CONCRETO & Construções

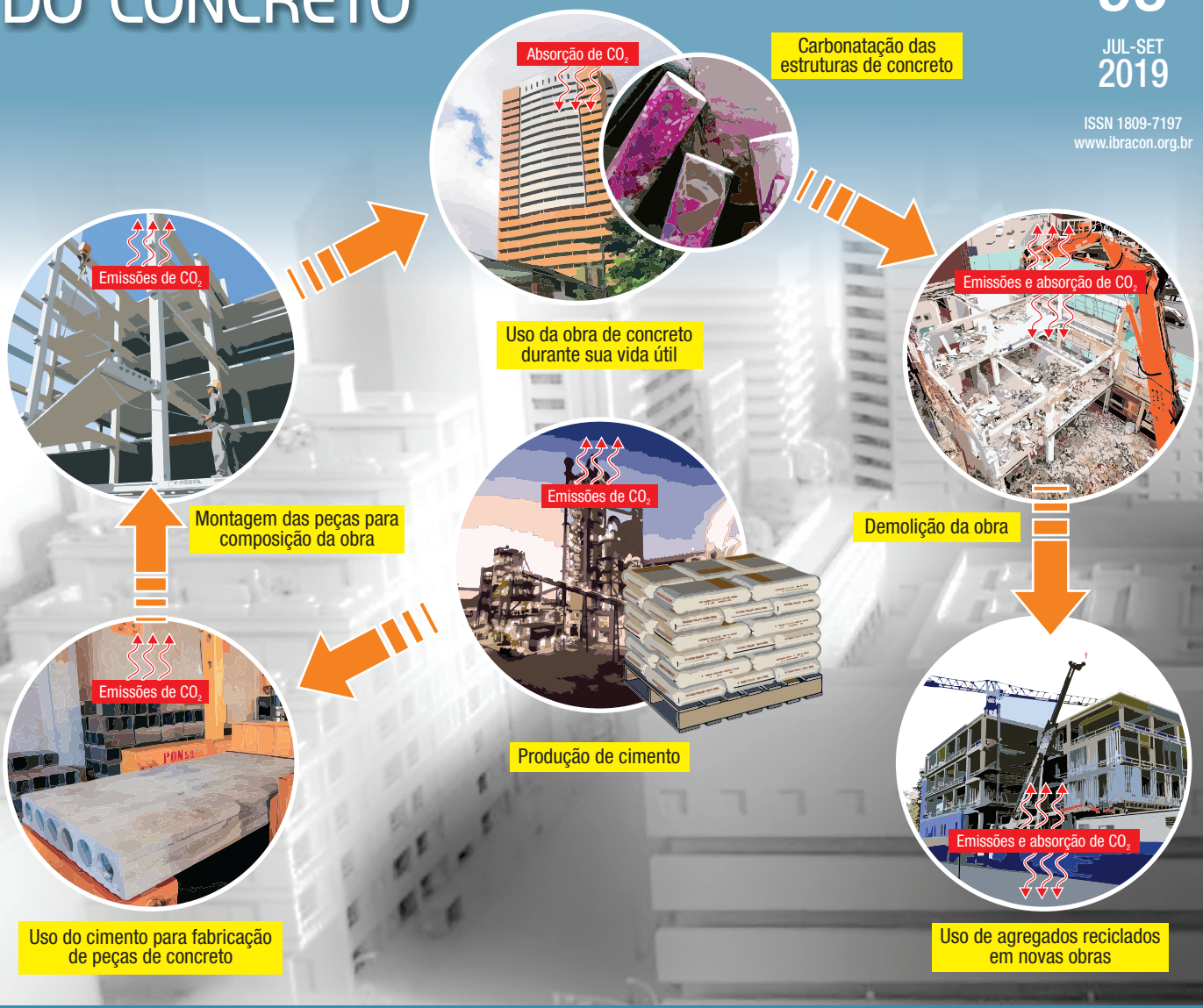
IBRACON
Instituto Brasileiro do Concreto

Ano XLVII
95
JUL-SET
2019

ISSN 1809-7197
www.ibracon.org.br

PEGADA CARBONO

ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DO CO_2 NA CADEIA PRODUTIVA DO CONCRETO



PERSONALIDADE ENTREVISTADA

VANDERLEY JOHN: PESQUISAS PARA ECOEFICIÊNCIA NO USO DE MATERIAIS

ENTIDADES DA CADEIA

MAPEAMENTO TECNOLÓGICO DO CIMENTO – BRASIL

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

A ROBUST SEISMIC STRENGTHENING TECHNIQUE FOR URM WALLS, USING EDCC

EMPRESAS E ENTIDADES LÍDERES DO SETOR DA CONSTRUCÃO CIVIL ASSOCIADAS AO IBRACON

ADIÇÕES

Elkem Materials South America

Tecnosil
Concreto de Alto Desempenho

ADITIVOS

MC

LignoTech Brasil

gcp applied technologies
GRACE CONSTRUCTION & PACKAGING

PENETRON

BASF
We create chemistry

RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL

CORR solutions BRASIL

ARMADURA

GERDAU

EQUIPAMENTOS

INSTRON

EMIC

ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

Escola Politécnica - USP

PUC CAMPINAS
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA

UNIP

ipt
INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS

INSTITUTO idd
CONSTRUINDO CONHECIMENTO

ESCRITÓRIOS DE PROJETOS

TQS

ENGETI

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL
ABECE

PhD
Engenharia

JUNTE-SE A ELAS

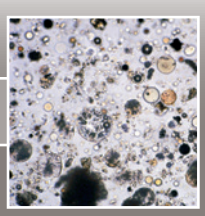
Associe-se ao IBRACON em defesa e valorização da Arquitetura e Engenharia do Brasil !

CRÉDITOS CAPA
Fluxos de carbono no ciclo de vida do concreto. Crédito: Arte de Gill Pereira a partir de fotos do Banco de Imagens do IBRACON

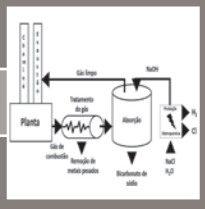
SEÇÕES

5 Editorial
6 Coluna Institucional
7 Converse com o IBRACON
8 Encontros e Notícias
16 Personalidade Entrevistada: Vanderley John
26 Entidades da Cadeia
95 Mercado Nacional
112 Mantenedor
121 Acontece nas Regionais

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO



33 Por que os cimentos com adições vieram para ficar?
40 Abatimento de CO_2 na produção de concretos com resíduo do polimento do porcelanato
46 Perspectivas de novos tipos de ligantes com menor intensidade de carbono
55 A captura e uso de CO_2 em materiais para a construção civil
60 Captura de CO_2 em materiais cimentícios
67 Cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados
73 Cimentos álcali-ativados: análise de carbonatação inicial em ambiente natural
77 A robust seismic strengthening technique for URM walls, using EDCC
87 Dimensionamento de sistema de reforço à flexão com materiais compósitos segundo a técnica EBR: Parte B



ESTRUTURAS EM DETALHES

98 Contribuição dos concretos de alto desempenho na redução do impacto ambiental e incremento da sustentabilidade

NORMALIZAÇÃO TÉCNICA

105 Aspectos conceituais de soluções ecoeficientes em concreto com vistas à normalização

INDUSTRIALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

116 Sustentabilidade nas estruturas pré-fabricadas de concreto

CONCRETO & Construções

REVISTA OFICIAL DO IBRACON
Revista de caráter científico, tecnológico e informativo para o setor produtivo da construção civil, para o ensino e para a pesquisa em concreto.

ISSN 1809-7197
Tiragem desta edição: 5.000 exemplares
Publicação trimestral distribuida gratuitamente aos associados

JORNALISTA RESPONSÁVEL
→ Fábio Luís Pedroso
MTB 41.728/SP
fabio@ibracon.org.br

PUBLICIDADE E PROMOÇÃO
→ Arlene Regnier de Lima Ferreira
arlene@ibracon.org.br

PROJETO GRÁFICO E DTP
→ Gill Pereira
gill@ellementto-arte.com

ASSINATURA E ATENDIMENTO
office@ibracon.org.br

GRÁFICA
Duograf
Preço: R$ 12,00

As ideias emitidas pelos entrevistados ou em artigos assinados são de responsabilidade de seus autores e não expressam, necessariamente, a opinião do Instituto.

© Copyright 2019 IBRACON

Todos os direitos de reprodução reservados. Esta revista e suas partes não podem ser reproduzidas nem copiadas, em nenhuma forma de impressão mecânica, eletrônica, ou qualquer outra, sem o consentimento por escrito dos autores e editores.

IBRACON
Av. Queiroz Filho, 1.700, sala 407/408, Torre D, Villa Lobos Office Park
05319-000 – Vila Hamburguesa, São Paulo – SP
Tel. (11) 3735-0202

PRESIDENTE DO COMITÊ EDITORIAL
→ Guilherme Parsekian

COMITÊ EDITORIAL – MEMBROS
→ Alio Kimura (informática no cálculo estrutural)
→ Arnaldo Forti Battagin (cimento & sustentabilidade)
→ Bernardo Tutikian (tecnologia)
→ Eduardo Barros Millen (pré-moldado)
→ Enio Pazini Figueiredo (durabilidade)
→ Ercio Thomas (sistemas construtivos)
→ Evandro Duarte (protendido)
→ Frederico Falconi (projeto de fundações)
→ Guilherme Parsekian (alvenaria estrutural)
→ Hugo Rodrigues (cimento e comunicação)
→ Inês L. da Silva Battagin (normalização)
→ Íria Lícia Oliva Doniak (pré-fabricados)
→ José Tadeu Balbo (pavimentação)
→ Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (ensino)
→ Mário Rocha (sistemas construtivos)
→ Paulo Eduardo Campos (arquitetura)
→ Paulo Helene (concreto e reabilitação)
→ Selmo Kuperman (barragens)

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO
Fundado em 1972
Declarado de Utilidade Pública Estadual | Lei 2538 de 11/11/1980
Declarado de Utilidade Pública Federal Decreto 86871 de 25/01/1982

DIRETOR PRESIDENTE
Julio Timerman

DIRETOR 1º VICE-PRESIDENTE
Luiz Prado Vieira Júnior

DIRETOR 2º VICE-PRESIDENTE
Bernardo Tutikian

DIRETOR 1º SECRETÁRIO
Antonio D. de Figueiredo

DIRETOR 2º SECRETÁRIO
Carlos José Massucato

DIRETOR 1º TESOUREIRO
Claudio Sbrighi Neto

DIRETOR 2º TESOUREIRO
Nelson Covas

DIRETOR DE MARKETING
Hugo Rodrigues

DIRETOR DE EVENTOS
César Daher

DIRETOR TÉCNICO
Paulo Helene

DIRETOR DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS
Túlio Nogueira Bittencourt

DIRETORA DE PUBLICAÇÕES E DIVULGAÇÃO TÉCNICA
Íria Lícia Oliva Doniak

DIRETOR DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
Leandro Mouta Trautwein

DIRETOR DE CURSOS
Enio José Pazini Figueiredo

DIRETOR DE CERTIFICAÇÃO DE MÃO DE OBRA
Gilberto Antônio Giuzio

DIRETORA DE ATIVIDADES ESTUDANTIS
Jéssika Pacheco

Concreta e ambientalmente amigável!

Caro leitor,

Conhecida como Comissão Brundtland, por ter sido presidida pela então primeira-ministra da Noruega, Gro Bruntdland, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, estabelecida em 1987 pela Organização das Nações Unidas (ONU), teve o objetivo de estudar a relação entre o desenvolvimento econômico e a conservação do meio ambiente. Em outras palavras, se concentrar no valor econômico, ambiental e social (o conhecido *Triple Bottom Line*) que as empresas poderiam acrescentar na sustentabilidade de seus produtos e negócios.

Desde então a palavra sustentabilidade passou a frequentar o vocabulário cotidiano da sociedade mundial.

E seu emprego crescente e a cada dia mais excessivo, levou-a a experimentar certo desgaste e descrédito pela sensação de não estar mais traduzindo - e muito menos descrevendo de modo eficaz – o que se desejava destacar, de inequívoca importância.

Sustentabilidade havia se transformado em uma referência. Em outras palavras: uma marca!

A construção civil passou então a estudar e buscar projetos e obras com a marca da sustentabilidade, e os materiais de construção, definidos e empregados, passaram a integrar esse estudo e procura.

Entretanto, eram necessários termos e considerações complementares que melhor caracterizassem o que se estava buscando, além de detalharem o elenco de aspectos encerrados pela palavra.

Expressões como “do berço ao túmulo” do material, análise do ciclo de vida (ACV), pegada de carbono, economia de baixo carbono, economia circular, entre outros, foram adicionadas para melhorar o esclarecimento.

No tocante aos gases de efeito de estufa (GEE) - um dos muitos aspectos considerados e dentre eles um dos de maior relevância na cadeia produtiva do concreto – o desejado era conhecer, com isonomia comparativa, a emissão cumulativa dos GEEs dos produtos ao longo de suas vidas úteis – desde fabricação, passando pelo emprego e ciclo de vida, até destruição e/ou reciclagem – para tomar providências possíveis de mitigação dessas emissões, em especial CO_2 , combatendo, assim, as mudanças climáticas em razão do incremento da temperatura do planeta.

O Acordo de Paris de 2015, na 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), ratificado pelo Brasil em 2016, estabeleceu diretrizes e compromissos para tentar limitar o aumento das temperaturas neste século a menos de 2°C.

Com o cimento Portland, tão presente no nosso cotidiano, não foi diferente.

Produzido por uma indústria complexa e intensiva em capital, energia e consumo de matérias-primas, cujas emissões de CO_2 são inerentes ao processo de fabricação, a indústria do cimento sempre manteve constante e redobrada atenção com o meio ambiente.

E o protagonismo do setor brasileiro e seus esforços de décadas posicionaram a indústria nacional como aquela que apresentava os menores níveis mundiais de emissão de CO_2 por tonelada de cimento produzida.

Porém, ela não parou por aí. Em colaboração com a Agência Internacional de Energia (IEA), a Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD), a Corporação Financeira Internacional (IFC) do Banco Mundial, e reunindo um seleto grupo de acadêmicos de renomadas universidades e centros de pesquisa do país, sob a coordenação técnica do professor e ex-ministro José Goldemberg, a indústria brasileira do cimento desenvolveu o Mapeamento Tecnológico da Indústria, Roadmap Brasil, um roteiro tecnológico que analisa uma série de medidas capazes de reduzir sua intensidade carbônica em 33% até 2050, com base nos valores atuais.

Tais medidas concentram-se em intensificar o uso de adições, de combustíveis alternativos, de medidas de eficiência energética e de inovação na captura e estocagem de carbono.

Três artigos desta edição 95 detalham aspectos importantes do Roadmap Brasil, dentre eles os cimentos com adições, presentes no mercado brasileiro há 50 anos.

Entretanto, como destaca o professor titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e reconhecido pesquisador sobre Construção Sustentável, engenheiro Vanderley John – personalidade entrevistada desta edição – apesar da grande relevância do trabalho desenvolvido pela industria brasileira do cimento, do qual inclusive tomou parte, não se pode restringir o olhar da redução da pegada de carbono somente da porta da fábrica do cimento para dentro.

A análise do ciclo de vida deve se estender pela cadeia inteira. Em outras palavras, para os materiais cimentícios em geral, para a cadeia do concreto como um todo, desde a dosificação por características reológicas do material cimentício, do formato da peça pelo nível de resistência mecânica-estrutural, do projeto à obra acabada e posta em serviço, incluindo retrofits, demolição e reciclabilidade, aspectos esses todos já em franco emprego.

E com o olhar nessa cadeia, a industrialização da construção em concreto – que encontra na prefabricação seu ponto mais destacado e desenvolvido – ganha relevância por trazer tecnologia e inovação em sua essência.

Finalmente, deve-se destacar que o concreto é um dos materiais disponíveis mais ecologicamente corretos, pois oferece – com ampla flexibilidade de projeto – alta durabilidade.

Assim, é o concreto de cimento Portland: concreta e ambientalmente amigável!

ENG. MSC. HUGO DA COSTA RODRIGUES FILHO
DIRETOR DE MARKETING DO IBRACON
DIRETOR DE COMUNICAÇÃO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP)

Atrativos e destaques do 61º Congresso Brasileiro do Concreto

Está chegando a hora de nos reencontrarmos. Em sua 61ª edição, o Congresso Brasileiro do Concreto retorna à terra da lendária e poética Iracema, Fortaleza, no Ceará, com suas magníficas praias e belezas naturais, e um ambiente desafiador às estruturas de concreto por sua agressividade ambiental.

Contaremos, mais uma vez, com a expertise do Prof. Pedro Castro Borges, renomado pesquisador do Centro de Investigações e Estudos Avançados do Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV, México). Conjuntamente com o nosso ícone da tecnologia do concreto, Prof. Paulo Melaragno Monteiro da Universidade de Berkeley (Estados Unidos), nos agraciarão com seu conhecimento em Conferências Plenárias e receberão o justo mérito de sócios honorários de nosso Instituto. Teremos ainda a palestra do Prof. José Antonio Campos e Matos, da Universidade do Minho (Portugal). Ele, conjuntamente com o Prof. Túlio Bittencourt, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), ministrarão o minicurso sobre controle de qualidade de pontes segundo a *Cost Action – TU 1406*.

Além desse curso, nesta edição do CBC, serão ministrados cursos nas áreas de alvenaria estrutural, avaliação térmica, dimensionamento e reabilitação de pavimentos rígidos, análise de estabilidade de estruturas pré-moldadas, ensaios não destrutivos, segurança contra incêndio, reforços de vigas à flexão, concreto protendido e desempenho das estruturas de concreto armado.

Esse ano os participantes terão a oportunidade escolher entre os vários seminários que serão oferecidos: infraestrutura metroviária, ferroviária e rodoviária; edifícios altos; inovações tecnológicas em concreto; ensino de engenharia civil; excelência na construção civil; e temas controversos. Não obstante, a diretoria regional do Ceará inovou e organizou oito painéis técnicos para abordar temas muito atuais, que têm sido discutidos na região: infraestrutura, energias renováveis, o profissional do futuro, pré-moldados, produtividade em sistemas de protensão, case de arranha-céu, concreto com f_{ck} de 150 MPa e novas tecnologias.

Para os nossos patrocinadores, preparamos uma arena especial de palestras, denominada de arena do conhecimento, localizada no meio da Feibracon – Feira Brasileira das Construções em Concreto, aberta ao público externo.

No âmbito dos concursos técnicos, nossos queridos estudantes estarão presentes para mostrar o resultado de seu preparo e dedicação ao longo deste ano.

Para finalizar teremos a visita técnica à magnífica usina eólica de Fortin.

Você, assim como nós, desta fantástica família de apaixonados pelo concreto, congregada no IBRACON, é nosso(a) convidado(a) especial para vir desfrutar de bons momentos de aprendizado, trocas de experiências e *networking*, além, é claro, de todas as atrações turísticas que lhe esperam, quando sobrar um tempinho na agenda! As comissões organizadoras nacional e regional contam, mais uma vez, com a vossa indispensável presença.

PROF. CÉSAR HENRIQUE DAHER
DIRETOR DE EVENTOS DO IBRACON

ENVIE SUA PERGUNTA OU NOTA PARA O E-MAIL: fabio@ibracon.org.br

Homenagem póstuma ao pesquisador Kumar Mehta

O professor Povindar Kumar Mehta, grande referência nas pesquisas em Tecnologia do Concreto, faleceu no último dia 7 de agosto.

O Kumar Mehta foi professor emérito em engenharia civil da Universidade da Califórnia, em Berkeley, onde ensinou e pesquisou por 30 anos sobre tecnologia do concreto. Em 1993, recebeu a mais alta honraria da Universidade por suas contribuições no campo do concreto – a *Berkeley Citation*. Já, em 2006, foi contemplado com o prêmio "*Lifetime Achievement Award from the Coal Combustion Products Partnership*" em reconhecimento a suas pesquisas por décadas sobre o uso de cinzas volantes no concreto estrutural.

Ele era sócio-honorário do ACI (*American Concrete Institute*) e membro em seu Conselho Diretivo sobre Desenvolvimento Sustentável, em razão de suas contribuições para o entendimento dos fatores físico-químicos de desempenho do concreto em ambiente marinho e por suas pesquisas sobre os materiais cimentícios suplementares.

Autor de aproximadamente 250 artigos científicos e quatro livros, Mehta prestigiou como palestrante duas edições do Congresso Brasileiro do Concreto (em 2007, em Bento Gonçalves e, em 2009, em Curitiba). Ele teve seu livro "Concreto: microestrutura, propriedades e materiais", escrito conjuntamente com seu colega de pesquisa, Prof. Paulo Monteiro, traduzido, editado e reeditado pelo IBRACON, que é até hoje líder de vendas.

Prof. Kumar Mehta palestrando no 51º Congresso Brasileiro do Concreto

Por suas contribuições recebeu, em 2007, o título de sócio-honorário do IBRACON, maior honraria concedida pelo Instituto.

