e os efeitos nas propriedades de novos materiais produzidos a partir desses produtos, por meio de revisão sistemática, identificando o mecanismo de reativação de fases hidratadas de argamassas e concretos. As buscas foram realizadas na base de dados da Science Direct no período de 2018 a 2019. A busca resultou em 31 artigos que apresentavam o processo de ativação do cimento hidratado e as propriedades de concretos e argamassas com cimento desidratado. A análise dos artigos permitiu compreender como as reações de desidratação e decomposição em pastas de cimento hidratada ocorrem. Foram ainda identificados os compostos formados após a degradação térmica e que é possível a reação com a água formando produtos iniciais de hidratação tais como etringita, gel C-S-H e CH. Quanto ao desempenho de concretos e argamassas com esses produtos desidratados, ainda são necessárias mais pesquisas. Mas já é de conhecimento que o melhor desempenho mecânico é alcançado quando essas fases são decompostas na faixa de 660 a 800°C. É também relatada a baixa reatividade de concretos desidratados devido ao elevado teor de agregados em concretos. A pesquisa demonstrou que estudos ainda precisam ser realizados para viabilizar o uso de argamassas e concretos reidratados. Tais estudos podem agregar valor a um resíduo ainda com aplicações de reciclagem restrita. **2. ABSTRACT** The scarcity of inputs from natural resources and the impacts of the cement production process are reasons for the development of more sustainable alternatives. Reducing cement consumption is one of these alternatives, and this can be done by recycling hydrated cementitious materials through rehydration. Therefore, the objective of this article is to understand the rehydration process of dehydrated mortars and concretes and the effects on the properties of new materials produced from these products, through a systematic review, identifying the mechanism of reactivation of hydrated clay and concrete phases. The searches were carried out in the Science Direct database from 2018 to 2019. The search resulted in 31 articles that presented the hydrated cement activation process and the properties of concretes and mortars with dehydrated cement. The analysis of the articles allowed us to understand how the reactions of dehydration and decomposition in hydrated cement pastes occur. It was also identified the compounds formed after thermal degradation and that it is possible to react with water forming initial hydration products such as ettringite, gel C-S-H and CH. As for the performance of concretes and mortars with these dehydrated products, further research is still needed. But it is already known that the best mechanical performance is achieved when these phases are decomposed in the range of 660 to 800°C. It is also reported the low reactivity of dehydrated concretes due to the high content of aggregates in concretes. The research showed that studies still need to be carried out to make the use of mortars and rehydrated concrete possible. Such studies can add value to a waste still with restricted recycling applications. **KEYWORDS:** rehydrated; cement; mortar; concrete **3.**