Uma grande perda para a engenharia de concreto e para o mundo!

Engenharia brasileira perde mais um de seus expoentes

O Eng. Mario Franco, grande expoente da engenharia estrutural no Brasil, faleceu no último dia 4 de setembro.

Nascido em Livorno, na Itália, em 1929, Mario Franco formou-se em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em 1951, onde foi professor do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações até sua aposentadoria. Foi também professor da Faculdade de Arquitetura da USP e professor visitante do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (Portugal).

Diretor do Escritório Técnico Julio Kassoy e Mario Franco (JKMF), que fundou em 1952 e através do qual participou de mais de 2 mil projetos estruturais, entre os quais destacam-se: Centro Empresarial Nações Unidas (CENU), Palácio das Convenções do Anhembi, Hotel Unique e Othon Palace, em São Paulo; Teatro Castro Alves, em Salvador; e Torres Ventura, no Rio de Janeiro.

Por suas obras e em reconhecimento aos serviços prestados à engenharia estrutural brasileira, recebeu o Prêmio Emílio Baumgart (1985) do IBRACON, de quem era sócio-honorário desde 1988. Ganhou também o título de Eminente Engenheiro do Ano em 2001, concedido pelo Instituto de Engenharia de São Paulo. Foi vencedor do Prêmio Talento Engenharia Estrutural em 2003, 2005 e 2008, promovido pela Abece e Gerdau.

Mario Franco nos deixou, mas suas palavras, projetos e obras permanecerão.

Workshop sobre reações expansivas no concreto dissemina conhecimento e medidas preventivas

A reação álcali-agregado (RAA) e a formação de etringita tardia (DEF) são reações físico-químicas associadas ao concreto que podem provocar a deterioração das estruturas de concreto sob determinadas condições de exposição.

Para disseminar o conhecimento acumulado sobre essas reações expansivas no concreto e as medidas consolidadas para sua prevenção, o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABPC) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) promoveram no dia 4 de julho, no IPT, o Workshop "RAA Reações Expansivas no Concreto".

A mesa de abertura do evento contou com as participações do presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman e do presidente da ABCP/SNIC, Paulo Camillo Penna, além de representantes dos patrocinadores Cavan (Oswaldo Lambert), Elkem (Claudio Kerr do Amaral), Embu (Luiz Eulálio Terra), Polimix (Pedro Lopes Neto) e Tecnosil (Roberto Pompiani).

A atenção para o problema das manifestações patológicas advindas das reações expansivas em obras de concreto foi recorrente nas palestras e comentários. "Antigamente a RAA era uma manifestação patológica ligada às barragens de concreto, mas atualmente já foi observada em obras residenciais, rodoviárias, industriais e subterrâneas", destacou o palestrante Cláudio Sbrighi Neto, diretor do IBRACON. Sua ocorrência no concreto necessita de três condições: a reatividade do agregado, a solubilidade de álcalis nos poros do concreto e a presença de umidade. Essas condições, juntamente com o proporcionamento adequado entre álcalis e sílica, na presença de água, forma um gel expansivo, que pode provocar tensões internas na peça de concreto, levando à sua fissuração.

Prof. Cláudio Sbrighi Neto palestra sobre o Guia de prevenção da reação álcali-agregado no evento, assistido pelo coordenador Eduardo Quitete

O Prof. Cláudio Sbrighi, que colaborou com a implantação dos ensaios de RAA no IPT na década de 1960, apresentou aos cerca de 100 profissionais presentes no evento a estrutura e o conteúdo do Guia de prevenção da reação álcali-agregado, prática recomendada lançada no ano passado pelo IBRACON no 60º Congresso Brasileiro do Concreto. "A norma brasileira ABNT NBR 15577 Agregados – Reatividade álcali-agregado é bastante densa e complexa, com sete partes. O Guia de prevenção da RAA veio para simplificar a compreensão do fenômeno e das medidas para sua mitigação em obras de concreto", pontuou Sbrighi.

Em sua palestra, Sbrighi apresentou os cinco passos para a prevenção da RAA contidos no Guia: classificar a estrutura, determinar o grau de reatividade do agregado, cruzar esta informação com as dimensões da estrutura e seu grau de exposição, estabelecer a intensidade da medida preventiva e escolher as opções de mitigação em função dessa intensidade.

Coube à pesquisadora do IPT, Eng. Priscila Leal, explicar aos presentes a DEF. Em seu processo químico, a etringita primária, composto da hidratação do cimento, pode se dissolver em materiais solúveis a partir da temperatura de hidratação de 65 °C, que, por sua vez, formam etringita tardia com o arrefecimento do concreto. Em seu processo microestrutural, a etringita tardia preenche as cavidades ao

Auditório assiste a palestra de patrocinador do evento

redor dos agregados, exercendo pressões de expansão no interior da estrutura.

Segundo Leal, no programa experimental realizado pelo IPT sobre a DEF, constatou-se que a microestrutura do concreto é fator preponderante em relação ao tempo de exposição à temperatura de hidratação acima de 65°C e que, depois da zona de transição, a porosidade do concreto (relacionada ao fator água/cimento) é o fator de maior influência no comportamento físico-mecânico da DEF.

Em sua palestra no Workshop, o chefe dos laboratórios da ABCP, Geól. Arnaldo Battagin, mostrou as semelhanças e as diferenças entre a RAA e a DEF. Segundo ele, ambos os fenômenos comprometem a vida útil das estruturas de concreto e apresentam, em condições de campo, feições muito similares, a ponto de poderem serem confundidas à primeira vista. No entanto, enquanto a RAA foi descoberta em 1940, a DEF foi recentemente descoberta em 1980. Por isso, os mecanismos básicos da RAA são melhor conhecidos do que os da DEF. Um ponto destacado por ele foi que a DEF requer, como condição de ocorrência, a presença de sulfatos, que são adicionados aos cimentos por meio do gesso, para retardar a pega. "O gesso adicionado ao cimento é responsável, durante a hidratação, por criar uma película de etringita ao redor do aluminato de cálcio, retardando, por este meio, a pega do aglomerante", observou Battagin.

Em razão dessa condição necessária de se adicionar gesso ao cimento na sua produção, Battagin fez a proposta para a criação de um grupo de trabalho, formado por especialistas, para a elaboração de um guia de prevenção da DEF no concreto, que traria, tal como o Guia de prevenção da RAA, a explicação simplificada do fenômeno, a avaliação de seu risco, a determinação do nível para sua prevenção e as medidas para sua mitigação.

Mesa de debates formada pelos mediadores Engª Nicole Hasparyk e Eng. Paulo Fernando Araújo da Silva (ao centro) e pelos palestrantes Priscila Leal, Arnaldo Battagin, Cláudio Sbrighi Neto e João Guimarães

Em suas considerações finais, o Prof. Cláudio Sbrighi destacou que as reações expansivas no concreto não são mera curiosidade científica, mas são manifestações patológicas que causam prejuízos à vida útil das obras, devendo, por isso, serem conhecidas em suas especificidades, para a adoção das medidas preventivas adequadas.

O evento teve também palestras técnico-comerciais das empresas patrocinadoras e contou com o apoio de Furnas e do CB-18/ABNT.

COMENTÁRIOS E EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA ABNT NBR 6118:2014

A publicação traz comentários e exemplos de aplicação da nova norma brasileira para projetos de estruturas de concreto - ABNT NBR 6118:2014, objetivando esclarecer os conceitos e exigências normativas e, assim, facilitar seu uso pelos escritórios de projeto.

Fruto do trabalho do Comitê Técnico CT 301, comitê formado por especialistas do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE), para normalizar o Concreto Estrutural, a obra é voltada para engenheiros civis, arquitetos e tecnologistas.

DADOS TÉCNICOS

ISBN 9788598576244
Formato: 18,6 cm x 23,3 cm
Páginas: 484
Acabamento: Capa dura
Ano da publicação: 2015

AQUISIÇÃO:
www.ibracon.org.br
(Loja Virtual)

Patrocínio

ANCORA SISTEMAS DE FIXAÇÃO · PRO · ENGETI · EQUILIBRATA · GERDAU · SCHWING Stetter · VEDACIT · Votorantim · IBRACON

Palestra apresenta lições aprendidas com colapso por incêndio de um prédio de concreto armado

O colapso do edifício Wilton Paes de Almeida, em São Paulo, em maio de 2018, em decorrência do incêndio iniciado no quinto andar, foi estudado por uma equipe multidisciplinar de profissionais liderada pelo diretor técnico do Instituto Brasileiro do Concreto, Prof. Paulo Helene. Essa equipe conduziu um programa experimental de ensaios e análises das amostras de um tramo do pilar com a laje em balanço, retirado dos escombros, que possibilitou testar hipóteses sobre as possíveis causas para o colapso.

Os resultados desse trabalho, fruto de um termo de cooperação técnica entre o IBRACON e a Prefeitura de São Paulo, por meio da Secretaria de Infraestrutura Urbana e da Secretaria de Segurança Urbana, foram apresentados aos cerca de 100 profissionais presentes no auditório do Instituto de Engenharia em São Paulo e aos mais de 250 internautas que acompanharam a transmissão ao vivo da palestra "Incêndio e colapso do Edifício Wilton Paes de Almeida: lições aprendidas desse desastre urbano", proferida pelo Prof. Paulo Helene no dia 1º de agosto último. O evento contou com a presença do secretário municipal da Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras (SIURB), Prof. Vitor Aly, do presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, do diretor de relações institucionais do IE, Eng. José Roberto Bernasconi, e do vice-presidente de atividades técnicas do IE, Eng. Jerônimo Cabral, entre outras autoridades.

De partida, o Prof. Paulo Helene exortou que sua apresentação não apontaria culpados. "O objetivo é técnico e visa trazer entendimento sobre o comportamento estrutural do prédio na situação de incêndio, papel que cabe à engenharia e que pode ser aplicado em atividades futuras", afirmou.

O edifício Wilton Paes de Almeida fora construído na década de 1960 para abrigar a sede da empresa Companhia Comercial de Vidros do Brasil (CVB). Com 24 andares, 12 mil m² de área construída, o edifício foi projetado pelo arquiteto e professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU-USP), Roger Zmekhol, sendo considerado um marco da arquitetura modernista de São Paulo. Por ter suas estruturas de concreto armado, seu colapso após 80 minutos do início do incêndio causou espanto na comunidade técnica. Helene endossou esse sentimento ao trazer aos presentes alguns casos históricos de prédios de concreto incendiados: o edifício Andraus (São Paulo, 1972) não colapsou após 4 horas de incêndio, nem o Joelma (São Paulo, 1974), após 6 horas e meia. A razão apontada por ele para esses e outros casos citados não colapsarem após incêndio e terem sido recuperados, encontrando-se atualmente em uso, foi o baixo coeficiente de condutividade térmica do concreto, que faz com que as altas temperaturas nas faces das peças de concreto não sejam rapidamente transferidas para seu interior. "Com isso, concreto e aço na maior parte da seção das peças dificilmente atingem a temperatura crítica de 500° C, ponto a partir do qual esses materiais perdem resistência de forma irremediável e significativa", explicou.

Rafael Timerman, do Departamento de Estruturas do IE, coordena mesa com o diretor de relações institucionais do IE, Eng. José Roberto Bernasconi, o presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, o secretário municipal da Siurb, Prof. Vitor Aly, o diretor técnico do IBRACON, Prof. Paulo Helene, e o vice-presidente de atividades técnicas do IE, Eng. Jerônimo Cabral

Esses fatos foram demonstrados pelos resultados dos ensaios do programa experimental conduzido pelo IBRACON, com apoio da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Cooperativa dos Funcionários do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (CPIPT), Arcelor Mittal, PhD Engenharia e Universidade Presbiteriana Mackenzie. A análise petrográfica apontou que o quartzo do concreto do tramo retirado dos escombros foi preservado, não apresentando deformações nem delaminações, que ocorreriam apenas se as temperaturas tivessem passado dos 573° C. A resistência à compressão do concreto medida foi de 21,8 MPa e o módulo de elasticidade foi de 24 GPa, típicos da resistência característica e do módulo de projeto naquela época (1961-65). A espessura calcinada nas peças não passou de um centímetro. Já a frente de carbonatação nas estruturas de concreto alcançou 3 cm.

Descartadas as hipóteses sobre as causas do colapso relacionadas aos materiais, Paulo Helene voltou-se para as prováveis causas decorrentes do projeto estrutural. As informações sobre o projeto foram levantadas a partir de

várias fontes de informação, uma vez que o projeto estrutural original e o memorial de cálculo não foram encontrados. Na avaliação do palestrante, o projeto era arrojado para a época, pois consistia de uma estrutura assimétrica com três vigas, lajes nervuradas, lajes-grelha em balanço e pilares em formato H, com variação de seção e shaft. A análise do projeto estrutural hipotético em situação de incêndio, conduzida na PhD Engenharia, apontou como mais provável a hipótese de que o carregamento térmico acarretou esforços nos pilares de mais de 10 vezes os devidos ao peso próprio, por conta de sua dilatação, o que provocou o rompimento das paredes da caixa de elevadores entre o 5º e o 10º andar, levando ao colapso do edifício.

No final de sua apresentação, Paulo Helene discorreu sobre as principais lições aprendidas do desastre. Diferentemente do que pensava anteriormente, ele hoje sabe que uma estrutura de concreto pode colapsar por incêndio. Em razão disso, o projeto estrutural não deve desprezar a ação do fogo. Para evitar outros desastres parecidos, as edificações devem passar por inspeção periódica para se certificar da adoção de medidas protetivas contra incêndio. Como recomendações futuras, ele postulou: a prescrição em norma da revisão (ATP) de projeto estrutural para temperaturas elevadas de até 250°C; e a obrigatoriedade do arquivamento de projetos estruturais executivos das obras, pela PMSP, preferencialmente em versão virtual, nas nuvens.

O secretário municipal interveio ao final da palestra para parabenizar o palestrante por sua atitude ética ao expor uma das hipóteses prováveis do colapso do edifício Wilton Paes de Almeida, "... uma vez que a Engenharia não é ciência exata, mas assentada em probabilidades".

A palestra contou com parceria da Engeti, TQS Informática, PhD Engenharia e IBRACON, e com apoio da Abece e CREA-SP.

Tramo do pilar com a laje em balanço, retirado dos escombros, de onde foram extraídos testemunhos para o programa experimental

DURABILIDADE DO CONCRETO

→ **Editores**	Jean-Pierre Ollivier e Angélique Vichot
→ **Editora francesa**	Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées – França
→ **Coordenadores da edição em português**	Oswaldo Cascudo e Helena Carasek (UFG)
→ **Editora brasileira**	IBRACON

Esforço conjunto de 30 autores franceses, coordenados pelos professores Jean-Pierre Ollivier e Angélique Vichot, o livro "Durabilidade do Concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente" condensa um vasto conteúdo que reúne, de forma atualizada, o conhecimento e a experiência de parte importante de membros da comunidade científica europeia que trabalha com o tema da durabilidade do concreto.

A edição brasileira da obra foi enriquecida com o trabalho de tradução para a língua portuguesa e sua adaptação à realidade técnica e profissional nacional.

→ **Informações**: www.ibracon.org.br

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-22-0
Edição: 1ª edição
Formato: 18,6 x 23,3cm
Páginas: 615
Acabamento: Capa dura
Ano da publicação: 2014

Patrocínio

ENGETI
FHECOR DO BRASIL Engenharia
l.a.falcão bauer
PhD Engenharia
weber SAINT-GOBAIN
IBRACON

Programa de Qualificação examina inspetores de estruturas

Candidatos preparam-se para realizar o exame prático, sob supervisão do diretor de certificação do IBRACON, Eng. Gilberto Giuzio

O IBRACON, conjuntamente com o GLOBAL, retomou o Programa de Qualificação de Pessoal, promovendo, em julho, os Exames Teórico e Prático para Inspetor I de Estruturas de Concreto.

Os 188 alunos que participaram das 8 turmas do curso Inspetor I – Inspeção de Estruturas de Concreto, oferecido pelo IBRACON em parceria com o IDD, foram contatados para realizarem os exames.

Houve 10 inscrições, com 9 candidatos participando do Exame Teórico, que ocorreu simultaneamente em São Paulo, Curitiba, Fortaleza, Recife e Brasília.

O Exame Prático foi realizado em São Paulo, no dia 13 de julho, com 8 participantes, dos quais 7 foram aprovados. Os candidatos tiveram que realizar uma inspeção da Ponte do Jaguaré e elaborar um Relatório de Inspeção Especial segundo as prescrições da ABNT NBR 16230:2013, contando com decisivo apoio da Secretaria de Infraestrutura Urbana (Siurb) da Prefeitura de São Paulo e da empreiteira contratada para recuperação da OAE, que disponibilizou equipamento e orientação de segurança, permitindo o acesso aos caixões da ponte com plataformas mecanizadas.

Para concluir o processo de qualificação está prevista uma reunião da Comissão de Certificação do IBRACON para o início de setembro, quando deverá ser decidida a emissão dos certificados dos candidatos aprovados nos Exames Teórico e Prático e que atendam aos critérios de formação, treinamento, experiência e aptidão física requeridos para a Qualificação de Inspetor I de Estruturas de Concreto.

Dando continuidade ao Programa de Qualificação de Inspetor I de Estrutura de Concreto, o IBRACON irá promover novo Exame Prático em dezembro, em São Paulo, estando já abertas as inscrições para a realização do Exame Teórico para os candidatos que pretendem participar desse segundo Exame Prático.

Para mais informações, acesse o campo *PC09 – CONCRETE PRODUCTION CHAIN* (IBRACON) no site: www.globalpersoncert.com.

Prática Recomendada IBRACON

Concreto Autoadensável

COORDENADOR Bernardo Fonseca Tutikian
SECRETÁRIO Roberto Christ

Traz para a comunidade técnica os conceitos relacionados ao concreto autoadensável, as recomendações para seleção de materiais, os métodos de dosagem, os procedimentos de mistura, as recomendações para a aceitação do concreto no estado fresco e para seu transporte, lançamento e rastreamento

A obra é resultado do trabalho do Comitê Técnico IBRACON sobre Concreto Autoadensável (CT 202), voltando-se aos profissionais que lidam com a tecnologia do concreto autoadensável nos canteiros de obras, nas indústrias de pré-fabricados, nos laboratórios de controle tecnológico e nas universidades.

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-25-1
Edição: 1ª edição
Formato: Eletrônico
Páginas: 78
Acabamento: Digital
Ano da publicação: 2015

Patrocínio

concrebras · ENGEMIX · GRACE Talent | Technology | Trust · UNISINOS · PERFORMANCE · Votorantim Cimentos · IBRACON

Seminários IBRACON na *Concrete Show* 2019

O Instituto Brasileiro do Concreto realizou durante à *12th Concrete Show South America*, evento que reuniu 350 marcas nacionais e internacionais de mais de 50 segmentos da cadeia construtiva do concreto, ocorrido de 14 a 16 de agosto, na São Paulo Expo Center, dois seminários no *Concrete Congress* e uma reunião de diretoria.

No dia 14 foi promovido o Seminário sobre Inspeção de Pontes, com o objetivo de destacar a importância de implementação de uma gestão de rotina de inspeção e manutenção de pontes e viadutos. Palestraram no Seminário, para um público de cerca de 100 profissionais, os diretores do IBRACON, Eng. Julio Timerman, Prof. Paulo Helene e Prof. Enio Pazini Figueiredo, abordando, respectivamente, os requisitos para inspeção de pontes segundo a ABNT NBR 9452, as manifestações patológicas mais comuns nesses equipamentos e os principais ensaios para formulação do diagnóstico e prognóstico para a recuperação de pontes.

Já, no dia 16 foi gratuitamente ofertado aos estudantes presentes no evento o Seminário sobre Boas Práticas da Engenharia para Estudantes, com a participação do presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, diretor da Tecnum, Eng. Jorge Batlouni, coordenadora do CB-18/ABNT, Engª Inês Battagin, e consultor de engenharia, Prof. Ércio Thomaz.

Reunião de diretoria do IBRACON durante a *Concrete Show* 2019

PRÁTICA RECOMENDADA IBRACON/ABECE

Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras

Elaborada pelo *CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras*, a Prática Recomendada *"Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras"* indica métodos de ensaios para o controle da qualidade do CRF utilizado em estruturas de concreto reforçado com fibras e estruturas de concreto reforçado com fibras em conjunto com armaduras.

A Prática Recomendada aplica-se tanto a estruturas de placas apoiadas em meio elástico quanto a estruturas sem interação com o meio elástico.

AQUISIÇÃO

www.ibracon.org.br (Loja Virtual)

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-30-5
Edição: 1ª edição
Formato: eletrônico
Páginas: 31
Acabamento: digital
Ano da publicação: 2017
Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

Patrocínio

ArcelorMittal | BEKAERT better together | gcp applied technologies | neo MATEX | OWENS CORNING | TOPFIBRAS | Viapol EUCLID GROUP

Seminários IBRACON na *Paving Expo & Conference*

Realizada de 27 a 29 de agosto, no Expo Center Norte, a *Paving Expo & Conference South America* debateu os principais temas relacionados à infraestrutura viária e rodoviária no Brasil, realizando uma série de eventos técnicos coordenados por instituições setoriais e governamentais, bem como empresas do segmento.

O Instituto Brasileiro do Concreto promoveu gratuitamente, no dia 27, o Seminário de Inspeção de Pontes, com o objetivo de mostrar os principais aspectos para uma gestão de rotina na inspeção e manutenção de pontes e viadutos. Palestraram no Seminário, para cerca de 100 profissionais, o presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, bem como seus diretores, Prof. Tulio Bittencourt e Prof. Enio Pazini Figueiredo, além do

Presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman, palestra no Seminário de Inspeção de Pontes

diretor da Engeti, Eng. Rafael Timerman.

O IBRACON, ABESC, IBTS e ABCP uniram-se num estande no evento e realizaram, no dia 29, o Seminário "Evolução do projeto, construção e manutenção do pavimento de concreto", que apresentou as informações técnicas e atuais de projeto, execução e manutenção de pavimentos de concreto. O evento foi aberto pelo presidente do IBRACON, Eng. Julio Timerman e contou com duas palestras internacionais. O engenheiro colombiano Diego Jaramillo Porto, diretor de Pavimentos e Infraestrutura da Federação Iberoamericana de Concreto Dosado em Central (FIHP), trouxe a experiência da Colômbia com o uso da tecnologia do Whitetopping para a recuperação de pavimentos. Já, o engenheiro argentino Diego Calo, diretor de Pavimentação do Instituto de Cimento Portland Argentino (ICPA), falou a respeito da experiência argentina em pavimentação urbana. Além deles, nove palestrantes brasileiros abordaram diferentes aspectos da pavimentação em concreto.

▶ Programação de Cursos Master PEC

Mês	Curso	Data	Créditos	Local	Realização
SET	Curso Preparatório: Inspetor I – Inspeção de Estruturas de Concreto segundo a ABNT NBR 16230:2013	26 a 28 de setembro	28	Salvador – BA	IBRACON
OUT	Conservação e Reabilitação de Estruturas de Concreto	1 e 2 de outubro	8	São Paulo – SP	ABCP – IBRACON
	Short Course on Bridge Quality Control – Cost Action – TU 1406	14 e 15 de outubro	16	61º CBC – Fortaleza – CE	IBRACON
	Instalação e Operação de Fábrica de Artefatos de Cimento	15 e 16 de outubro	8	São Paulo – SP	ABCP – IBRACON
	Análise da Estabilidade em Estruturas Pré-Moldadas de Concreto Segundo a NBR 9062:2017	16 de outubro	4	61º CBC – Fortaleza – CE	IBRACON
	Curso Básico de Projeto, Dimensionamento e Reabilitação de Pavimentos de Concreto	16 de outubro	4	61º CBC – Fortaleza – CE	IBRACON
	Segurança contra incêndio: com foco em projetos de "*retrofit*"	16 de outubro	4	61º CBC – Fortaleza – CE	IBRACON
	O Fenômeno Térmico do Concreto Massa	16 de outubro	4	61º CBC – Fortaleza – CE	IBRACON
	Desempenho aplicado das Estruturas de Concreto	17 de outubro	8	61º CBC – Fortaleza – CE	IBRACON
	Concreto Protendido	17 de outubro	8	61º CBC – Fortaleza – CE	IBRACON
	Reforços de Vigas de Concreto Armado: Flexão	18 de outubro	4	61º CBC – Fortaleza – CE	IBRACON
	Atualização de Norma para Projeto e Execução de Alvenaria Estrutural	18 de outubro	4	61º CBC – Fortaleza – CE	IBRACON
	Pisos Industriais: Conceitos e Recomendações para a Boa Execução	22 de outubro	8	São Paulo – SP	ABCP – IBRACON
NOV	Intensivo de Tecnologia Básica do Concreto	5 a 7 de novembro	8	São Paulo – SP	ABCP – IBRACON
	Execução de Estruturas de Concreto – Engenhosidades e Soluções	8 e 9 de novembro	15	Curitiba – PR	IDD – IBRACON
	Curso Preparatório: Inspetor I – Inspeção de Estruturas de Concreto segundo a ABNT NBR 16230:2013	21 a 23 de novembro	28	Goiânia – GO	IBRACON
	Curso Tecnologia Básica das Paredes de Concreto	25 de novembro	8	São Paulo – SP	ABCP – IBRACON
	Execução de Edificações em Paredes de Concreto	26 de novembro	8	São Paulo – SP	ABCP – IBRACON
	Projeto Estrutural em Paredes de Concreto	27 de novembro	8	São Paulo – SP	ABCP – IBRACON
DEZ	Curso Preparatório: Inspetor I – Inspeção de Estruturas de Concreto segundo a ABNT NBR 16230:2013	5 a 7 de dezembro	28	Assunção – Paraguai	IBRACON

Manual de Montagem das Estruturas Pré-Moldadas de Concreto

Lançado no último dia 15 de agosto, no Seminário Montagem das Estruturas Pré-Fabricadas de Concreto, promovido pela Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto (Abcic) na *Concrete Show South America*, em São Paulo, o Manual de Montagem das Estruturas Pré-Moldadas de Concreto vem atender a uma demanda antiga do setor por mais segurança, produtividade, controle e planejamento no uso dos sistemas industrializados.

A publicação oferece uma visão integrada de todo o processo de montagem das estruturas pré-fabricadas de concreto, nas suas interfaces com a comercialização, projeto e produção das estruturas, possibilitando a todos os envolvidos com o sistema construtivo, clientes, projetistas, supervisores, técnicos, trabalhadores da construção, a se orientarem pelas boas práticas.

O Manual contou com a coordenação técnica da presidente-executiva da ABCIC, Engª Íria Doniak, e com a autoria dos engenheiros especialistas no tema, Francisco Celso, Luiz Livi e Mairon Goulart.

→ **Informações:**
www.abcic.org.br

A revista **CONCRETO & Construções** presta-se à divulgação das obras do setor construtivo, sem qualquer endosso.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE

Projeto de Estruturas de Concreto Reforçado com Fibra

Elaborada pelo CT 303 – Comitê Técnico IBRACON/ABECE sobre Uso de Materiais Não Convencionais para Estruturas de Concreto, Fibras e Concreto Reforçado com Fibras, a *Prática Recomendada* é um trabalho pioneiro no Brasil, que traz as diretrizes para o desenvolvimento do projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras.

Baseada no *fib Mode Code 2010*, a *Prática Recomendada* estabelece os requisitos mínimos de desempenho mecânico do CRF para substituição parcial ou total das armaduras convencionais nos elementos estruturais e indica os ensaios para a avaliação do comportamento mecânico do CRF.

Aquisição

www.ibracon.org.br
(loja virtual)

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-26-8
Edição: 1ª edição
Formato: Eletrônico
Páginas: 39
Acabamento: Digital
Ano da publicação: 2016
Coordenador: Eng. Marco Antonio Carnio

Patrocínio

Belgo Bekaert Arames
ArcelorMittal | BEKAERT better together
Pode confiar
OWENS CORNING
Braskem

Vanderley Moacyr JOHN

Engenheiro civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), em 1982, com mestrado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1987) e doutorado pela Universidade de São Paulo (1997), Vanderley John é atualmente professor titular da Escola Politécnica da USP.

Suas pesquisas para desenvolver a eficiência no uso de ligantes no concreto e sua substituição por fíleres o credenciaram para coordenar, com a Profª Karen Scrivener (Escola Politécnica Federal de Lausanne), o relatório "*Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry*", encomendado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP).

O Prof. Vanderley John coordena diversas unidades e grupos de pesquisa, tais como: a EMPRAPII sobre Materiais para Construção Ecoeficiente, com missão de subsidiar a inovação na indústria; o INCT CEMtec Tecnologia Cimentícias Ecoeficientes Avançadas, grupo interdisciplinar voltado a pensar o cimento do futuro; o Centro de Inovação para Construção Sustentável (CICS USP), rede de pesquisadores e empresas para a inovação no setor construtivo, cuja sede está sendo construída para ser um *living lab*, cuja função será testar e difundir tecnologias inovadoras em condições de uso; e o IRIS USP, que organiza, estrutura e gerencia projetos interdisciplinares para produzir soluções para problemas da sociedade.

Ano passado ganhou o Prêmio Falcão Bauer de destaque do ano em engenharia de pesquisa em concreto e materiais constituintes, outorgado pelo IBRACON.

IBRACON – Quais foram suas motivações para cursar engenharia civil e seguir a carreira de pesquisador na área?

V. M. J. – Vim de uma cidade pequena e rural no Rio Grande do Sul, Cerro Largo, onde havia médicos, advogados, contadores, engenheiros e professores, profissões para quem ia para a universidade na época. Fiquei entre Direito, porque trabalhava no fórum, e Engenharia Civil, por me dar bem

com matemática. Escolhi Engenharia pensando em voltar para a região, montar um escritório e trabalhar em projetos. Fiz engenharia civil na UNISINOS entre 1978 e 1982. Nos últimos dois anos do curso, trabalhei em obras da Cohab RS (Companhia Habitacional do Rio Grande do Sul) e na construção de pontes para o DNOS (Departamento Nacional de Obras de Saneamento), obras grandes, com mais de trezentos operários. Essa experiência mostrou-me as condições precárias com que as obras eram feitas, em comparação ao que se aprendia na universidade. Por isso, decidi não trabalhar com obras. Meu professor aconselhou-me a fazer mestrado na área de Construção, que, segundo ele, seria a área do futuro. Entrei no mestrado da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) e, seguindo o conselho do Prof. Alberto Tamagna, um engenheiro mecânico argentino, que ensinava sobre placas e cascas com um sonoro portunhol, decidi ir para o NORIE (Núcleo Orientado para Inovação na Construção), que, já na época, reunia um grupo multidisciplinar, liderado pelo Prof. Silas Grazia. Meu orientador foi o Prof. José Miguel Aroztegui, arquiteto uruguaio, com forte formação técnica, que, embora dedicado à pesquisa de conforto térmico, tinha uma visão sofisticada de desempenho de edifícios. Ele me sugeriu atacar os problemas da durabilidade, pois muitos conjuntos habitacionais do BNH (Banco Nacional de Habitação) que usavam novas tecnologias apresentavam degradação precoce. Havia um crescente conhecimento de durabilidade do concreto, área onde o Paulo Helene, na época no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo), era a principal referência. Mas a proposta do Miguel era um modelo genérico de durabilidade que servisse para prever o comportamento de todos os sistemas construtivos de uma edificação, algo complexo. Os mecanismos de degradação são diferentes para cada material e o edifício é uma composição de materiais e ambientes. À época, somente o Vanderlei Flausino, pesquisador do IPT, trabalhava com esses modelos, mas veio a falecer e acabei ficando meio sozinho no tema, o que foi muito ruim. Para piorar, nos 20 anos seguintes, praticamente não houve construção. Hoje, com a crescente inovação na área habitacional e com a norma de desempenho, a durabilidade geral dos sistemas construtivos se tornou um problema na engenharia brasileira. Isto apesar dos avanços da ISO 15686, que pouca gente conhece.

IBRACON – O que o fez mudar da Universidade do Rio Grande do Sul para a Universidade de São Paulo e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo?

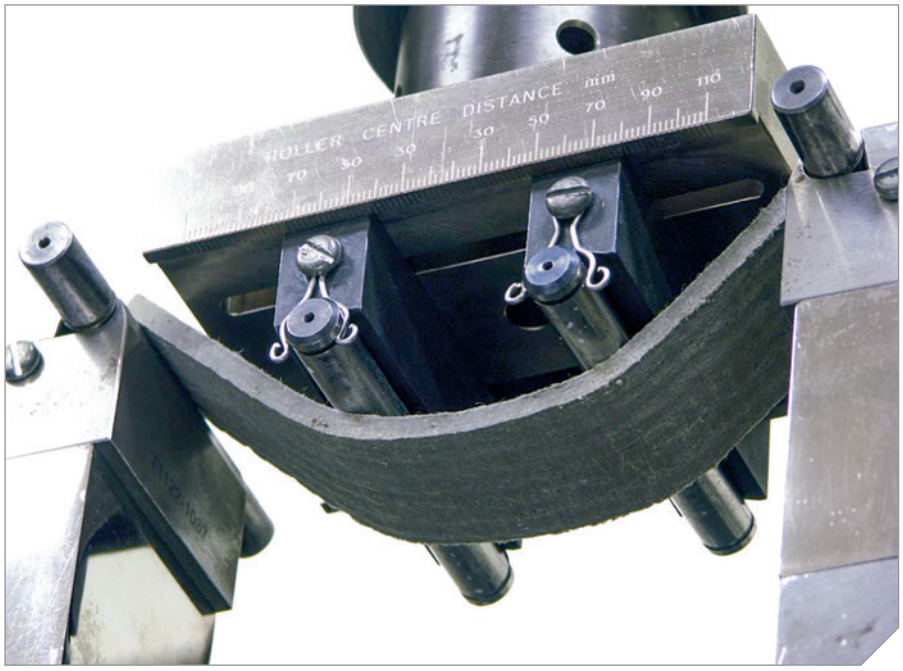
V. M. J. – No último ano de mestrado, comecei a lecionar na UNISINOS, o que foi uma experiência marcante. Depois do mestrado, em 1987, consegui uma bolsa do CNPq para um doutorado na Suécia, mas, com o falecimento de meu pai, tive que desistir. Passei em um concurso na arquitetura da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), mas, enquanto aguardava a nomeação, aceitei o convite do Roberto de Sousa, do IPT à época, para vir trabalhar no Instituto em uma pesquisa com uma visão radical inovadora de desenvolver um novo cimento de baixa alcalinidade para ser usado no reforço com fibras vegetais, coordenada pelo Prof. Vahan Agopyan, hoje reitor da USP, com a parte química do cimento liderada pela Profª Maria Alba Cincotto. Entrei no doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP) e, sob orientação da Maria Alba, fiz uma tese mais de química do que de engenharia na área sobre o que chamam hoje de geopolímeros. No final do doutorado, quando elaborava a introdução, percebi que os cimentos ativados por silicato de sódio não eram escaláveis, pois o custo era muito alto e a matéria-prima limitada. Como no IPT a tradição era fazer pesquisa a serviço da sociedade, desisti do tema e quase nada publiquei sobre o assunto.

IBRACON – Por que seu foco de pesquisa se transferiu da durabilidade/desempenho de materiais construtivos para o reaproveitamento/reciclagem de materiais na construção civil?

V. M. J. – Em 1995, passei no concurso na Poli para professor. O Prof. Vahan me convenceu a focar em pesquisa com empresas, sempre empregando uma visão científica de materiais, com química e microestrutura. Ele já estava

> HOJE, COM A CRESCENTE INOVAÇÃO NA ÁREA HABITACIONAL E COM A NORMA DE DESEMPENHO, A DURABILIDADE GERAL DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS SE TORNOU UM PROBLEMA NA ENGENHARIA BRASILEIRA

> FOMOS PARA BRASÍLIA COM PROPOSTAS E COM BOA ARTICULAÇÃO COM A PARTE MODERNA DA INDÚSTRIA E CONSEGUIMOS MELHORAR O PROJETO, GERANDO A RESOLUÇÃO CONAMA 307 SOBRE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO



MARIO TAKEASHI

Flexão de placas de fibrocimento sem amianto, que apresentam enorme tenacidade

estruturando uma pesquisa, financiada por empresas de painéis de fachada leves, de compósito GRC[1] com fibras de vidro E (convencional), com cimentos de baixa alcalinidade, à base da escória – um resíduo. A literatura internacional mostrava que a agenda ambiental da engenharia já crescia rapidamente. Eu e a Profa. Maria Alba Cincotto decidimos focar no tema resíduos industriais, agrícolas, urbanos e da construção como matérias-primas na Construção Civil. Por um tempo, mantivemos até uma base de dados na Internet, que era uma coisa nova. Nesta época, a discussão de perdas na construção estava no seu auge e resíduos eram parte dela. O Arq. Tarcísio Paula Pinto, um dos pioneiros na área, que fazia doutorado com o Vahan, me chamou e ao Eng. Arthur Quaresma, da Engesolos e, na época, diretor do Sinduscon, para discutir o tema, sem compromissos. Descobrimos que um grupo do CONAMA estava preparando uma regulamentação para os resíduos da construção. Tivemos sorte: fomos para Brasília com propostas e com boa articulação com a parte moderna da indústria e conseguimos melhorar o projeto, gerando a Resolução CONAMA 307 sobre resíduos da construção. Desta resolução, gosto particularmente do conceito de aterros de RCD (reciclados de construção e demolição) como reserva para mineração futura. Fizemos pesquisas fundamentais no tema RCD no doutorado do Prof. Sérgio Angulo, mostrando a dificuldade ambiental e econômica de reciclar agregados em concreto. Vieram as normas brasileiras e a coisa engrenou com o engajamento particularmente do Sinduscon-SP.

IBRACON – Por que seu foco recentemente mudou para materiais ecoeficientes?

V. M. J. – O Prof. Vahan chegou à conclusão que era hora de apoiar a indústria na substituição do amianto e chamou todos os fabricantes para discutir opções. A constatação era que a tecnologia sem amianto europeia não cabia no orçamento brasileiro. O Vahan e o Holmer Savastano Jr., professor da FZEA (Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP), começaram uma pesquisa financiada pela Infibra e Imbralit, duas empresas concorrentes, para chegar em uma solução de custo competitivo e durável. Resolvemos o problema do custo e da durabilidade. As empresas continuam trabalhando com a gente.

No final da década de 1990, a agenda de meio ambiente já avançava no mercado, gerando o movimento de "selos verdes" para a construção. O CIB (Conselho Internacional de Pesquisa e Inovação na Construção) lançou, em 1998, junto com a UNEP

[1] *Glass reinforced cement*.

(Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), a Agenda de Construção Sustentável. Eu e o Vahan chegamos à conclusão de que a agenda não era adequada aos países em desenvolvimento. O custo era um dos problemas. O Vahan, que era da Diretoria do CIB, convenceu seu presidente, Prof. Christer Sjöstrom, com quem fiz *pos-doc* no *Royal Institute of Technology* entre 2000 e 2001, a fazer uma Agenda de Construção Sustentável para Países em Desenvolvimento. Acabei participando do grupo que a elaborou e a lançamos em 2001 durante o primeiro seminário sobre Construção Sustentável feito no Brasil, que foi um inesperado sucesso. Até hoje muitos acham que dá para copiar a agenda ambiental e as soluções do Norte. Mas não funciona. Na Europa, o peso das questões sociais, de segurança e de informalidade é muito baixo. Lá, energia é dominante; aqui é um componente. Além disso, sustentabilidade vai além do ambiente: inclui gente e economia. E dinheiro é sempre importante. A renda per capita europeia ou norte-americana é cinco vezes a brasileira, considerando paridade de compra. Muitas das soluções deles são viáveis com o orçamento deles. Os problemas ambientais exigem soluções escaláveis: cinco ou cinco mil edifícios certificados têm pouco impacto considerando o tamanho do setor. Então, as nossas soluções precisam ser ecoeficientes – aliar baixo impacto ambiental a custo competitivo! A superação dos desafios ambientais passa por soluções ecoeficientes. O conceito de ecoeficiência também facilita a cooperação com empresas, que é essencial para que a pesquisa em engenharia cumpra sua função, uma vez que somente resultados que chegam ao mercado podem contribuir para reduzir impacto ambiental.

IBRACON – Essa parceria entre a academia e as empresas não atrapalha seus projetos de pesquisa? Você não sente nisso uma perda de autonomia?

V. M. J. – Os projetos com empresas são uma necessidade: papers e teses que não se transformam em políticas públicas, mudança cultural ou produto não têm sentido.
Mas os projetos de pesquisa usualmente não começam com empresas. Começam no laboratório, com liberdade quase infinita, com recursos públicos. Por exemplo, em 2008, uma aluna de graduação, a Fernanda Kemeid, me infernizou, pois queria saber qual era o mínimo consumo de cimento no concreto. Com um ano de iniciação científica, ela produziu um gráfico resumindo dados de uma centena de artigos científicos. Depois de muita análise e perguntas, virou um paper que mostrava o potencial de redução do consumo de ligante e o impacto ambiental do concreto. Ninguém tinha pensado nisso antes. Nenhuma empresa pediu. Depois, eu e o Prof. Rafael Pileggi, junto o Prof. Bruno Damineli (Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP), desenvolvemos a tecnologia básica, financiados por dinheiro público. Em paralelo, o conceito foi apresentado para as diretorias de cimenteiras, como Votorantim, Camargo Correa no Brasil e a Holcim da Suíça; com esta eu colaborava em construção sustentável. Mas, só, em 2013, houve conhecimento acumulado para começar a negociar.
Na área de inovação trabalha-se com o conceito *Technology Readiness Level*, algo como Grau de Maturidade Tecnológica. A pergunta da Fernanda era TRL0. O paper era TRL1. Com a tese premiada de doutorado do Bruno Daminelli, alcançamos o TRL 2 ou 3. Este é o limite da Universidade sozinha. Para que a pesquisa gere benefício ambiental e social, ela precisa chegar ao mercado, que é TRL 9. Isto só a empresa consegue. Exige outra ordem de grandeza de investimentos, fábricas, marketing, outros conhecimentos etc. Em 2014, a Intercement nos contratou para seguir com o projeto de modo estruturado e com solidez.
No laboratório temos novas ideias. Enquanto desenvolvemos, conversamos com a sociedade, com a indústria. Se os resultados do laboratório forem bons, temos uma chance. Se nosso laboratório e nossa ciência forem bons, se parceiro investir, temos uma chance. Não há opção.