<sup>1</sup> Centro Universitário Fames, lfr2009@gmail.com

<sup>2</sup> Centro Universitário Fames, lfr2009@gmail.com

**INTRODUÇÃO** A demanda mundial por cimento ainda é alta, e a indústria do cimento tem procurado alternativas para diminuir os impactos de sua produção. Isso porque o processo de produção do cimento é um dos maiores emissores de CO<sub>2</sub> do planeta. Nesse sentido, muitas pesquisas buscam desenvolver novos cimentos que possam reduzir a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> durante o processo de queima, necessário à sua produção, ou redução do seu consumo em compósitos cimentícios. Uma das alternativas mais usuais é o uso de materiais pozolânicos, os quais são utilizados com o propósito de reduzir o consumo de cimento. Os processos utilizados para a ativação desses materiais podem ser químicos, térmicos e mecânicos. A ativação consiste na transformação de fases estáveis, ou não, desses materiais para que possam reagir na presença da água e formar compostos similares ao C-S-H do cimento. Nessa linha existem ainda os compostos cimentícios hidratados e carbonatados. Esses compostos são obtidos após tratamento térmico a temperaturas mais baixas que as utilizadas na produção do cimento Portland. O objetivo principal é compreender o processo de rehidratação de argamassas e concretos desidratados e os efeitos nas propriedades de novos materiais produzidos a partir desses produtos, por meio de revisão sistemática, identificando o mecanismo de reativação de fases hidratadas de argamassas e concretos. **4. METODOLOGIA** O artigo trata-se de uma pesquisa sistemática sobre rehidratação de argamassas e concretos desidratados. A pesquisa foi realizada na base de dados science direct (link) no período de agosto de 2018 a maio de 2019. O termo de busca usado para localizar os artigos nesta base foi: “rehydrated cement”. Na busca foram encontrados com esses termos 1412 artigos. Foi feito o corte temporal de 2015 a 2019, resultando em 379 artigos. Os filtros adotados para a pesquisa disponíveis na base de dados foram: tipo de publicação e área. Os tipos de publicação escolhidos foram artigos de revisão e de pesquisa, o que resultou em 329 artigos. A área escolhida foi engenharia, que resultou em 79 artigos. O critério de inclusão foi de artigos que abordassem a rehidratação de argamassas e concretos. O critério de exclusão foi de artigos que abordassem apenas sobre a rehidratação de pastas cimentícias ou de outros materiais. Essa triagem foi realizada por meio de leitura dos objetivos dos artigos. Após essa triagem foram selecionados 13 artigos que atendiam aos critérios de inclusão e exclusão. Após leitura na íntegra desses artigos foram encontradas informações sobre o processo de ativação do cimento hidratado e as propriedades de concretos e argamassas com cimento desidratado. Os artigos ainda citavam outros autores que de alguma forma contribuíram em anos anteriores a 2015 para as pesquisas sobre rehidratação de argamassas e cimento. Esses autores foram também inseridos na pesquisa pela importância das suas contribuições. São artigos do período de 1999 a 2014, os quais foram publicados sistematicamente ano a ano, correspondendo a 17 artigos. Apenas um artigo foi publicado fora desse período, no ano de 1980 o qual tratava da mudança na estrutura dos poros de argamassas com a temperatura. No total a revisão sistemática foi realizada com 31 artigos. **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO** A transformação química ocorre na pasta hidratada a determinadas temperaturas. Este processo explica a recuperação parcial da resistência observada em estruturas de concreto que sofreram danos por incêndio após hidratação (POON et al., 2001; MEMON et al. 2019; PEI et al. 2019). As reações de desidratação e decomposição em pastas de cimento hidratada contribuem para a rápida degradação das propriedades do concreto, particularmente acima de 300°C. Isso porque todas as fases hidratadas da pasta de cimento se desidratam progressivamente transformando-se em fases anidras, diminuindo a densidade do empacotamento e aumentando a porosidade das pastas (PHAN et al., 2001; HANDOO et al., 2002; CASTELLOTE et al., 2004; JANOTKA e MOJUMDAR, 2005; MENDES et al., 2008; SCHEPPER et al., 2014; WANG et al., 2016; TAKAHASHI e SUGIYAMA, 2019). A liberação de água livre e água de ligação nos produtos de hidratação é o processo principal, e alguns produtos de hidratação são gradualmente desidratados a temperaturas específicas, como etringita, silicato de

<sup>1</sup> Centro Universitário Fames, lfr2009@gmail.com