> OS PROJETOS COM EMPRESAS SÃO UMA NECESSIDADE: *PAPERS* E TESES QUE NÃO SE TRANSFORMAM EM POLÍTICAS PÚBLICAS, MUDANÇA CULTURAL OU PRODUTO NÃO TÊM SENTIDO

> A ACV É A FERRAMENTA DE CONTABILIDADE AMBIENTAL. ELA CONTA FLUXOS DE ENERGIA E MASSA AO LONGO CICLO DE VIDA DO PRODUTO (INCLUINDO A FABRICAÇÃO) DE E PARA O AMBIENTE

IBRACON – O QUE SÃO MATERIAIS ECOEFICIENTES?

V. M. J. – Entrei em contato com o conceito de ecoeficiência assistindo a uma palestra de um professor do MIT (*Massachussets Institute of Technology*) em um evento do *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD).*

De uma forma bem prática, a ecoeficiência é entregar o bem com menor impacto ambiental e com custo igual ou preferivelmente menor. Está relacionado com a produtividade no uso de recursos. Por exemplo, produzir certa quantidade de cimento com menos emissão de CO_2 e igual custo. A captura de carbono para mitigar CO_2 gerado na produção do clínquer cabe no orçamento da Alemanha, mas não no do Brasil. Nós precisamos de soluções que caibam no orçamento e aí entra o filer dos concretos LEAP[2]. Não acho que vai reduzir o custo de produção, pois os fíleres são caros e são necessários aditivos para fazer o concreto LEAP. Mas vale a pena porque é possível cortar até 50% da pegada de CO_2 para certas aplicações, sem afetar significativamente o custo. Assim, uma solução de baixo impacto ambiental, mas com custo muito mais alto, não resolve o problema, porque não cabe no orçamento do país.

IBRACON – O QUE É A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)?

V. M. J. – Qualquer indústria sabe o custo econômico dos processos dos produtos que vende, pois o departamento financeiro faz contabilidade. Mas existe o custo ambiental, que é externo e não é usualmente medido. A atmosfera é coletiva, recebe nossa poluição, custo pago por todos.

A ACV é a ferramenta de contabilidade ambiental. Ela conta fluxos de energia e massa ao longo ciclo de vida do produto (incluindo a fabricação) de e para o ambiente. O que ela traz de mais importante em termos de conceito é: primeiro, qualquer processo ou produto tem múltiplos impactos ambientais, que não se resume às emissões de CO_2; segundo, para mensurar esses impactos é preciso olhar o ciclo de vida do produto, pois, muitas vezes, seu maior impacto está na sua decomposição; por isso, o ciclo de vida vai do berço ao túmulo da solução. Para mim, o mais legal é a ideia de a poluição ambiental poder ser medida quantitativamente. Sendo assim, a ACV é uma planilha de contador, que usa muitas moedas, como mudanças climáticas, perda da camada de ozônio, toxicidade em vários níveis, contaminação da água, do solo etc. Ela é um método que quantifica impactos ambientais. E o cérebro alfabetizado, diante de números, se rende mais fácil.

FOTO E MONTAGEM: MARIO TAKEASHI E LIZ ZANCHETA

Imagens de equipamentos e ensaios do LME (Laboratório de Microestrutura e Ecoeficiência da POLI-USP)

IBRACON – A ACV É NORMALIZADA PELA ISO?

V. M. J. – Sim. Mas a metodologia é muito complexa, exige uma imensidão

[2] TIPO DE CONCRETO EM DESENVOLVIMENTO NA POLI, COM FINANCIAMENTO DA INTERCEMENT, QUE SUBSTITUI PARTE DOS LIGANTES POR FÍLERES (*LOW EMISSION, ADVANCED PERFORMANCE ENGINEERING*). ARTIGO SOBRE O LEAP NA EDIÇÃO 89 DA CONCRETO & CONSTRUÇÕES

de dados. Um inventário ambiental da produção de fíler calcário tem em torno de 400 fluxos, que precisam ser medidos por um período de um ano. É caro e demorado. Por isso, o Tomas Graedel (Universidade de Yale), um dos criadores do conceito de ecologia industrial, afirmou que uma ACV completa é pouco prática, impossível de ser aplicada usando dados primários. Além disso, a ACV completa permite fazer "contabilidade" usando dados secundários, obtidos de bases especializadas, por exemplo. Isto gerou um mercado de bases de dados. Hoje se alguém pegar um dado como emissão de partículas para o ar, por exemplo, vai usar uma medida obtida em uma mina de bauxita na Austrália nos anos 90. O que esses dados têm a ver com emissão de particulados de uma mineração em Minas Gerais? Tomar decisões baseadas em dados que não são representativos gera erros. E mesmo sem medir, o custo da ACV tradicional é alto. Isso me incomodava bastante. Dentro do CBCS (Centro Brasileiro de Construção Sustentável), iniciamos uma ACV simplificada, ou seja, coerente com os conceitos da ISO, mas capaz de ser empregada no dia a dia das empresas pequenas e médias para tomar decisões com base em dados primários. Testamos com sucesso com 30 empresas de blocos de concreto, com o apoio da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e da Bloco Brasil. Os dados mostraram uma diferença de fator 3 para a pegada de carbono para o bloco de concreto entre fabricantes. Numa base de dados da ACV tradicional, os blocos de concreto seriam representados por um número apenas, igualando fabricantes muito diferentes. Hoje estamos trabalhando com o CBCS, o IPT, e com uma colaboração forte da ETH Zurique, para desenvolver uma ferramenta simples. Acredito que a indústria de construção brasileira vai comprar a ideia. E tenho certeza que seremos copiados por outros países.

IBRACON – Da ACV simplificada será possível obter as EPDs?

V. M. J. – Sim. A declaração ambiental de produto (DAP, em português) é a ferramenta do fabricante para comunicar o "preço ambiental" do produto. Estamos propondo algo simples, limitado a CO_2, energia, água, resíduos e outros recursos naturais. O bom fabricante vai declarar seu preço ambiental, certificado por terceira parte.

IBRACON – A EPD vai ser incorporada nas certificações?

V. M. J. – A ACV baseada em EPD vai substituir as certificações baseadas em *checklist* qualitativo. Essa vai ser a regra para todas as obras, parte da engenharia do dia a dia. Eu não gosto das certificações, pois vendem a impressão de que produtos certificados não têm impactos ambientais, o que não é uma verdade: tudo tem impacto ambiental. Elas identificam uma elite, que cumpre algumas regras. Seu efeito prático é desprezível. Com as EPDs, o modelo BIM vai somar os impactos ambientais dos insumos e usará modelos para estimar os impactos futuros, no canteiro e na fase do uso e pós-uso, etc... O impacto será um número probabilístico, pois esses valores têm incerteza não negligenciável. Se o projetista não souber quem é o fornecedor, terá que calcular explicitando a incerteza, pois o insumo poderá ser comprado do melhor ou do pior fornecedor. Só na hora da seleção dos fornecedores é que a incerteza será reduzida. Mas o impacto ambiental da ponte, da estrada, do edifício será comunicado quantitativamente, de forma probabilística. Em um mundo enfrentando crise ambiental, com talvez nove bilhões de habitantes, a "contabilidade ambiental" será natural. O consumidor saberá, inclusive, qual o seu papel no impacto total.

IBRACON – O que é a pegada carbono?

V. M. J. – Conceitualmente é a parcela da ACV que trata de mudanças climáticas. É a emissão acumulada de gases que colaboram para o efeito estufa ao longo do ciclo de vida. Usualmente é expressa em CO_2 equivalente. A ACV modular simplificada do CBCS propõe estimar apenas as emissões de CO_2, pois

> EM UM MUNDO ENFRENTANDO CRISE AMBIENTAL, COM TALVEZ NOVE BILHÕES DE HABITANTES, A "CONTABILIDADE AMBIENTAL" SERÁ NATURAL. O CONSUMIDOR SABERÁ, INCLUSIVE, QUAL O SEU PAPEL NO IMPACTO TOTAL

> NO LABORATÓRIO FIZEMOS CONCRETOS DE 50 MPA COM 120 KG /M³ DE CP V; 90 MPA, COM 200 KG/M³, 50-70% DOS LIGANTES SUBSTITUÍDOS POR FÍLERES INERTES. MAS, PARA ESCALAR NO MERCADO, LEVARÁ TEMPO

são 80% do efeito estufa e podem ser estimadas de forma confiável e fácil. É um indicador crítico para a cadeia de valor do cimento, que gera CO_2 da queima de combustíveis fósseis e da decomposição de calcário usado no clínquer.
Mas a pegada de CO_2 não é suficiente. Impacto ambiental é multidimensional. Precisaremos medir a pegada de água, de resíduos, de uso de recursos naturais e de energia. Um produto vai ser muito melhor em uma, pior na outra. O importante é minimizar, atendendo a agenda local e a global.

IBRACON – O Mapeamento Tecnológico do Cimento projeta, no curto e médio prazos, a adoção de tecnologias já disponíveis pela indústria e, no longo prazo, o desenvolvimento e adoção de tecnologias ainda em fase experimental para a mitigação de emissões de CO_2 pelo setor. Seria cientificamente possível agregar a essas projeções uma análise probabilística quanto às reais chances de adoção dessas medidas tecnológicas preconizadas dentro dos cenários modelados, considerando-se as barreiras técnicas, econômicas, políticas e sociais para sua adoção?

V. M. J. – Soluções mais baratas têm mais probabilidade de serem adotadas. Porque dinheiro sempre é um problema. Ainda mais em países em desenvolvimento, que são cada vez mais o grosso do mercado de cimento. Soluções de alto custo, como captura de carbono, são menos prováveis, serão a última opção. Poderá ser usada em países europeus, onde a queima de combustível derivado de lixo urbano gera mais caixa do que a produção de clínquer. Por evitar aterros sanitários, e a geração de metano associada, e por eliminar espécimes químicas perigosas, os fornos de clínquer são talvez a melhor forma de queimar lixo orgânico. Neste modelo, CCS pode ser viável. Fora disso, será a opção mais cara, a última a ser adotada.
Entre duas soluções de custo equivalente, a mais simples e de mais baixo risco tende a ser preferida. Captura e estoque de carbono no subsolo tem o risco do vazamento. Um vazamento numa das cavernas da Califórnia para estocar gás levou seis meses para ser controlada. Então, captura de carbono envolve custos e riscos elevados. Deve ser usada só em casos excepcionais.
Os novos cimentos que endurecem por reação com CO_2 têm um mercado pequeno porque devem ser feitos na fábrica, preferencialmente em componentes porosos de pequena espessura.
As tecnologias mais baratas e mais simples e de menor risco serão mais prováveis.

IBRACON – Adições ao cimento, por exemplo?

V. M. J. – O problema é que as escórias de alto-forno disponíveis são apenas 8% da produção do cimento. Cinza de carvão mineral está desparecendo. Cinzas vegetais são poucas e dispersas. Então, as novas adições são promissoras.
A Karen Scrivener propõe o LC3[3], uma mistura de argila calcinada e 30% de fíler, para um fator clínquer de 50%. Neste produto é preciso calcinar a argila, o que tem um custo energético e de emissões de CO_2. Para fazer concreto com ele, vai precisar de aditivos, pois a demanda de água tende a ser alta. Em argamassa, não.
Assim, acho que, no longo prazo, a tecnologia LEAP, que combina fíler, projeto de distribuição de partículas e dispersão (que, na verdade, faz engenharia do efeito físico das partículas), é a melhor solução, porque aproveita melhor os recursos, com menos energia e menor pegada de CO_2. No laboratório fizemos concretos LEAP de 50 MPa com 120 kg /m³ de CP V; 90 MPa, com 200 kg/m³, 50-70% dos ligantes substituídos por fíleres inertes. Mas, para escalar no mercado, levará tempo. É outra engenharia. Lei de Abrams não funciona. Temos que resolver uma série de problemas práticos, como a criação de uma cadeia de suprimentos, melhoria dos agregados, confiabilidade e custo dos aditivos, etc. Patentes vão limitar temporariamente

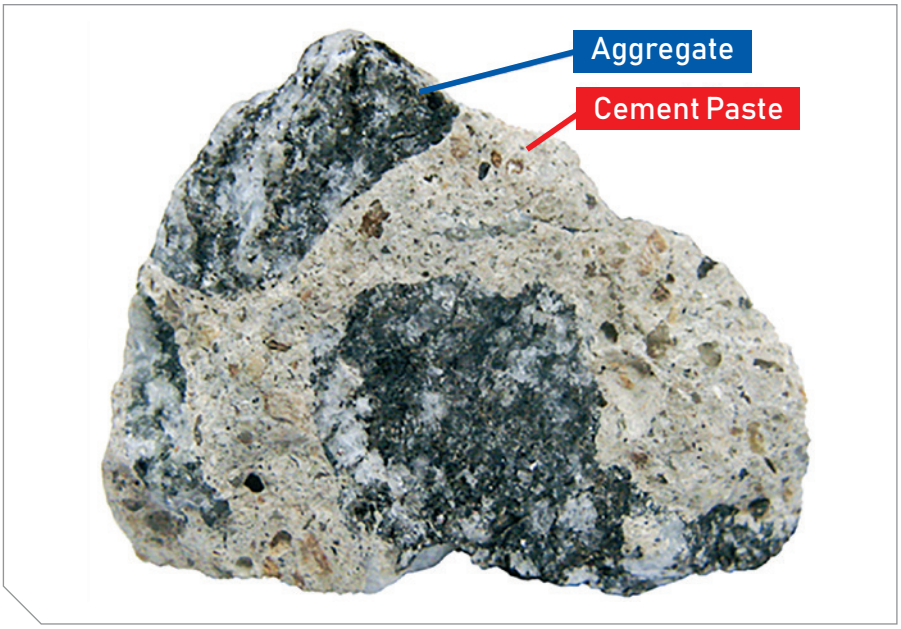
[3] *Limestone Calcined Clay Cement* (cimento feito com fíler calcário e argila calcinada)

a penetração em alguns mercados. Mas, a ciência aliada com a indústria irão resolver esses problemas, pois tem muito em jogo. A indústria 4.0 e a produção digital vão simplificar o complexo. Então é a tecnologia do futuro. Mas cimentos LC3 deverão chegar antes em muitos mercados.

IBRACON – Os estudos já apontam para este limite mínimo ou ainda não se tem uma ideia?

V. M. J. – Não sabemos. Mas ficarei surpreso se, em alguns anos, não fizermos em laboratório concreto de 50 MPa com 80 kg de cimento. Mas a prioridade é levar ao mercado, e, para isto, precisa criar uma cadeia de suprimentos. Para chegar nos 120-150 kg/m³ para 50 MPa, precisa mexer com areia, com brita, setores de pouco conhecimento. O Prof. Sérgio Angulo está desenvolvendo uma nova tecnologia para melhor caracterizar agregado, já no espírito da indústria 4.0: eletrônica e automação, gerando informações relevantes, como forma do grão, resistência e módulos de elasticidade etc. Não dá para esperar resultados diferentes usando os mesmos materiais. Na Suécia e nos Estados Unidos, é mais fácil porque eles têm uma indústria mais sofisticada.

IBRACON – É factível que o setor cimenteiro brasileiro saia de uma substituição média atual do clínquer por materiais cimentícios suplementares de cerca de 32% para próximo de 41% em 2030 e 48% em 2050, com o aumento dos teores de fíler calcário dos atuais 5% para 18% em 2030 e 25% em 2050, como preconiza o Mapeamento Tecnológico do Brasil?



CARINA ULSEN

Agregado reciclado no detalhe

V. M. J. – Nossos dados mostram que é viável fazer concretos estruturais com 60-70% de fíler e 30-40% de clínquer e gipsita, usando tecnologia diferente da atual, que faz moagem conjunta de fíler e clínquer, que não controla granulometria, que não garante dispersão. A indústria cimenteira brasileira atua internacionalmente, tem lideranças qualificadas e corajosas. Aumentar o teor máximo de fíler na norma brasileira de cimento de 10% para 25% em meio a uma crise foi uma atitude corajosa. Em 10 ou 15 anos devemos ter, no mercado, cimentos do tipo LEAP, com 50% de fíler, já contendo superplastificante e distribuição de partículas otimizada. E vão ser usados em concretos estruturais, capturando mais carbono do que os concretos convencionais. Não vai ser para todas as aplicações. Vai continuar havendo mercado para os cimentos mais puros, tipo CP V, com 10-20% de fíler.

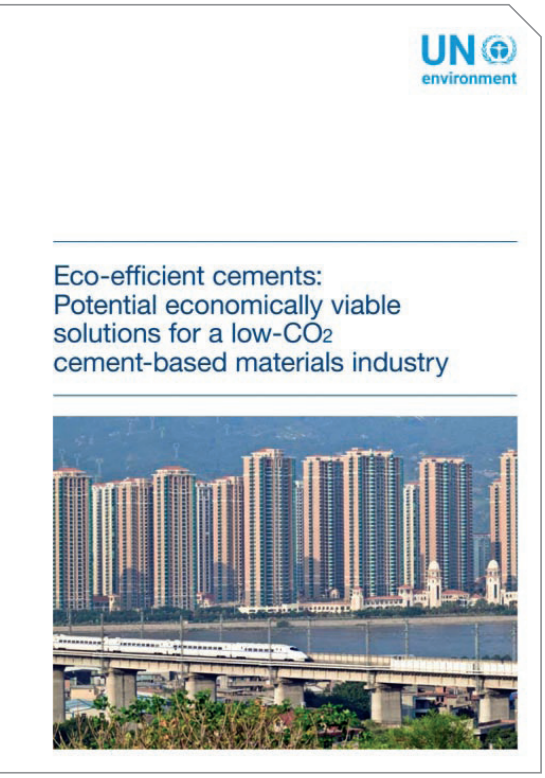
IBRACON – A principal recomendação do IPCC para o desenvolvimento sustentável, presente na pauta de negociações desde a década de 2000 e firmada no Acordo de Paris, em 2015, é cortar pela metade as emissões globais de CO_2 até 2050, em relação aos níveis de 1990, para evitar o aumento superior a dois graus centígrados da temperatura média da Terra em relação à era pré-industrial. Isto requereria, segundo

> A PRIORIDADE É LEVAR [OS CIMENTOS ECOEFICIENTES] AO MERCADO, E, PARA ISTO, PRECISA CRIAR UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS. PARA CHEGAR NOS 120-150 KG/M³ [LIGANTES/CONCRETO] PARA 50 MPA, PRECISA MEXER COM AREIA, COM BRITA, SETORES DE POUCO CONHECIMENTO

> NO ESTUDO COORDENADO POR MIM E PELA KAREN SCRIVENER PARA O *UN ENVIRONMENT* MOSTRAMOS QUE É POSSÍVEL ATINGIR A META DE MITIGAR 1 GT DE CO_2 NO CIMENTO EM 2050, SEM CCS, APENAS COM FÍLER E ARGILA CALCINADA, COM GRAUS DE SUBSTITUIÇÃO MODESTOS DE 30% DE FÍLER

o Mapeamento Tecnológico do Cimento (publicação de 2018 da CSI), uma redução de 24% das emissões do setor cimenteiro em 2050 em relação a ano de 2014. Porém, o recém-lançado Mapeamento Tecnológico do Cimento da Indústria Cimenteira Nacional projeta incremento de 10% das emissões de CO_2 até 2050 em relação aos níveis atuais. De que modo os três documentos se relacionam? Suas metodologias são compatíveis? Eles estão orientados para a mesma meta de abatimento das emissões de CO_2?

V. M. J. – A ciência do IPCC é sólida. Num certo sentido, esses trabalhos de futurologia olham para futuros desejáveis possíveis. Se as pessoas entenderem e agirem de acordo, existem boas chances de as previsões poderem se realizar. Como a metodologia dos Roadmaps está ajustada à ciência do IPCC, os modelos são fundamentalmente corretos. Mas, como tudo, eles têm limites. Eles privilegiam tecnologias já comprovadas, com uma exceção: captura de carbono, que a IEA (Agência Internacional de Energia) parece acreditar como inevitável. Para mim, é gastar dinheiro sem gerar valor para a sociedade. É varrer o lixo para debaixo do tapete. Está no *Roadmap* brasileiro por insistência da IEA. Mas não precisamos dela. No estudo coordenado por mim e pela Karen Scrivener para o *UN Environment* mostramos que é possível atingir a meta de mitigar 1 Gt de CO_2 no cimento em 2050, sem CCS, apenas com fíler e argila calcinada, com graus de substituição modestos de 30% de fíler. Outro limite desses *Roadmaps* é que olham para a porta da cimenteira. Não estimam o potencial de mitigação na cadeia de usuários de cimento, da formulação do concreto, do projeto de estruturas, da indústria 4.0 com seus robôs, da captura de CO_2 por carbonatação. Aí as oportunidades são imensas. O cimento vendido em saco, por exemplo, é um problema ambiental, pois o usuário sem conhecimento e equipamentos usa mais cimento do que as concreteiras e os fabricantes de argamassa e premoldados. A China já proibiu a venda do cimento ensacado em grandes metrópoles, para mitigar CO_2 e controlar mineração predatória de areia. Só com essa medida de diminuir o cimento ensacado, possivelmente podemos abater uns 15% de CO_2. Melhorias de agregados podem reduzir o teor de pasta dos concretos de cerca de 310 dm^3/m^3 para valores em torno de 250 dm^3/m^3. 70 litros de pasta são mais de 80kg de finos – hoje cimento e 40L de água. Os dinamarqueses estão com a relação de 230/240 kg por metro cúbico. Os Roadmaps estão corretos no que mostram – exceto pelo CCS. Mas subestimam as possibilidades de mitigação do cimento porque esquecem os clientes da cimenteira e a fase de uso, e não conseguem adivinhar as novas tecnologias que irão surgir. O estudo brasileiro, de forma pioneira, começou a corrigir inserindo a fase de uso do cimento. Mas não conseguimos convencer a IEA a colocar no modelo. Estamos trabalhando num artigo para ser publicado em revista internacional sobre esta questão. Acredito que a indústria vai superar e atingir as metas de mitigação previstas nos *Roadmaps*, talvez atingindo 2Gt de CO_2 de abatimento em 2050, com pouco ou nenhum CCS!



Capa do relatório encomendado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) sobre cimentos ecoeficientes

IBRACON – Existem estudos bem fundamentados e consistentes sobre o fenômeno de recarbonatação? O que esses estudos apontam em termos do balanço entre emissões e sequestro de carbono na cadeia do concreto?

V. M. J. – Que os materiais cimentícios absorvem CO_2 durante a fase de uso é inquestionável. A dificuldade está em estimar a quantidade de forma confiável. Faltam dados primários – tudo o que temos são dados de profundidade de carbonatação de concreto. A influência do regime de chuvas e temperatura na velocidade de carbonatação não está clara. Nunca nos preocupamos em quantificar o CO_2 capturado nos diferentes cimentos e produtos. Não sabemos nem quanto do cimento produzido no mundo vai para argamassa e blocos de concreto, onde a cinética de carbonatação é outra. Então, os números existentes têm muita incerteza e, ao meu ver, o *paper* da *Natural Geoscience* é exageradamente otimista. Mas já existe uma proposta de norma europeia para tratar do tema, apesar das incertezas – o que acho uma temeridade. Então, precisamos de muita pesquisa para gerar dados primários para reduzir a incerteza. Estou pensando em propor uma rede brasileira para tratar do tema.
E acho que a meta não é apenas estimar quanto capturamos pela carbonatação, mas também desenvolver soluções que permitam projetar construções duráveis que absorvam o máximo de CO_2 possível. Isto implica em repensar geometria, projetar a reserva alcalina, etc. Entre nós, esta solução tem um problema conceitual. Para o concreto armado, carbonatação é vista como um inimigo. A engenharia esqueceu que o concreto armado, quando protegido da chuva e umidade, mesmo carbonatado, corrói com velocidade desprezível. Para as partes expostas à umidade, estamos discutindo com a Arcelor Mittal aços mais resistentes à corrosão. Esta é uma área onde certamente haverá avanços importantes.

IBRACON – E quanto ao uso de agregados reciclados – qual é o limite prático para seu uso?

V. M. J. – Os materiais cimentícios consomem mais de um terço dos recursos naturais que extraímos. A sociedade não irá permitir que fiquem de fora da economia circular – até porque a proteção ambiental faz com que ninguém queira jazida de agregado na vizinhança. O problema é que os materiais cimentícios têm baixo valor agregado e a reciclagem não é economicamente atrativa como nos metais. A reciclagem de resíduos da construção é também mais complexa e caro do que a produção de agregados naturais. Para piorar, agregados reciclados da construção, britados convencionalmente, têm os grãos contaminados com pasta de cimento e requerem 5 a 6% mais de cimento para uma mesma resistência, reduzem o módulo de elasticidade etc. Funcionam bem em alguns nichos, mas, no convencional, o teor de substituição precisa ser baixo. Mais cimento é um problema ambiental e econômico.
Mas o cenário ambiental está mudando e, assim como na Europa, políticas públicas irão induzir o setor a responsabilidade pelos seus resíduos. Pesquisadores japoneses e holandeses desenvolveram tecnologias para remover a pasta de cimento, gerando agregados melhores. O problema é o elevado custo e a grande quantidade de energia usada na maioria nesses sistemas. Para aumentar a circularidade da indústria, que será uma exigência ambiental emergente, precisamos de novas tecnologias ou novos mercados.
A Profª Carina Ulsen (Poli USP) mostrou em seu doutorado que dá para fazer areia britada de ótima qualidade a partir de resíduos de concreto. A pasta vira pó e a areia fica limpa. A areia tem mercado. Mas uns 30% são finos, que precisarão de um outro mercado, que ainda não conhecemos. Reciclar produzindo areia não fecha uma economia circular, mas já ajuda.
Para diminuir a extração de recurso naturais para os agregados, podemos buscar agregados nos resíduos de outras indústrias. Na nossa unidade EMBRAPII, estamos trabalhando com resíduos de mineração, financiados pela Vale. Não é nossa areia comum, tem outra distribuição volumétrica, que não funciona nas estratégias usuais de dosagem. Mas, se queremos aproveitar a oportunidade, ajudar resolver um problema, precisaremos nos adaptar às matérias-primas secundárias. É o mundo que muda sempre. E a engenharia ganha.

IBRACON – O que você gosta de fazer em seu tempo livre? Quais seus *hobbies*?

V. M. J. – Tenho pouco tempo livre. A pesquisa me distrai muito, sempre tem algo novo, que não se entende. Sempre gostei de ler. Hoje leio principalmente literatura científica. Mas procuro ler coisas de outras áreas e também ficção. Gosto de ficção no cinema, nas séries no *streaming*. Na verdade, acho que gosto de histórias bem contadas. Nos últimos anos, me livrei do meu sedentarismo. Hoje gosto muito de andar de bicicleta, que virou meu meio de transporte e momento de relaxamento de todos os dias.
Nas férias, eu e a Cibele, fazemos caminhadas – acho que penso melhor olhando para a natureza.

Bases para o lançamento do Mapeamento Tecnológico do Cimento – Brasil 2050

GONZALO VISEDO
Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC)

MARCELO PECCHIO
ARNALDO FORTI BATTAGIN
Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)

I. INTRODUÇÃO

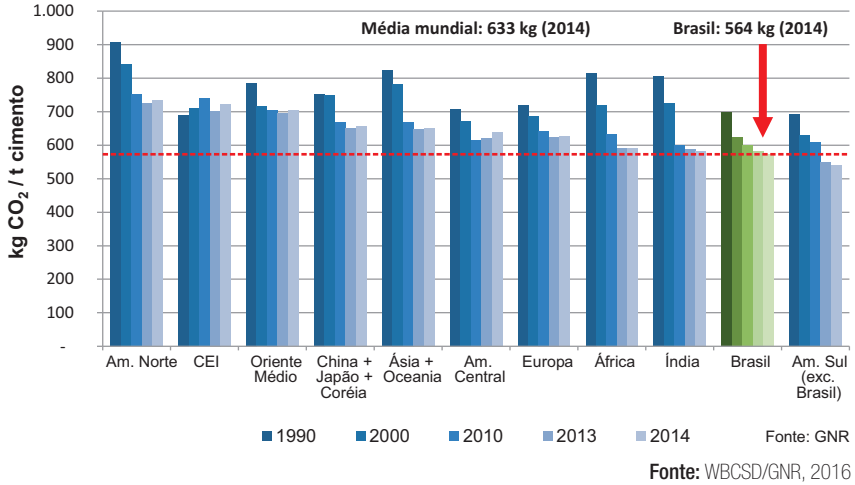
O cimento é insumo fundamental da cadeia produtiva da indústria da construção, componente básico de concretos e argamassas e o material feito pelo homem mais utilizado no planeta.

Ele é também elemento imprescindível ao desenvolvimento da infraestrutura no país, hoje deficitária. O cimento é base para a construção de casas, escolas, hospitais, estradas, ferrovias, portos, aeroportos, obras de saneamento e energia, entre muitas outras que proporcionam saúde e bem-estar à população e atendem às exigências da vida moderna.

O Brasil, como país em desenvolvimento, tem um importante programa de infraestrutura a ser implementado, e o aumento da população, aliado aos seus crescentes padrões de urbanização, deverá impulsionar a demanda por cimento nas próximas décadas.

O processo produtivo do cimento, por sua vez, é intensivo na emissão de gases de efeito estufa. A indústria cimenteira responde, globalmente, por cerca de 7% de todo o gás carbônico emitido pelo homem.

Particularmente, o Brasil é um dos países que emite menor quantidade de CO_2 por tonelada de cimento produzida (Figura 1). Esta posição de destaque, ao mesmo tempo em que é um reconhecimento ao esforço do setor no combate às mudanças climáticas, representa um enorme desafio: produzir o cimento necessário ao desenvolvimento do país, buscando ao mesmo tempo soluções para reduzir ainda mais as suas emissões de CO_2.



Fonte: WBCSD/GNR, 2016

▶ **Figura 1**
Emissão de CO_2 (kg por tonelada de cimento) em diferentes países e regiões

2. UM *ROADMAP* PARA MITIGAR AS EMISSÕES

A Agência Internacional de Energia (IEA) e a Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento (CSI) do Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) uniram esforços para publicar, em 2009, uma estratégia global intitulada *Cement Technology Roadmap* – Transição de Baixo Carbono na Indústria do Cimento. Este roteiro global descreveu uma série de alavancas, além do apoio político e financeiro necessário, para reduzir as emissões de CO_2 no processo de fabricação de cimento até 2050. Este foi o primeiro mapeamento da IEA do tipo focado em

um setor industrial específico no mundo, tendo sido atualizado em 2018.

Diante do desafio de conhecer a projeção de emissões setoriais a médio e longo prazos e seu respectivo potencial de redução de suas emissões de CO_2, para rumar para uma economia de baixo carbono, a indústria do cimento do Brasil, por meio de suas duas entidades, o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e a Associação Brasileira de Cimento Portland, reeditou a cooperação com IEA e CSI para produzir o seu próprio *Cement Technology Roadmap* – Brasil. Para tal, contou também com o suporte técnico e cofinanciamento da Corporação Financeira Internacional (IFC) – membro do Banco Mundial. Foi além e, sob a coordenação técnica do professor e ex-ministro José Goldemberg, envolveu renomados especialistas de importantes universidades e centros tecnológicos do país para desenvolverem uma série de *papers* técnicos, indicando diferentes alternativas de redução de emissões aplicáveis à indústria nacional, suas barreiras e seus potenciais de penetração no futuro.

Tais alternativas se concentraram em 4 principais pilares:

- Matérias-Primas Alternativas: através do uso de adições e substitutos de clínquer, produto intermediário do cimento;
- Combustíveis Alternativos: por meio da utilização de biomassas e resíduos com poder energético em substituição a combustíveis fósseis não renováveis, de maior emissão;
- Medidas de Eficiência Energética: mediante investimentos em linhas e equipamentos de menor consumo térmico e/ou elétrico;
- Tecnologias Inovadoras e Emergentes: através da pesquisa e desenvolvimento em tecnologias disruptivas, como a captura de carbono.

3. OS PILARES IDENTIFICADOS PARA MITIGAÇÃO DE CO_2

O relatório mais recente do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) estabeleceu as taxas futuras de aquecimento com base em quatro cenários de emissões de carbono. Os cenários variam desde o mais pessimista (aumento de 6°C), no qual as emissões continuariam na mesma tendência atual, até o mais otimista (1,5 a 2°C), no qual haveria um esforço global sério de transição para uma economia sem combustíveis fósseis. O IPCC recomenda cortar pela metade as emissões globais de CO_2 até 2050, em relação aos níveis de 1990, para evitar o aumento superior a dois graus centígrados da temperatura média da Terra em relação à era pré-industrial.

Um aumento de 2 graus Celsius da temperatura média do planeta é o limite para um "ponto sem retorno", a partir do qual as catástrofes climáticas poderiam se tornar incontroláveis, de acordo com muito climatologistas (GALLO et alii, 2017; GRASSI et alii, 2017; WARREN,R, et alli, 2017). Assim, no Roadmap, foram adotados os cenários de 2°C e 6°C.

Tendo em vista chegar a um cenário de 2°C, cada um dos quatro pilares identificados como passíveis de contribuir para mitigação de CO_2 foi detalhado por uma equipe de especialistas, proporcionando, além do conhecimento internacional, uma visão geral das características, limitações e potencialidades nacionais, sendo considerados:

- Cenário atual das alternativas: investigação das principais alternativas de redução, sua disponibilidade, disposição geográfica etc.;
- Cenário futuro das alternativas: projeção de crescimento potencial e disposição geográfica destas principais alternativas, estimativa das emissões evitadas, etc.;
- Inovação: perspectivas de novas alternativas de redução e inovações tecnológicas em relação às já existentes;
- Barreiras: principais barreiras (geográficas, técnicas, econômicas, legais, sociais, políticas, etc.) que possam limitar o crescimento das alternativas abordadas;
- Recomendações: desenvolvimento de recomendações para todas as partes interessadas (indústria, governo, academia, sociedade), para ajudar a superar as barreiras e fomentar essas alternativas.

3.1 Substitutos do clínquer (adições ao cimento)

Por meio das modelagens efetuadas pela Agência Internacional de Energia a partir dos dados compilados pela ABCP e SNIC, foram obtidos os seguintes resultados:

- Para o período 2030 e 2050, num "Cenário de 2°C", o volume de adições deverá aumentar, reduzindo o fator clínquer dos níveis atuais (ao redor de 67%) para 59% em 2030 e para 52% em 2050;
- O uso de escória de alto-forno como adição é praticado no Brasil há quase 70 anos. Em 2014, mais de 95% da escória granulada de alto-forno gerada pela indústria siderúrgica foi consumida pela indústria de cimento. A barreira para aumento do uso da escória de alto-forno pela indústria de cimento é o menor crescimento da oferta em relação ao aumento da produção de cimento. É

possível estimar que a geração de escória de alto-forno, em 2050, seja de 14,8 Mt. O teor médio de escória de alto-forno no cimento passaria de 14% em 2014 para 11% em 2050, abaixo, portanto, do teor médio atualmente praticado;

- O mesmo se aplica com o uso de cinzas volantes, pela perspectiva de menores investimentos em usinas termelétricas a carvão e pela tendência de gradual descarbonização da matriz elétrica. A capacidade máxima de produção anual de cinzas é da ordem de 4,4 Mt. Esse número é muito influenciado pelo fator de utilização das termelétricas. Em 2050, estima-se que a produção anual de cinzas atinja valores próximos de 3,3 Mt, representando uma taxa de substituição de 2,0% a 2,5% no cimento;
- Dentre todas as adições, o fíler calcário apresenta o maior potencial na mitigação de CO_2 e seu uso exige que a base normativa seja adaptada a este cenário. Projeta-se um consumo de 16,4Mt em 2030 e 33,5Mt em 2050 de fíler calcário na produção de cimento, o que representaria uma taxa de substituição de 18% e 25%, respectivamente;
- O Brasil já detém razoável experiência no uso de argilas calcinadas, originada da queima de matérias-primas argilosas e que possuem distribuição quase irrestrita em todo o território. Projeta-se um consumo de 3,4Mt em 2030 e 5,4Mt em 2050, 3,5% e 4%, respectivamente;
- Em menor escala e com potencial de crescimento difícil de prever, deve-se considerar as escórias ácidas e de aciaria. O incremento de seu uso em cimento vai depender de ações da indústria siderúrgica e da pressão da legislação ambiental;
- Caso todo o potencial de todas as adições seja atingido, cerca de 290Mt de CO_2 serão evitadas no período de 2014 a 2050;
- Finalmente, elevar ainda mais o uso de adições, que implica reduzir a quantidade de clínquer no cimento, representa a principal alternativa do Setor Cimenteiro de mitigar suas emissões. Com o aumento do teor de adições de 32% em 2014 para 48% em 2050, seria possível evitar a emissão cumulativa de 290 Mt de CO_2. Isto representa 69% do potencial de redução do Setor até 2050.

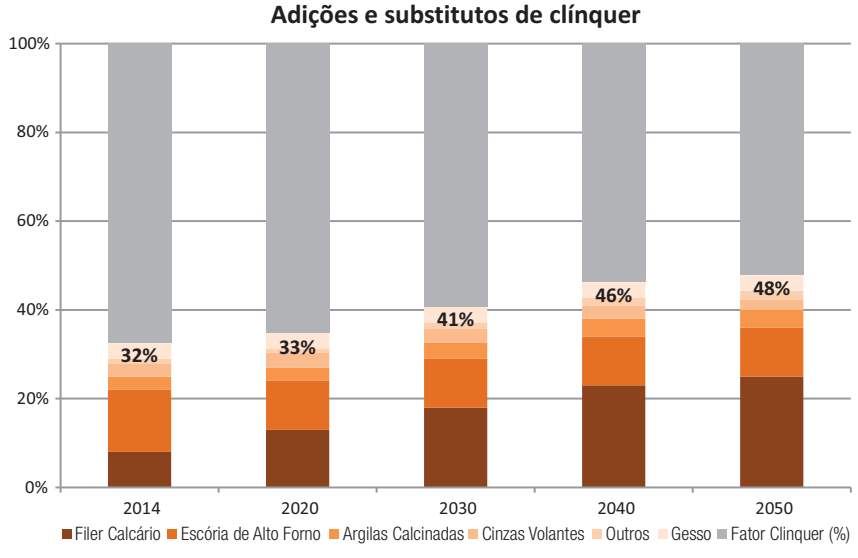


Figura 2
Previsão da evolução do uso de adições no cimento

3.2 Combustíveis alternativos

Cerca de 85% dos energéticos utilizados pelo setor no Brasil são quase que exclusivamente coque de petróleo. Os outros 15% são classificados como combustíveis alternativos (resíduos e biomassas). No Brasil, as atividades de coprocessamento de resíduos industriais iniciaram-se na década de 90 e hoje cerca de 60% das fábricas integradas possuem fornos licenciados para coprocessar resíduos.

Em 2014, a indústria brasileira do cimento utilizou 1,5 milhão de toneladas de resíduos (8%) e biomassas (7%).

Para alcançar o "Cenário 2°C" no futuro, o estudo mostrou que o setor deverá aumentar a substituição desses combustíveis alternativos para 35% até 2030 e 55% até 2050. Eles foram identificados em sete tipologias distintas, sendo quatro já bastante utilizados pela indústria: pneus inservíveis, resíduos industriais perigosos (*blend*), resíduos industriais não perigosos e moinha de carvão vegetal; e outros três com grande potencial de exploração e, principalmente, com menor fator de emissão: combustível derivado de resíduos sólidos (CDR), lodo de tratamento de esgoto e resíduos agrícolas.

No caso dos pneus inservíveis, que atualmente representam o resíduo mais utilizado pela indústria, a tendência é de menor disponibilidade no mercado futuro.

Os *blends* de resíduos industriais perigosos, preparados pelas plataformas de blendagem, possivelmente serão limitados pela redução da sua geração e custos de preparação.

A disponibilidade de resíduos industriais não perigosos deve aumentar no futuro com a limitação da disposição em aterros imposta pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Nesse sentido, o combustível derivado de resíduos sólidos urbanos (CDR) apresenta enorme potencial, em virtude de maiores pressões ambientais para a redução ou eliminação de aterros em um futuro próximo.

Com relação às biomassas, o estudo aponta que uma alternativa está no uso potencial de resíduos da agroindústria. Atualmente, a principal fonte utilizada é a moinha de carvão vegetal (resíduos do carvão vegetal), que, já em 2030, não deverá estar mais disponível.

Por outro lado, o lodo de esgoto, produzido a partir de estações de tratamento de efluentes municipais, poderá ter potencial para coprocessamento em um futuro próximo também, porém com impacto limitado na substituição térmica devido ao baixo poder calorífico e à necessidade de secagem em função da elevada umidade.