<sup>2</sup> Centro Universitário Fames, lfr2009@gmail.com

cálcio hidratado (gel C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH). O processo de desidratação da pasta de cimento endurecido é completado a uma temperatura em torno de 800°C. A composição da pasta de cimento desidratada (PCD) é muito complexa e consiste em fases compostas por produtos parcialmente desidratados, produtos de hidratação residual e cimento não hidratado (Shui et al., 2009). Ao entrar em contato com a água novamente, a PCD é reidratada (FARAGE et al., 2003). Entre todos os produtos de hidratação, a etringita desidrata primeiro até 100 °C, mas não se decompõe e mantém a ordem de curto alcance em sua estrutura (SHIMADA e YOUNG, 2001). As fases desidratadas dos produtos de hidratação podem reagir com água para formar os produtos iniciais de hidratação tais como etringita, gel C-S-H e CH (SHUI et al., 2009). As reações de transformação em PCD durante o tratamento térmico ocorrem em temperaturas de 300°C a 900°C. Na faixa de temperatura de 100°C a 300°C, as perdas de massa são atribuídas principalmente à perda de água do gel C-S-H. Esse efeito no concreto é caracterizado pelo aparecimento de microfissuras relacionadas a incompatibilidades de tensão entre os agregados (que se expandem após o aquecimento) e a pasta de cimento (que se encolhe após o aquecimento) quando submetidos a essa faixa de temperatura (ROSTASY et al., 1980; GALLÉ e SERCOMBE, 2001). A temperatura de 450°C, o CH coexiste com C-S-H parcialmente desidratado e C-S-H modificado. Se submetido à condição úmida novamente, etringita e novo gel C-S-H são formados (ALONSO e FERNANDEZ, 2004). Em temperaturas até 750°C, as fases desidratadas são, principalmente, etringita desidratada, C-S-H desidratado, óxido de cálcio (CaO), Carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e fases anidras, sem CH (ALARCON-RUIZ et al., 2005). As mesmas reações na reidratação são também observadas com produção de novo CH, que vem da reação de CaO com água. Após a exposição a 850 °C, o C-S-H desidratado com relação CaO/SiO<sub>2</sub> menor que 1,5 transforma-se numa nova fase cristalina, que é semelhante à wollastonita (CaSiO<sub>3</sub>) dos produtos de desidratação de tobermorita e xonotlita (SHAW et al., 2000). Se a razão CaO/SiO<sub>2</sub> for maior do que 1,5, pode formar o novo nesossilicato cuja composição é próxima do larnita (β-C<sub>2</sub>S) (OKADA et al., 1994). Como resultado, um novo gel C-S-H é parcialmente formado pela reação de reidratação de produtos de transformação com água. Além disso, durante todo o processo de reidratação, o cimento inicialmente não hidratado em PCD pode reagir com a água e formar os produtos de hidratação comumente formados (SHUI et al., 2009). Após a re-saturação, a reidratação das fases anidras formadas é acompanhada por recuperação parcial da estrutura inicial dos poros e recuperação parcial das propriedades mecânicas da pasta (POON et al., 2001; FARAGE et al., 2003, PEI et al., 2019). No entanto, apesar da reversibilidade aparente, as fases anidras obtidas a partir da desidratação são diferentes das fases anidras no cimento original. Nos estudos de Letelier et al. (2017) não encontraram significativa diferença nas propriedades mecânicas de concreto com 15% de PCD na faixa de temperatura de 400° a 900°C. Shui et al. (2009) exploraram o efeito da temperatura de desidratação entre 300°C e 900°C em várias propriedades de pastas com PCD, tais como: água requerida para consistência padrão, tempo de secagem, grau de reidratação e resistência à compressão. A maior resistência à compressão aos 28 dias obtida foi equivalente a 60% da resistência desenvolvida por pastas de cimento Portland na mesma idade, cuja temperatura de desidratação foi a 800°C (SHUI et al., 2009). Wang et al. (2018) obtiveram resistência a compressão em pastas com PCD a temperatura de 450°C. Pastas com PCD requerem elevada quantidade de água para consistência normal, devido a elevada área de superfície específica das partículas (SHUI et al., 2009, BOGAS et al., 2019). Quanto ao uso de PCD em argamassas, o aumento da temperatura de reativação na faixa de 660 a 800°C aumenta a resistência à compressão dessas argamassas, enquanto a temperatura de reativação crescente na faixa de 800 a 940°C diminui a resistência à compressão (SERPELL e LOPEZ, 2015). O efeito da temperatura de reativação de PCD em argamassas com substituição de cimento desidratado por sílica ativa é independente do teor. O