Assim, o uso de combustíveis alternativos, em substituição aos combustíveis fósseis não renováveis, representa a segunda principal alternativa do setor. A ampliação destes energéticos de 15% em 2014 para 55% em 2050 pode resultar em uma redução cumulativa de 55 Mt de CO_2. Isto significaria 13% do potencial de redução.

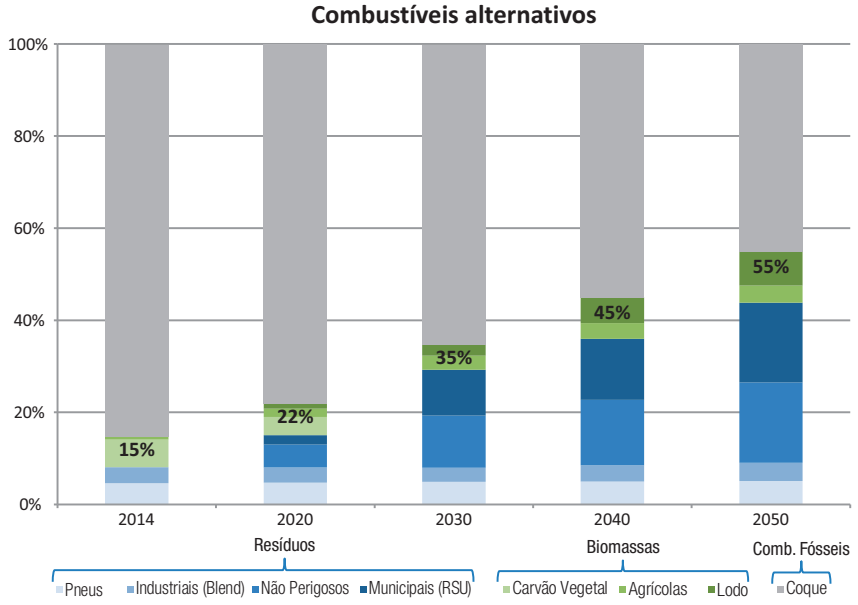


Figura 3
Projeção da evolução de uso de combustíveis alternativos na produção do cimento

3.3 Eficiência energética (térmica e elétrica)

De 2005 a 2014, a indústria duplicou a produção de cimento e ampliou em 50% a capacidade instalada, atingindo, em 2014, 71 milhões e 100 milhões de toneladas/ano, respectivamente. Atualmente, das cerca de 100 fábricas, cerca de 20 estão sem produção devido à crise porque atravessa o Brasil . O parque industrial possui 40% de seus fornos com menos de 15 anos e mais de 70% deles equipados com torres de pré-aquecedores de 4 a 6 estágios e pré-calcinadores. Modernos resfriadores de grelha equipam 80% dos fornos brasileiros e aproximadamente 46% dos moinhos de matéria-prima são verticais (SNIC, 2014).

O setor consegue atingir um consumo térmico médio de 3,50 GJ/t de clínquer (836 kcal/kg clínquer) e uma demanda de energia elétrica média de 113 kWh/t de cimento (SNIC, 2014).

Dado esse perfil, o estudo apontou que não são esperadas mudanças significativas no consumo térmico e elétrico até 2030. A partir desse ano, ocorreria a substituição gradual de unidades e de equipamentos mais obsoletos por unidades que utilizariam as melhores tecnologias disponíveis à época. Além disso, uma série de medidas de eficiência energética deverá ser adotada com vistas não só à redução das emissões, mas visando à melhoria geral nas operações:

- O aprimoramento dos controles de processo e, consequente otimização da produção, é uma das medidas mais promissoras. Essa é a opção de melhor penetração na indústria brasileira nos próximos anos devido ao seu baixo custo e fácil implementação;
- Melhoria da queimabilidade usando mineralizadores enfrenta dificuldade de ser implantada no país devido à escassez de jazidas de fluorita;
- A recuperação de calor residual (*waste heat recovery - WHR*) para a produção de energia elétrica possui um potencial de economia elétrica

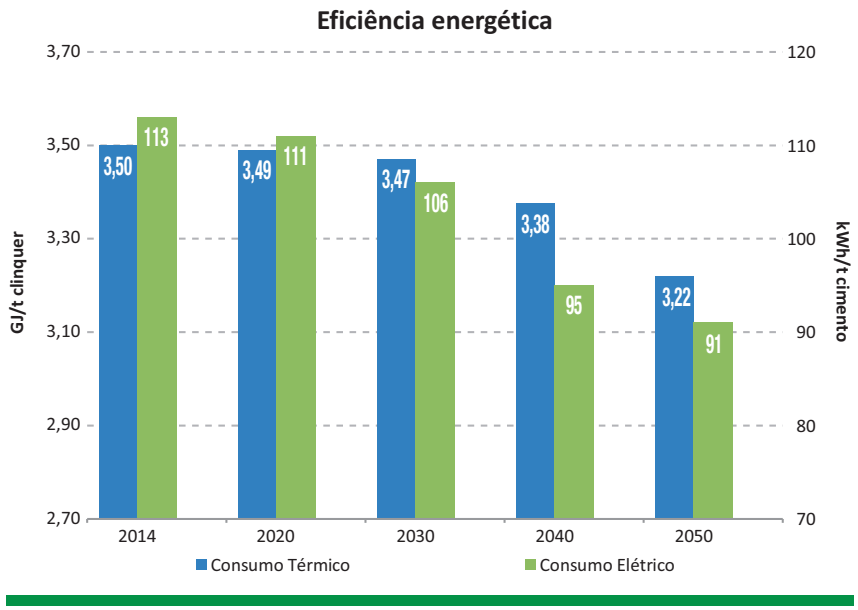


Figura 4
Projeção da evolução dos consumos térmico e elétrico na produção do cimento

de 20% a 30% de redução do consumo total da fábrica. Estima-se que essa tecnologia poderia ser adotada em cerca de 30% das plantas brasileiras, em médio prazo (2030);

- Com relação à redução do consumo elétrico, apesar da contribuição dessas tecnologias ser modesta em termos de redução das emissões de CO_2, deve-se considerar também: substituição dos moinhos de bolas por moinhos verticais de rolos; HPGR ou moinhos horizontais; utilização de separadores de alta eficiência; otimização da operação dos moinhos de cimento; e medidas gerais (utilização de motores de alta eficiência, uso de Unidades de Velocidade Variável (VSD), manutenções preventivas e redução de vazamentos de ar).

Com isso, seria possível alcançar valores próximos a 3,22 GJ/t de clínquer e 91 kWh/t de cimento até 2050.

Com base nesses números, em um "Cenário de 2°C", se todas as demais variáveis se mantivessem constantes, estima-se que a redução do consumo térmico seria em torno de 137 PJ e a economia de energia elétrica superior a 3.000 GWh, em relação ao "Cenário de 6°C". Em termos de mitigação de carbono, essa economia energética resultaria em uma redução acumulada das emissões de 38 Mt CO_2 no período de 2014 a 2050, correspondendo a 9% do potencial de redução.

3.4 Tecnologias inovadoras e emergentes

Entre as alternativas inovadoras e emergentes, a captura e utilização ou armazenamento de carbono (*CCUS – Carbon Capture and Utilization or Storage*) surge como uma das principais soluções tecnológicas com potencial de aplicação para grandes fontes emissoras, como é o caso do setor de cimento.

No "Cenário 2°C", essas alternativas se tornariam viáveis a partir de 2040, com um potencial de atingir até

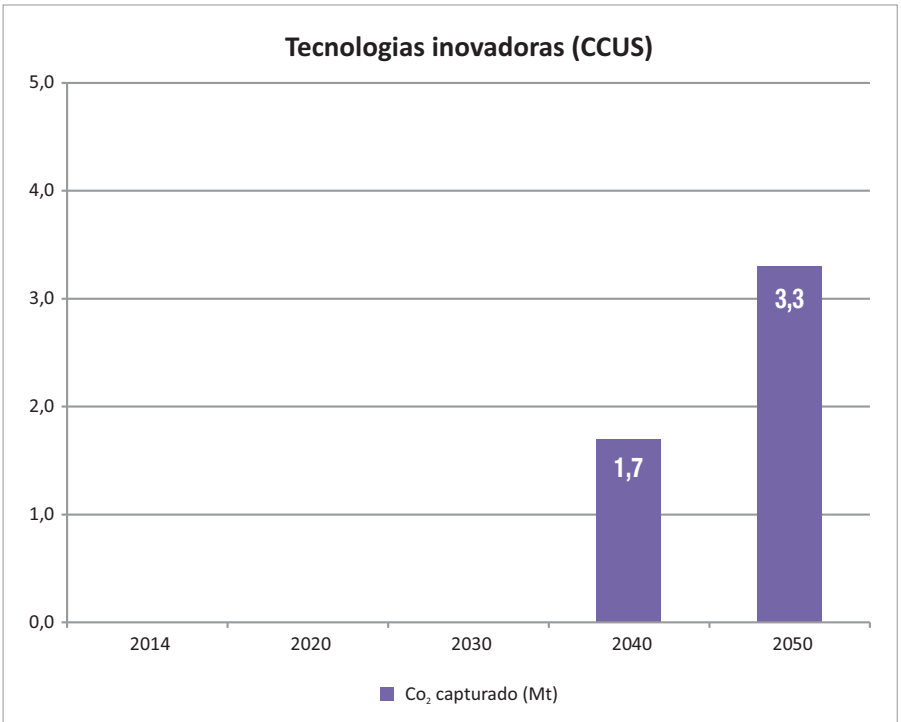


Figura 5
Previsão do potencial de mitigação de CO_2 nos anos de 2040 e 2050 pelo uso de tecnologias inovadoras

2050 aproximadamente 38 Mt de CO_2 mitigado acumulado. Para isto, é fundamental desde já o apoio à pesquisa e desenvolvimento (P&D) de todo tipo de tecnologia emergente. Esse número representa 9% do potencial de mitigação até 2050.

4. RESULTADOS DO *ROADMAP*: A MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE CO_2 ATÉ 2050

A modelagem de consolidação dos dados de cada grupo industrial pelos levantamentos feitos pelos especialistas sobre cada pilar, para projeção dos cenários de emissão, foi de responsabilidade da IEA, para os anos 2014 até 2050.

A contribuição de cada tecnologia e processo na redução das emissões projetadas foi tratada separadamente. Em seguida, como os resultados de alguns pilares interferem nos demais, esse fato foi levado em conta de acordo com o software específico da IEA.

As informações prestadas pela indústria do cimento para o cálculo de projeção pela IEA seguiram metodologia e planilha da CSI de contabilização de emissões (*GNR – Getting the Numbers Right*). Os principais dados utilizados na modelagem da IEA com respeito à projeção de produção de cimento foram as estimativas de população total do país no período 2014-2050 e a demanda de cimento per capita no mesmo período.

Já as variáveis de entrada para previsão dos cálculos do consumo de energia e emissões de CO_2 foram: a relação clínquer/cimento no ano base de 2014, o consumo de combustível por clínquer (GJ/t) no ano base, consumo de eletricidade por cimento (kWh/t) no ano base, matriz de combustíveis utilizados, entre outros.

O potencial de redução das emissões diretas de CO_2 apresenta diferentes resultados ao longo do tempo, refletindo tanto a demanda existente como o grau de maturidade e penetração das soluções sugeridas para o setor. Tendo por base as 40 Mt de CO_2 emitidas pela indústria brasileira do cimento em 2014, as emissões poderiam atingir cerca de 66 Mt de CO_2 em 2050, se nenhuma ação mitigadora fosse adotada ("Cenário 6°C").

Contudo, esse valor pode cair a 44 Mt de CO_2 no mesmo ano a partir da combinação das medidas abordadas no Roadmap ("Cenário 2°C"). Isto representaria um acréscimo de emissão de apenas 10% sobre o volume atual, contra um aumento da produção de cimento projetada de cerca de 65% no período. Com isso, a emissão específica passaria dos 564 kg CO_2 /t cimento atuais para 375 kg CO_2 /t cimento em 2050, uma redução de 33% (Figura 6).

Em termos de emissão acumulada ao longo de todo o período, comparando-se os dois cenários, seria possível evitar a emissão de 421 Mt de CO_2. O principal fator que contribui para esta redução é a substituição do clínquer, com 290 Mt de CO_2 mitigado entre 2014 e 2050 (ou 69%). O uso de combustíveis menos intensivos em carbono, à medida que o setor migra do coque de petróleo em direção às biomassas e resíduos, contribui com 55 Mt de CO_2 deste total (13%). Medidas de eficiência energética e tecnologias inovadoras como CCUS respondem com 38 Mt de CO_2 cada uma (9%).

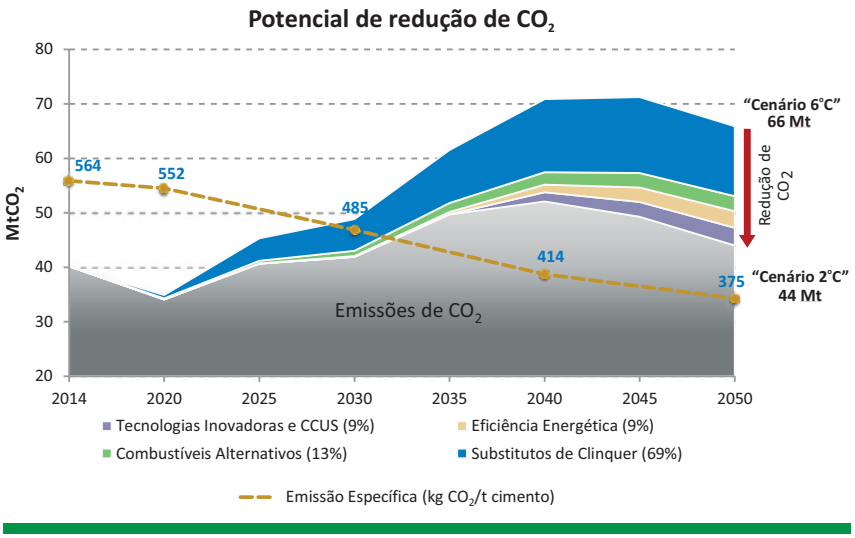


Figura 6
Previsão do potencial de redução das emissões de CO_2 até 2050

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O baixo consumo per capita de cimento no Brasil (260 kg/hab./ano em 2014) quando comparado à média mundial (553 kg/hab./ano), aliado ao elevado déficit habitacional e de infraestrutura do país e à expectativa de crescimento populacional, aponta para uma retomada do crescimento na produção em médio/longo prazo, aumentando entre 60% e 120% em 2050 com relação a 2014 (nos cenários de baixa e alta demanda), o que exige que sejam tomadas medidas para mitigar as emissões de CO_2 resultantes.

O *Roadmap* apresenta uma série de medidas e soluções técnicas capazes de acelerar a transição da indústria

brasileira do cimento rumo a uma economia de baixo carbono e de menor impacto para as mudanças climáticas.

Alcançar os níveis de redução de emissões de carbono necessários para atender aos cenários climáticos apresentados no *roadmap* exige, entretanto, a transposição de uma série de barreiras e gargalos que hoje impedem ou dificultam o avanço de muitas das alternativas técnicas propostas. Isto requer, muito além do próprio engajamento da indústria, um esforço conjunto em vários níveis de ação, que vão desde governos municipais, estaduais e nacionais, passam por órgãos legisladores e entidades normativas, e vão até as agências de fomento e desenvolvimento, instituições de pesquisa nacionais e internacionais, entre tantos outros.

Finalmente, cumpre enfatizar que o concreto é um dos materiais de construção mais ecologicamente corretos disponíveis, pois oferece durabilidade e flexibilidade de design, sendo completamente moldável. Suas matérias-primas são abundantes em todo o mundo e o concreto pode ser reciclado. Não é tóxico e apresenta uma das taxas mais baixas de emissão.

O cimento é componente imprescindível para a preparação do concreto e a indústria do cimento está "fazendo a sua parte" ao promover ações de mitigação de CO_2 no seu processo de fabricação, contribuindo para tornar o concreto um material ainda mais sustentável.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GALLO et alii. Ocean commitments under the Paris Agreement. Nature Climate Change vol.7,pág.833–838(2017).

[2] GRASSI et alii. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. Nature Climate Change vol.7, pág.220–226 (2017).

[3] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers, 2014. Disponível em http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf. Acessado em 1.7.2019.

[4] WARREN,R.et alii . The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5°C rather than 2°C, Nature Climate Change vol.7, pág. 791-795 (2017).

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-31-2
Formato: 18,6 x 23,3cm
Páginas: 32

PATROCÍNIO

EECEMBU

Guia de Prevenção da Reação Álcali-Agregado

COORDENADORES
Cláudio Sbrighi Neto, Eduardo Brandau Quitete
e Arnaldo Forti Battagin

Apresenta de forma didática a sequência de ações necessárias para a prevenção da reação álcali-agregado (RAA). São abordadas generalidades da RAA, avaliação de risco de sua ocorrência, medidas preventivas, classificação da ação preventiva, ensaios laboratoriais, medidas de mitigação e a tomada de decisão.

O trabalho é resultado das discussões ocorridas no **Comitê Técnico de Reação Álcali-Agregado do IBRACON (CT-201)** e seu lançamento segue a recente publicação das sete partes da norma **ABNT NBR 15577 Agregados – Reatividade álcali-agregado**.

Aquisição: Acesse a Loja Virtual do IBRACON.
www.ibracon.org.br

Por que os cimentos com adições vieram para ficar?

ARNALDO FORTI BATTAGIN
Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)

MARISTELA GOMES DA SILVA – Professora Titular
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

I. INTRODUÇÃO

O consumo apreciável de energia durante o processo de fabricação do cimento motivou a indústria de cimento nos anos 70 do século passado na busca de medidas para diminuição do consumo energético.

Uma das alternativas de sucesso foi o uso de escórias granuladas de alto-forno e materiais pozolânicos na composição dos chamados cimentos com adições.

Quando adicionadas ao cimento, as pozolanas e escórias combinam-se e/ou são ativadas pelo hidróxido de cálcio liberado nas reações de hidratação do clínquer, originando compostos com propriedades ligantes.

Além do aspecto ligado à conservação de energia, as principais razões de utilização das escórias e pozolanas devem-se às propriedades específicas que trazem ao cimento, com certas vantagens sobre o cimento Portland sem adições, especialmente com relação à durabilidade.

O tema teve sua importância renovada com a agenda ambiental fazendo parte da sociedade no dia a dia. De fato, há um consenso entre diversos setores da sociedade de que as mudanças climáticas afetarão a vida do homem e suas atividades, assim como é exíguo o prazo para reverter essa tendência. Por isso, nas reuniões internacionais, como a 21ª Conferência das Partes – COP-21, que ocorreu em Paris no final de 2015 e outras anteriores a essa ou mais recentes, discutiram-se os compromissos dos países em reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa (MMA, 2016).

No Brasil, vários setores vêm acompanhando com grande interesse a evolução das negociações relacionadas com a mudança do clima, em função de seu compromisso com o desenvolvimento sustentável e de possíveis reflexos em seus negócios.

O debate sobre mudanças climáticas é questão importante para a indústria de cimento, uma vez que a emissão de CO_2 é inerente ao seu processo de produção, seja pela descarbonatação da sua principal matéria-prima, o calcário, seja pela emissão resultante da queima de combustíveis Isto faz com que a indústria de cimento contribua com cerca de 7 a 8% das emissões de CO_2 globais (ALI, SAIDUR, HOSSAIN, 2011), mas menos de um terço disso no Brasil.

No Brasil e em países em desenvolvimento, a produção de cimento deverá crescer acompanhando o aumento populacional e a sua modernização. Portanto, o desafio é grande e conhecer a projeção de emissões setoriais a médio e longo prazo, e seu respectivo potencial de redução, é essencial para se avançar para uma economia de baixo carbono.

Atenta a isso, a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e o SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), entidades representantes da indústria cimenteira, concluíram, em 2019, o *Cement Technology Roadmap Brazil 2050* (ABCP, SNIC, 2019), em parceria com organismos internacionais, que apontou o aumento do uso de cimento com adições como sendo a alternativa de maior impacto na mitigação de CO_2 até 2050 (veja em Entidades da Cadeia).

A produção de cimentos Portland com adições substituindo parte do clínquer propicia a redução das emissões de CO_2, uma vez que diminui o consumo de clínquer e, consequentemente, a queima de combustíveis e a emissão por calcinação/descarbonatação, além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento. De fato, o uso dessas adições em cimento apresenta inúmeras vantagens relacionadas com a maior durabilidade e vida útil de estruturas de concreto, como baixa permeabilidade, resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, prevenção das reações álcali-agregado, elevada resistência à compressão em idades mais avançadas, entre outras (SILVA et al., 2017). Os fíleres calcários por melhorem a compacidade e a trabalhabilidade dos concretos e argamassas, fazendo o papel de ponte entre os produtos de hidratação e, em

menor escala, também formando produtos hidratados, começaram a ser considerados como forte alternativa na mitigação de CO_2.

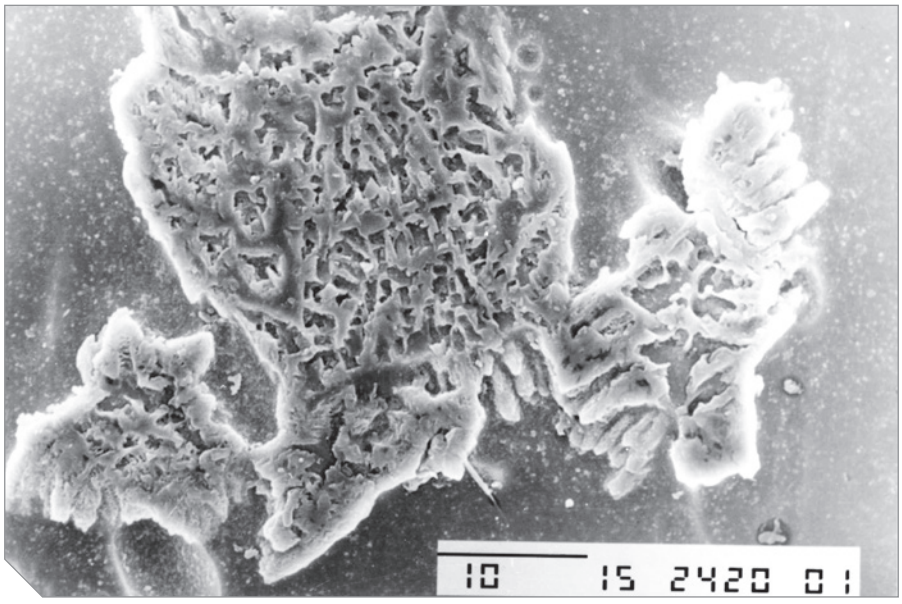
A seguir são feitas considerações sobre os principais tipos de adição utilizados no Brasil, além do retardador de pega, presentes em todos os tipos de cimento.

2. ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO

A escória granulada é o coproduto da fabricação do gusa nos altos-fornos, material de natureza vítrea, constituído em sua maior parte de aluminossilicatos de cálcio. Resulta da combinação dos minerais da ganga do minério de ferro, das cinzas do coque utilizado como combustível e ativador da redução e da cal utilizada como fundente. Além dos aluminossilicatos cálcicos, ocorrem, secundariamente, sulfetos de cálcio e manganês e óxidos de ferro e manganês. A presença de magnésio está condicionada à utilização de calcário magnesiano como fundente.

De acordo com a especificação brasileira para cimento (ABNT NBR 16697 Cimento Portland – Requisitos), no cimento Portland de alto-forno (CPIII), as escórias constituem de 35% a 75% da massa total do ligante e no cimento Portland composto com escória (CPII-E), os teores desse constituinte podem abranger de 6 a 34% (ABNT, 2018).

Além das características do clínquer, as propriedades do cimento Portland de alto-forno dependem em grande parte do teor e das características das escórias. A atividade hidráulica das escórias, por sua vez, depende principalmente da sua finura, composição química e do seu grau de vitrificação. A composição química está ligada a diversos fatores intrínsecos de produção (características do alto-forno, como temperatura, capacidade de dessulfuração, viscosidade e características do minério de ferro, fundentes e combustível). Em linhas gerais, quanto mais básica for a escória, maior será sua atividade hidráulica; porém, por se tratar de um subproduto da indústria siderúrgica a partir do qual o gusa, o produto principal, é controlado, torna-se economicamente inviável qualquer controle de composição química da escória que ultrapasse o limite de interferência no processo industrial de fabricação do gusa.



Escória de alto-forno vista através do microscópio eletrônico de varredura, onde se observa dendritos de mervinita em meio à matriz vítrea

O grau de vitrificação de uma escória depende de sua composição química e viscosidade, porém, mais primordialmente, do tipo e da rapidez de resfriamento na saída do alto-forno. A vitrificação é obtida industrialmente pelo processo de granulação, que consiste em submeter a escória, ainda fundida, a um resfriamento brusco, impedindo que os átomos da escória se organizem numa estrutura cristalina estável e sem reatividade.

Em linhas gerais, quanto mais vítrea, mais reativa será a escória; porém, como a composição química do vidro interfere na solubilidade da escória, um início de cristalização de melilita ou merwinita, por enriquecer o vidro em cálcio e alumínio, aumenta a sua reatividade (SMOLCKYK,1980) . A determinação do grau de vitrificação é geralmente feita por microscopia.

De acordo com a ABNT NBR 16697, as escórias utilizadas para cimento devem apresentar alto grau de vitrificação e obedecer à relação:

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > \quad (1)$$

Até 1952 não se encontrava cimento com adições de escória no mercado brasileiro, tendo pioneiramente a Cimento Tupi produzido naquele ano 71.765 toneladas de cimento utilizando escória proveniente de Cia Siderúrgica Nacional, em Volta Redonda-RJ, aliando-se às experiências europeia, alemã e francesa, com "história" bem mais antiga. De fato, o primeiro cimento comercial de alto-forno da Alemanha data de 1892, sendo exemplo clássico as obras do Metrô de Paris, com

cimento de alto-forno, já em 1900 (BATTAGIN,1988).

3. MATERIAIS POZOLÂNICOS

Pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que, por si sós, não possuem reatividade, mas que, em presença de água e quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio, na temperatura ambiente, dando origem a compostos com propriedades ligantes.

De acordo com a ABNT NBR 12653 – Materiais Pozolânicos - Requisitos, os materiais pozolânicos são classificadas em naturais e artificiais, sendo os primeiros definidos como materiais de origem vulcânica, geralmente ácidos ou de origem sedimentar, e as pozolanas artificiais, como os materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica. As pozolanas artificiais podem ser subdivididas em:

- argilas calcinadas – materiais provenientes da calcinação de determinadas argilas que, quando tratadas a temperaturas entre 500^{0}C e 900^{0}C, adquirem a propriedade de reagir com o hidróxido de cálcio;
- cinzas volantes – resíduos finamente divididos, provenientes da combustão de carvão pulverizado ou granulado;
- outros materiais – podem ser considerados ainda como pozolanas artificiais, desde que apresentem atividade pozolânica comprovada, outros materiais tais como escórias siderúrgicas ácidas, rejeito sílico-aluminoso de craqueamento do petróleo, cinzas de resíduos vegetais e rejeitos de carvão mineral, entre outros.

A utilização de pozolana na construção civil data pelo menos da época do Império Romano, com utilização de misturas de cinzas vulcânicas do Vesúvio com cal, havendo construções daquela época que estão preservadas até os nossos dias. Contudo, encontram-se referências na literatura de que, há 2.700 anos, os etruscos e, mais tarde, os gregos na Ilha de Santorin já utilizavam materiais pozolânicos.

Os estudos mais sistemáticos sobre pozolanas naturais são devidos a Michaelis, em 1899, e a Feret, em 1901, na França. Entretanto, o primeiro cimento Portland pozolânico comercial, com utilização de pozolana natural, somente apareceria na Itália em 1923. Estudo mais abrangente sobre cinzas volantes é mais recente, sendo baseado nas investigações de Davis, nos Estados Unidos, em 1937.

Apesar das investigações de Davis nos Estados Unidos, o primeiro cimento Portland pozolânico comercial foi produzido pioneiramente na França, em 1951, com utilização de 20% de cinzas volantes.

No Brasil, em 1964, houve aproveitamentos esporádicos de cinzas volantes. Entretanto, o primeiro cimento Portland pozolânico comercial iria ser produzido no Rio Grande do Sul, em 1969, pela S.A. Indústrias Reunidas Francisco Matarazzo, com utilização de cinzas volantes da Termelétrica de Charqueadas, com produção de 42.510 toneladas de cimento.

Com relação ao uso de argila calcinada, faz-se necessário mencionar o importante papel desempenhado pela fábrica de argila calcinada de Jupiá, que esteve em operação entre 1965 e 1979, tendo fornecido pozolana para importantes obras, como as barragens de Jupiá, Ilha Solteira, Água Vermelha etc. A fábrica de Jupiá foi instalada especificamente para a construção da hidrelétrica, sendo posteriormente adquirida pelo Grupo Itaú, encontrando-se atualmente desativada.

De maneira geral, pode-se afirmar que a atividade pozolânica de uma argila é tanto mais intensa quanto maior é o conteúdo de fase amorfa ou estrutura desarranjada no material, como, por exemplo, diatomitos ou argilominerais desestruturados, e que efetivamente a atividade pozolânica de uma argila pode ser melhorada por tratamento térmico.

As argilas mais indicadas para a

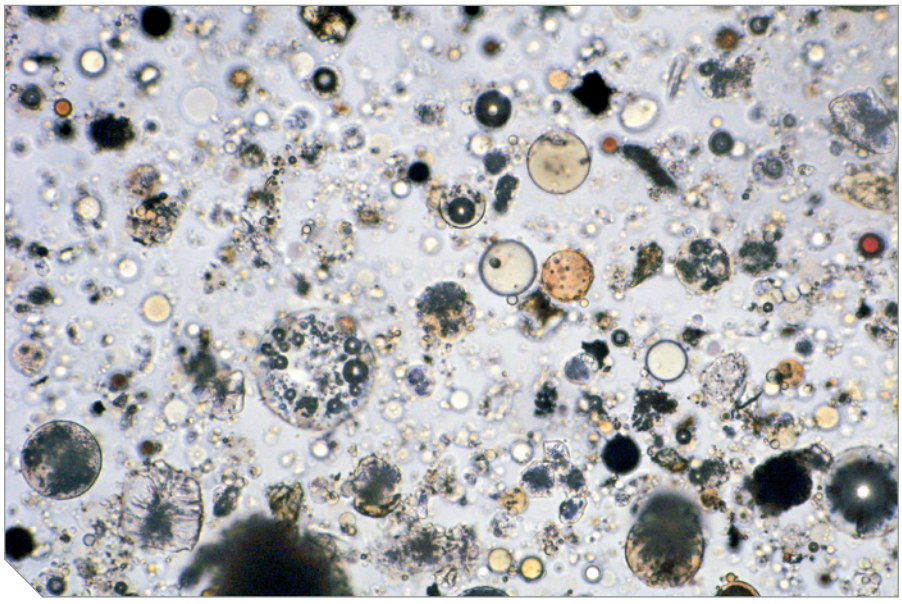
Cinza casca arroz vista ao microscópio estereoscópico (ampliação 50x)

ativação térmica são aquelas mais ricas em argilominerais (teores acima de 50%) e com menor conteúdo de quartzo associado (fase de dureza elevada e de natureza praticamente inerte). As argilas cauliníticas são as mais adequadas à fabricação de pozolanas termicamente ativadas, exibindo uma atividade máxima após tratamento térmico entre 750°C e 850°C. A calcinação deve ser controlada, de modo a obter quantidade reduzida de argilominerais não calcinados (caulinita residual) e, ao mesmo tempo, não promover a cristalização da metacaulinita em mulita, por excesso de temperatura de queima, pois esse composto é de natureza inerte.

A tecnologia de fabricação de argilas calcinadas exige investimentos, beneficiamento e conhecimento técnico (*know-how*), razão pela qual as plantas de cimento as têm preterido em favor de cinzas volantes ou escórias de alto-forno, quando disponíveis. Na ausência dessas adições, por razões geográficas ou dificuldades na oferta, as argilas calcinadas têm sido uma solução para uso no cimento.

A história da utilização de pozolanas naturais no Brasil é relativamente recente, remontando ao ano de 1981, com produção pioneira de 191.686 toneladas de cimento Portland pozolânico pelo Grupo João Santos, do Nordeste, tendo sido utilizadas rochas vulcânicas ácidas e subordinadamente diatomitos. No Brasil, ocorrências de rochas vulcânicas com propriedades pozolânicas são raras, ao passo que os depósitos de diatomitos, quando mais puros, são utilizados para outros fins mais nobres, como isolantes térmicos, elementos filtrantes, abrasivos etc.

De acordo com a especificação brasileira ABNT NBR16697, no cimento Portland pozolânico (CP IV) os materiais pozolânicos constituem de 15% a 50% da massa total do ligante e no cimento Portland composto com material pozolânico (CPII-Z), os teores desse constituinte podem abranger de 6 a 14%.



Cinza volante observada ao microscópio de luz transmitida (ampliação 600 x)

Analogamente ao que ocorre com as escórias em relação aos cimentos Portland de alto-forno, as propriedades do cimento Portland pozolânico dependem em grande parte do teor e das características das pozolanas. A atividade pozolânica, por sua vez, depende da área específica da pozolana, dos teores de sílica e alumina reativas, da estrutura cristalina desordenada e, principalmente, da sua capacidade de combinar com a cal para formar compostos com propriedades cimentícias.

4. FÍLER CALCÁRIO

A adição de fíler calcário desponta como uma importante prática na mitigação do CO_2 no processo de fabricação do cimento, já que evita a

Rocha calcária britada que, depois de moída, torna-se fíler calcário

descarbonatação, reduz a emissão relativa aos combustíveis, ao mesmo tempo que, por apresentar moabilidade inferior a do clínquer, reduz o consumo de energia elétrica nas operações de moagem.

Como fíler calcário deve ser entendido especificamente o material proveniente da rocha calcária, finamente moído, que adicionado ao cimento, produz concretos mais trabalháveis. Isso se deve ao fato de que sua adição ao cimento implica uma melhoria da distribuição granulométrica do sistema, gerando uma menor demanda de água. Esse conceito de fíler pode ser estendido a outros materiais finamente moídos, mas que, atualmente, não apresentam a competitividade que o fíler calcário possui, por razões logísticas e técnicas, mas que, em longo prazo, também serão passíveis de utilização como adição ao cimento.

O interesse por este substituto parcial do clínquer foi sempre limitado pela disponibilidade de grandes volumes de escória granulada de alto-forno e de cinzas volantes, bem como pelo seu menor desempenho comparado a essas adições. No entanto, como a produção de cimento deverá crescer mais rapidamente que a oferta desses dois coprodutos, o fíler surge como uma opção atrativa para a indústria, disponível em quantidades ilimitadas e em praticamente todas as regiões. Os fíleres e as adições, que são coprodutos de outros processos, são as duas únicas fontes de substitutos de clínquer que dispensam calcinação e, em consequência, apresentam pegada de CO_2 muito mais baixa, limitada ao consumo elétrico e a eventual secagem. Possuem também um menor custo de produção.

Atualmente, a norma europeia EN 197-1: 2011 contempla dois subtipos de cimento com fíler: com 6 a 21% e com 21 a 35%, subdivididos, por sua vez, conforme as características do fíler calcário adicionado (CEN, 2011) Outros países seguiram a normalização favorável à adição calcária, como o Brasil, que admite, na norma do cimento Portland composto com fíler, teores de até 25%, desde 2018 (Tabela 1); Canadá e Estados Unidos admitem até 15%, desde 2009 e 2012, respectivamente; Argentina, até 25%, desde 2010; e México, até 35%, desde 2004 (BATTAGIN, 2018).

Estão adiantados os estudos de revisão da norma europeia que flexibiliza o uso do fíler simultaneamente com outras adições (escórias de alto-forno e pozolanas), com um máximo de 49% de clínquer (MENDES et alii, 2019). Na Europa foi de fato a redução significativa de emissões que impulsionou a produção e consumo desse tipo de cimento com fíler calcário, que, por não afetar significativamente as propriedades tecnológicas de cimentos, levou a uma mudança considerável no mercado. O principal tipo de cimento consumido na Europa é o cimento composto CEM II, representando mais de 60% do consumo total de cimento. Esses números abrem uma importante oportunidade para avanços na mitigação do CO_2 na fabricação do cimento no Brasil.

▶ **Tabela 1 – Composição dos cimentos Portland**

Tipo	Sigla	Clínquer + Gesso (%)	Escória (%)	Pozolana (%)	Fíler calcário (%)
Cimento Portland comum	CP I	95-100	0-5	0-5	0-5
	CP I-S	90-94	0	0	6-10
Cimento Portland composto	CP II-E	51-94	6-34	–	0-15
	CP II-Z	74-94	–	6-14	0-15
	CP II-F	75-89	–	–	11-25
Cimento Portland de alto-forno	CP III	65-25	35-75	–	0-10
Cimento Portland pozolânico	CP IV	85-40	–	15-50	0-10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V-ARI	100-90	–	–	0-10

Fonte: ABNT, 2018.

5. REGIONALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTOS COM ADIÇÕES

A localização no sul do País das jazidas economicamente exploráveis de carvão mineral condicionou a instalação das termelétricas alimentadas a carvão mineral nessa região, tornando disponíveis para a indústria cimenteira local os resíduos da queima do carvão, as chamadas cinzas volantes.

Por se tratar de um segmento industrial totalmente desfavorável aos transportes de longas distâncias, a produção de cimentos Portland pozolânicos com cinzas volantes também ficou confinada aos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná.

Na Região Sudeste, por sua vez, encontram-se instaladas as maiores usinas siderúrgicas a coque (USIMINAS-MG, Gerdau AÇO MINAS-MG, CSN-RJ, CSA-RJ, AMT-ES, entre outras) e, por consequência, o material mais

interessante para as fábricas situadas nessa região é a escória granulada de alto-forno. Exemplo de dependência da logística da fonte de escória foi o fechamento, anunciado pela imprensa há cerca de 3 anos, de duas unidades produtoras de CPIII, pertencentes às empresas Votorantim e Intercement, motivado pela paralisação da COSIPA, em Cubatão – SP.

Na Região Nordeste e Centro-Oeste, cimentos Portland pozolânicos com pozolanas naturais ou com argilas calcinadas têm significativa participação no mercado, sendo que na Região Norte é encontrado, também, um fabricante que utiliza argila calcinada. O Brasil reúne considerável experiência na tecnologia de argilas calcinadas. Levantamentos realizados em 2015 pela ABCP indicam que 22 plantas já haviam adotado essa tecnologia para a fabricação de cimentos CPII-Z e CP IV. De fato, atualmente, as argilas calcinadas monopolizam as pesquisas, em virtude de serem disponíveis em todo mundo, ao contrário das cinzas volantes e das escórias de alto-forno, caracterizadas por ofertas regionais. Por diferirem quanto à geologia, composição química e mineralógica, a pesquisa é mais ampla do que a de outros materiais estudados até o momento. Elas são consideradas como a fonte mais promissora de materiais ligantes quando conjugadas com a adição de fíleres calcários e apresentam sinergia nas propriedades do concreto, e que, portanto, podem ter uma contribuição substancial na mitigação do CO_2 no processo de fabricação do cimento.

Por outro lado, os cimentos Portland compostos com fíler (CP II-F, principalmente), devido ao fato de contemplarem um tipo de adição que constitui a mesma matéria-prima da fabricação do clínquer, apresentam distribuição ampla no Brasil, não sendo restritos à localização das jazidas de carvão ou siderúrgicas. Entretanto, o melhor desempenho das escórias e pozolanas no contexto geral como adições faz com que, em alguns mercados regionais, haja maiores ofertas de cimentos CP II-E, CP III e CP IV em detrimento do CP II-F.

A adição sistemática de fíler calcário é mais recente, está prevista na especificação para cimento de alto-forno desde 1987 e na especificação dos chamados cimento Portland comuns da época (CPS, CPF e CPZ) em 5% desde 1988. Contudo, o início de experiências industriais para viabilizar a utilização do fíler calcário no Brasil remonta à década de 70.

Atualmente os cimentos com adições dominam o mercado, sendo a oferta do cimento Portland comum (sem adições) muito pequena e restrita a usos específicos ou demanda por encomenda.

6. PRINCIPAIS APLICAÇÕES DOS CIMENTOS COM ADIÇÕES

De uma maneira geral, os cimentos com adições têm, para as aplicações rotineiras e convencionais, desempenho comparável ao dos cimentos Portland comuns, sendo que para certos tipos de obras apresentam algumas vantagens. Apresentam características para uso geral, porém com necessidade de algumas precauções para compensar, se necessário, o menor desenvolvimento inicial de resistência, sendo seu uso especialmente indicado para concretos em ambientes agressivos por trazer melhoria da durabilidade.

Assim, as principais vantagens dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos estão ligadas: a maior estabilidade, durabilidade e impermeabilidade que conferem ao concreto; ao menor calor de hidratação; a maior resistência ao ataque por sulfatos; a maior resistência à compressão em idades mais avançadas; a maior resistência à tração e à flexão e a uma melhor ou igual durabilidade. Portanto, é especialmente recomendável o uso de cimentos CP III e CP IV em:

- obras de concreto-massa, como barragens e peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, etc.;
- obras em contato com ambientes agressivos por sulfatos, terrenos salinos, etc.;
- tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos ou efluentes industriais;
- concretos com agregados reativos, pois esses cimentos concorrem para minimizar os efeitos expansivos da reação álcali-agregado;
- pilares de pontes ou obras submersas em contato com águas correntes puras;
- obras em zonas costeiras ou em água do mar;
- pavimentação de estradas e pistas de aeroportos, etc.