<sup>1</sup> Centro Universitário Fаметro, lfr2009@ymail.com

<sup>2</sup> Centro Universitário Fаметro, lfr2009@ymail.com

estudo Serpell e Lopez (2015) demonstrou que a maior resistência à compressão é alcançada com qualquer nível de substituição desde que a PCD seja produzida a 800°C. Porém, ressalta-se que, a expansão das argamassas com PCD aumenta com temperatura de reativação acima de 800°C.

**6. CONCLUSÕES** Quanto ao processo de rehidratação de argamassas e concretos desidratados e os efeitos nas propriedades de novos materiais produzidos a partir desses produtos, a revisão sistemática foi eficiente uma vez que foi possível identificar nos artigos tais informações. Foi possível entender que as reações de desidratação e decomposição em pastas de cimento hidratada ocorrem acima de 300°C. Os compostos formados após a degradação térmica de todas as fases hidratadas da pasta de cimento se transformam em fases anidras. A desidratação e decomposição total desses compostos de cimento endurecido são completadas a uma temperatura em torno de 800°C. Essas fases desidratadas reagem com água e formam os produtos iniciais de hidratação tais como etringita, gel C-S-H e CH.

**7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** ALARCON-RUIZ, L., PLATRET, G., MASSIEU, E., EHRLACHER, A. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste Cement and Concrete Research. V. 35. Pg.609-613. 2005. ALONSO, C. ; FERNANDEZ, L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments, Journal Materials Science. V. 39. Pg. 3015 - 3024. 2004. BOGAS, J. A., CARRIÇO, A., PEREIRA, M. F.C. Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. Journal of Cleaner Production. V 218. Pg 377 - 389. 2019. BORDY, A., YOUNSI, A., AGGOUN, S., Fiori, B. Cement substitution by a recycled cement paste fine: Role of the residual anhydrous clinker. Construction & Building Materials. V. 132. Pg. 1 - 8. 2017. CASTELLOTE M, ALONSO C, ANDRADE C, TURRILLAS X, CAMPO J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. Cement and Concrete Research. V. 34. Pg. 1633 – 1644. 2004. FARAGE, MCR; SERCOMBE, J; GALLÉ, C. Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300 °C. Cement and Concrete Research. V. 33. Pg. 1047 – 56. 2003. GALLÉ, C.; SERCOMBE, J. Permeability and pore structure evolution of silico-calcareous and hematite high-strength concretes submitted to high temperatures. Materials and Structures. V. 34. Pg. 619 – 628. 2001. HANDOO SK, AGARWAL S, AGARWAL SK. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. Cement and Concrete Research. V. 32. Pg. 1009 –18. 2002. JANOTKA I, MOJUMDAR SC. Thermal analysis at the evaluation of concrete damage by high temperatures. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. V. 81. Pg.197 – 203. 2005. KAUR, K., SINGH, J., KAUR, M. Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator. Construction & Building Materials. V. 169. Pg. 188 – 192. 2018. MEMON, S. A., SHAH, S. F. A., KHUSHNOOD, R. A., BALOCH, W. L. Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature – A review. Construction & Building Materials. V 199. Pg. 435 – 455. 2019. MENDES A, SANJAYAN J, COLLINS F. Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures. Materials and Structures. V. 48. Pg. 345 – 50. 2008. MOON, G. D., OH, S., JUNG, S.H., CHOI, Y. C. Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. Construction & Building Materials. V 135. Pg. 129 – 136. 2017. OKADA Y, SASAKI K, ZHONG B, ISHIDA H, MITSUDA T. Formation processes of  $\beta$ -C2S by the decomposition of hydrothermally prepared C–S–H with Ca(OH)2. Journal Of The American Ceramic Society. V. 77. Pg. 1319 – 23. 1994. PEI, Y., LI, S., AGOSTINI, F., SKOCZYLAS, F. Effects of severe heating and rehydration on poro-mechanical properties of a mortar. Cement and Concrete Research. V 115. Pag. 460 – 471. 2019. PHAN L, LAWSON J, DAVIS F. Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. Materials and Structures. V. 34. Pg. 83 – 91. 2001. POON CS, AZHAR S,

<sup>1</sup> Centro Universitário Fametro, lfr2009@ymail.com

<sup>2</sup> Centro Universitário Fametro, lfr2009@ymail.com

ANSON M, WONG Y. Strength and durability recovery of firedamaged concrete after post-fire-curing. *Cement and Concrete Research*. V. 31. Pg. 1307 – 18. 2001.

PUERTAS, F.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; GONZÁLEZ-TABOADA, I.; ALONSO, M.M.; TORRES-CARRASCO, M.; ROJO, G.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. Alkali-activated slag concrete: Fresh and hardened behavior. *Cement and Concrete Composites* Volume 85, January 2018, Pages 22-3.

ROSTASY, F.S.; WEISS, R.; WIEDEMANN, G. Changes of pore structure of cement mortars due to temperature, *Cement and Concrete Research*. V. 10. Pg. 157 – 164. 1980.

SERPELL, R.; LOPEZ, M. Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*. V. 64. Pg. 16 - 26. 2015

SERPELL, R.; LOPEZ, M. Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes. *Cement and Concrete Composites*. V. 39. Pg. 104 - 114. 2013.

SERPELL, R., ZUNINO, F. Recycling of Hydrated cement pastes by synthesis of  $\alpha$ H'-C2S. *Cement and Concrete Research*. V 100. Pg. 398 – 412. 2017.

SHAW S, CLARK SM, HENDERSON CM. Hydrothermal formation of the calcium silicate hydrates tobermorite and xonotlite: an in situ synchrotron study. *Chemical Geology*. 1V. 67. Pg. 129 – 40. 2000.

SHUI, Z.; XUAN, D.; CHEN, W.; YU, R.; ZHANG, R. Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction & Building Materials*. V. 23. Pg. 531 – 537. 2009.

SIDDIQUE, R.; KAUR, D. Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*. V. 3. Pg. 45-51. 2012.

TAKAHASHI, H., SUGIYAMA, T. Application of non-destructive integrated CT-XRD method to investigate alteration of cementitious materials subjected to high temperature and pure water. *Construction & Building Materials*. V. 203. Pg. 579 – 588. 2019.

VYSVARIL, M., BAYER, P., CHROMÁ, M., ROVNANÍKOVÁ, P. Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. *Construction & Building Materials*. V 54. Pg. 413 – 420. 2014.

WANG, J., MU, M., LIU, Y. Recycled Cement. *Construction & Building Materials*. V 190. Pag 1124 – 1132. 2018.

WANG, Y., AN, M., YU, Z., HAN, S. Impacts of various factors on the rehydration of cement-based materials with a low water-binder ratio using mathematical models. *Construction & Building Materials*. V. 125. Pg. 160 – 167. 2016.

YU, P., KIRKPATRICK, R. J. Thermal dehydration of tobermorite and jenite, *Concrete Science and Engineering*. V. 1. Pg. 185 – 191. 1999.

ZHU, C., FANG, Y., WEI, H. Carbonation-cementation of recycled hardened cement paste powder. *Construction & Building Materials*. V. 192. Pg 224 – 232. 2018.

**PALAVRAS-CHAVE:** reidratado, cimento, argamassa, concreto