Por outro lado, sua menor resistência inicial, quando comparados com os cimentos Portland comuns, pode ser incrementada pelo uso de aditivos aceleradores do endurecimento ou por compensações na dosagem do concreto. O emprego dos cimentos CP III e CP IV deve ser cauteloso em pré-moldados com cura normal, nos casos em que se exija desforma rápida, o que pode ser obtido com cura a vapor. Também devem ser evitadas as concretagens em ambientes muito secos ou em temperaturas baixas. Como contém sulfetos, provenientes da escória, o cimento Portland de alto-forno não é recomendado em caldas de injeção para bainhas de protensão, embora no concreto protendido ou

armado não haja restrições de uso. Também deve ser evitado seu uso em argamassa de assentamento de pisos e azulejos, pois pode provocar manchas no revestimento ou em chapiscos, por possibilitar problemas de aderência por falta de cura nesse tipo de aplicação.

Os cimentos com adições atualmente têm participação expressiva no mercado brasileiro, sendo que o meio técnico mais esclarecido já não tem dúvidas e predisposições contrárias ao emprego desses tipos de cimento, ao passo que continuam os trabalhos de divulgação da ABCP e suas Associadas junto ao grande público consumidor para desmitificar por completo eventuais preconceitos existentes.

Tem grande alcance também o papel que vem desempenhando a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas através do CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, o qual através da contribuição voluntária de especialistas de entidades representantes de consumidores, produtores e neutros, vem trabalhando no âmbito da normalização dos cimentos com adições, acompanhando a evolução brasileira.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de cimentos com adições está bem consolidado no Brasil e a indústria de cimento apresenta atualmente um das menores taxas de emissão específica de CO_2 por tonelada de cimento produzida em âmbito mundial.

Frente aos desafios de limitação de aumento temperatura dos oceanos pelos impactos das mudanças climáticas, traduzidos por metas de redução de CO_2 estabelecidas no Acordo de Paris (MMA, 2016), do qual o Brasil é signatário, há necessidade de novos avanços de mitigação.

Entretanto, no que diz respeito ao uso de adições para avançar na mitigação de CO_2, existem alguns fatores limitantes, que constituem desafios a serem vencidos, dos quais se salientam:

- Incertezas relacionadas à disponibilidade de escórias de alto-forno, dado o menor crescimento da oferta em relação ao aumento da produção de cimento;
- Tendência de maior descarbonização da matriz energética brasileira, impactando na menor disponibilidade de cinzas volantes, limitando-se a pouco mais do que é utilizado atualmente;
- A disponibilidade regionalizada de escórias granuladas na região Sudeste e de cinzas volantes na região Sul inviabiliza seu uso em outras regiões do país;
- Falta de uma interação com as indústrias siderúrgicas e do aço no sentido de juntar esforços para a ativação de escórias não granuladas, ou mesmo para viabilizar o maior uso de escórias não convencionais;
- As normas brasileiras limitam o uso de fíler calcário em no máximo 25%, sendo necessários novos avanços na base normativa, permitindo o desenvolvimento de outros tipos de cimentos de menor desempenho e adequados a aplicações específicas;
- Necessidade de programas de pesquisa para o desenvolvimento de novos produtos (cimentos quaternários), com teores mais elevados de adições (fíleres calcários e argilas calcinadas), bem como de novos materiais a serem utilizados como substitutos de clínquer;
- Desinformação do consumidor informal (“autoconstrutor”) quanto às melhores práticas de uso do cimento.

Finalmente, cumpre enfatizar que a indústria de cimento dispõe de uma ferramenta que pode responder às demandas cada vez mais frequentes das políticas públicas e nortear os tomadores de decisão em termos de mitigação e metas de CO_2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ali M B, R. Saidur, M.S. Hossain. A review on emission analysis in cement industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2011) 2252–2261.
[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16.697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
[3] BATTAGIN,A.F. Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno, Estudo Técnico 90, ABCP 1988.
[4] BATTAGIN,A.F. Panorama resumido das normas internacionais de cimento. ABCP São Paulo, 2018 (inédito).
[5] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 197-1: 2011. Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels, Belgium, 2011.
[6] MENDES, A. A. F ET alii. A contribuição das adições minerais para redução das emissões de CO2e da indústria de cimento em 2050 (no prelo)
[7] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Acordo de Paris, 2016. Disponível em http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris (acessado em 12.06.2019).
[8] ROADMAP TECNOLÓGICO DO CIMENTO: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050, SNIC, ABCP, (Brasília, 2019).
[9] SILVA, M. G.; BATTAGIN, A. F.; GOMES, V. Cimentos Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. Materiais de construção civil. 3 ed. São Paulo: Ibracon, 2017. p. 791-823.
[10] SMOLCKZYK H. G.Slag structure and identification of slags.In International Congresso n the chemestry of cement, 7th, Paris, 1980. Vol III-1, pág 3-17.

Abatimento de CO_2 na produção de concretos com incorporação do resíduo do polimento do porcelanato

HUMBERTO MYCAEL MOTA SANTOS
ANA CECÍLIA VIEIRA DA NÓBREGA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal de Pernambuco

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais não renováveis, gera grande quantidade de resíduos e, consequentemente, contribui para a poluição do meio ambiente. Para se ter uma ideia, a construção civil é uma das maiores consumidoras de areia comercializada no Brasil, totalizando milhões de toneladas por ano. Além disso, outro problema desse setor é o grande consumo de cimento, como parcela considerável na emissão dos gases do efeito estufa. Logo, se nada for feito, esse cenário irá se agravar, ou seja, o consumo desses materiais (areia e cimento) aumentará ao longo dos anos.

Entretanto, a construção civil se mostra favorável diante desses problemas, pois ela consegue reciclar resíduos gerados, além de incorporar resíduos oriundos de outros setores na sua cadeia de produção. Com isso, há tendência de produzir cada vez mais concretos sustentáveis utilizando materiais alternativos.

Estudos acerca de concretos sustentáveis revelam que os principais objetivos são a utilização de materiais alternativos como: adições, materiais cimentícios suplementares e agregados. Destaca-se que outro fator importante na produção de concretos sustentáveis, além dos ambientais, está na diminuição do custo; visto que os materiais incorporados nesse tipo de concreto são, na maioria dos casos, resíduos. Dentro desse conceito, aborda-se neste trabalho a utilização do resíduo do polimento do porcelanato (RPP).

O resíduo do polimento do porcelanato (RPP) pode ser definido como uma mistura do resíduo cerâmico do porcelanato, provindo da etapa de polimento, com o material abrasivo utilizado para polir o porcelanato, que desprende devido a esse processo, apresentando-se como um pó fino, branco e umedecido.

O reaproveitamento do RPP promove benefícios para as empresas como: diminuição de resíduos encaminhados para aterros industriais; soluções de problemas ambientais; economia de energia; e redução de custo. Além disso, se seu reaproveitamento for aplicado em concretos poderá contribuir para a produção de um concreto sustentável e mais resistente devido ao efeito fíler, melhorando a compacidade do material e, consequentemente, aumentando a durabilidade, pois o RPP é um material com granulometria semelhante ao do cimento.

Pelo fato do concreto ser um dos materiais mais utilizado na construção civil, e o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) possuir um bom desempenho em matrizes cimentícias, eles foram escolhidos como materiais de estudos, a fim de produzir concretos sustentáveis com a incorporação do RPP e analisar a influência do RPP na emissão equivalente de CO_2 por m^3 de concreto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Matérias-primas utilizadas

Foi utilizado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI), tendo resistência à compressão aos 28 dias de 37 MPa. O resíduo do polimento do porcelanato (RPP) foi fornecido pelo Grupo Elizabeth, em uma de suas fábricas, localizada em Conde – PB,

Tabela 1 – Propriedades físicas dos materiais utilizados

Material	Massa unitária (g/cm³)	Massa específica real (g/cm³)	Área específica por BET (m²/g)	Diâmetro médio (µm)	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura (mm)
CP V–ARI	–	3,15	1,90	7,89	–	–
RPP	–	2,48	2,79	4,32	–	–
Areia	1,39	2,58	–	–	2,57	2,40
Brita	1,48	2,63	–	–	19	7,03

Brasil. As amostras do RPP coletadas foram secas em estufa a uma temperatura de 100°C, durante 24 horas, moídas por um moinho de bolas durante 3 horas, peneiradas em 0,075 mm (#200) e armazenadas em tonéis vedados. O superplastificante utilizado na produção do concreto é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado, chamado (Glenium 51 Basf), com densidade de 1,07 a 1,1, g/cm³ e teor de sólidos de 28,5% a 31,5%. Os agregados utilizados foram brita (0/19 mm) e areia (0/4,8 mm), que foram previamente peneirados e secos em estufa a uma temperatura de 100°C, por 24 horas antes do uso. As propriedades físicas e a curva de distribuição do tamanho das partículas dos materiais em questão podem ser observadas, respectivamente, na Tabela 1 e Figura 1. Pode-se observar, na Tabela 1, que o RPP possui uma menor massa específica real que o cimento, maior área específica superficial pelo método BET (*Braunauer-Emmet-Teller*), demandando mais água no sistema, e menor diâmetro médio.

A composição química do resíduo do polimento do porcelanato (RPP) é apresentada na Tabela 2, onde pode-se observar que ele é composto em maiores concentrações de SiO_2, Al_2O_3 e MgO, sendo esse último oriundo do abrasivo usado no processo de polimento.

O difratograma de raios X do RPP é apresentado na Figura 2, em que os resultados mostram que o RPP possui algumas fases cristalinas: quartzo (21°, 39°, 41°, 46°, 50° e 55°), mulita (17°, 26°, 31°, 35°, 42° e 58°), carbeto de silício (34°, 37° e 60°) e óxido de magnésio (38°). A presença da mulita e do quartzo é decorrente da massa do porcelanato, já o carbeto de silício e o óxido de magnésio são derivados do agente abrasivo utilizado no processo do polimento do porcelanato. Além

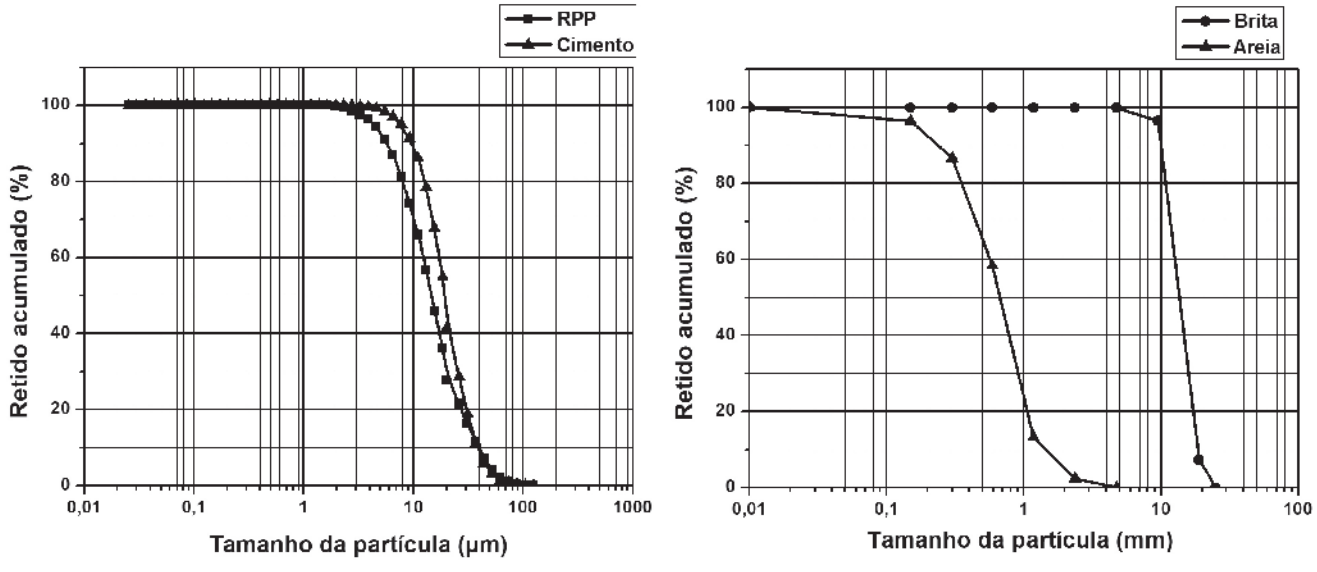


Figura 1
Curva de distribuição das partículas dos materiais utilizados

▶ Tabela 2 – Composição química do RPP

Óxidos (%)	SiO_2	Al_2O_3	MgO	K_2O	CaO	Fe_2O_3	TiO_2	Outros
RPP	64,32	19,23	10,32	2,81	1,71	0,94	0,32	0,35

disso, ainda na Figura 2, identifica-se um halo amorfo bem alongado e mais acentuado na região de 20° a 30°, indicando que, a depender da composição química dessa fase amorfa, o material poderia ter reatividade.

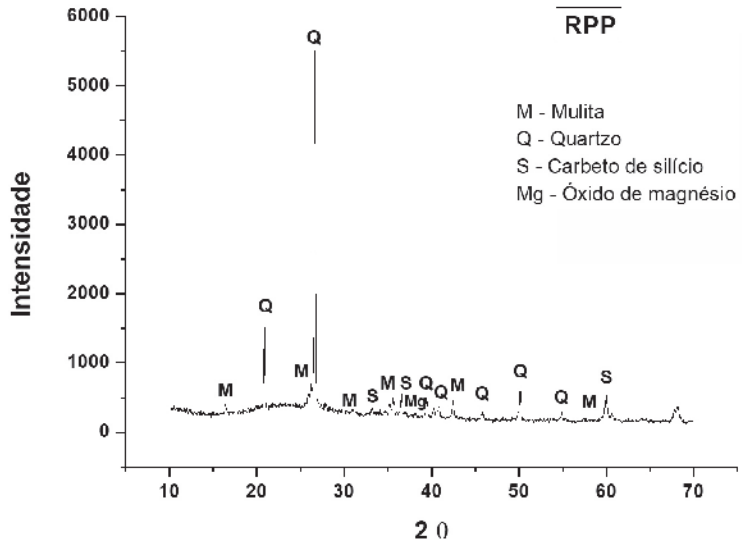
Com relação ao índice de atividade pozolânica (IAP) do resíduo do polimento do porcelanato, foi obtido conforme orientado pela ABNT NBR 5752 (2014), chegando-se a um IAP igual a 79,80%. Assim, o RPP não foi classificado como pozolânico, pois o IAP mínimo para classificar o material como pozolânico é de 90%.

2.2 Método de dosagem do concreto e traços utilizados

O concreto foi dosado de acordo com o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), conforme Rodrigues (1998). O método da ABCP é baseado no método da *American Concrete Institute* (ACI) 211, sendo adaptado às características do Brasil.

Na determinação do traço padrão, a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) adotada foi de 30 MPa. Por fim, outro parâmetro estabelecido foi o abatimento do tronco de cone entre 40 e 60 mm.

De posse dos parâmetros pré-estabelecidos para o concreto e caracterização dos materiais, determinou-se o traço de referência (Ref.), com relação a massa do cimento, que foi 1:1,94:2,62:0,5 (cimento:areia:brita:a/c), tendo consumo de cimento igual a 390 Kg/m³. Para manter o consumo de cimento constante, a fim de avaliar a influência real do RPP, a quantidade de areia foi alterada de acordo com cada mistura. Foi utilizado superplastificante nas misturas, pois o RPP possui alta área superficial específica e, consequentemente, ocasiona a diminuição da fluidez do concreto. Logo, como não foi alterada a relação água/cimento, utilizou-se 1% de superplastificante (SP) em relação à massa de cimento para todos os traços, para manutenção do intervalo de abatimento adotado. O RPP foi utilizado como adição em teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% com relação a massa de cimento. Todos os traços utilizados estão apresentados na Tabela 3.



▶ **Figura 2**
Fases cristalinas do RPP

2.3 Preparo do concreto

Com os traços definidos (Tabela 3), foram confeccionados os corpos de prova cilíndricos de concreto de 100 x 200 mm. O procedimento da mistura foi realizado seguindo esta ordem: 50% de água (superplastificante já diluído), 100% de brita, 100% de areia, 100% do cimento, 100% de RPP (na proporção definida para cada mistura) e os outros 50% da água. O concreto foi adensado mecanicamente em uma única camada, com o auxílio do vibrador de imersão. Após 24 horas da moldagem, as amostras foram desmoldadas e imersas imediatamente em água até o dia do ensaio.

2.4 Ensaios realizados

Para avaliar o abatimento de CO_2 dos concretos, foram determinados a resistência à compressão, índice de

▶ **Tabela 3 – Traços de concreto utilizados com consumo de cimento de 390 kg/m³**

Traços	Cimento	Areia	Brita	RPP	Relação água/cimento	Superplastificante
Referência	1,00	1.94	2,62	0,00	0,50	0,01
A10	1,00	1,84	2,62	0,10	0,50	0,01
A20	1,00	1,73	2,62	0,20	0,50	0,01
A30	1,00	1,63	2,62	0,30	0,50	0,01
A40	1,00	1,53	2,62	0,40	0,50	0,01
A50	1,00	1,42	2,62	0,50	0,50	0,01

intensidade do cimento (IIC) e potencial de aquecimento global (PAG).

2.4.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739 (2007), nas idades de 7 e 28 dias.

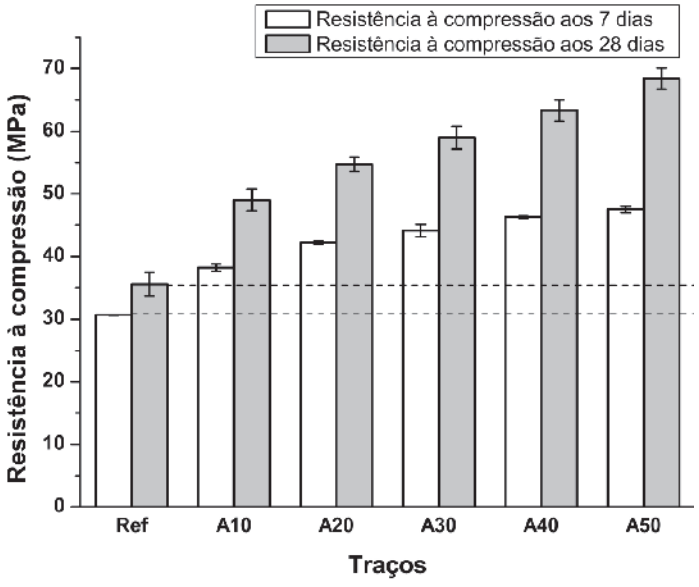
2.4.2 Índice de intensidade do cimento (IIC)

O índice de intensidade do cimento (IIC) é uma adaptação do índice de intensidade de ligante (IB) proposto por Damineli *et al*. (2010); pois, segundo autores como Matos *et al*. (2018), nem todas as adições são classificadas como pozolânicas; portanto, não são ligantes. Sendo assim, é indicado optar pela determinação do IIC, que corresponde ao consumo de cimento por m³ de concreto para atingir 1 MPa de resistência à compressão; ou seja, o IIC é a razão do consumo de cimento utilizado pela resistência à compressão obtida.

2.4.3 Potencial de aquecimento global (PAG)

Essa análise foi realizada considerando a resistência à compressão média do traço de referência aos 28 dias. Com base no IIC obtido na análise anterior aos 28 dias, uma simulação dos consumos de cimento e dos demais materiais constituintes do concreto foi realizada para cada traço, a fim de atingir a resistência à compressão requerida (resistência à compressão média do concreto de referência). Em seguida, foi estimado o potencial de aquecimento global (PAG) para cada mistura, obtida pela soma das emissões equivalentes de CO_2 relacionadas aos constituintes (cimento Portland, agregados miúdo, agregado graúdo, RPP e superplastificante) e ao processo de produção de concreto (mistura, transporte e lançamento).

Os valores adotados de emissões equivalentes de CO_2 por kg de material (para os constituintes) e por m³ de concreto (para o processamento) são: cimento Portland = 1,0, superplastificante = 0,5, agregado miúdo = 0,014, agregado graúdo = 0,046 e mistura + transporte + lançamento = 1,5. Para o RPP, foi adotada uma emissão equivalente de 0,05 kg CO_2-eq/kg, que corresponde à energia utilizada para secar o material (MATOS *et al*., 2018).



▶ **Figura 3**
Resultado da resistência à compressão

▶ Tabela 4 – Valores da resistência à compressão

Traços	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	Desvio padrão	28 dias	Desvio padrão
Ref.	30,68	0,06	35,59	1,91
A10	38,21	0,57	49,00	1,73
A20	42,22	0,29	54,73	1,14
A30	44,14	0,97	58,96	1,82
A40	46,32	0,22	63,31	1,72
A50	47,53	0,53	68,40	1,64

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

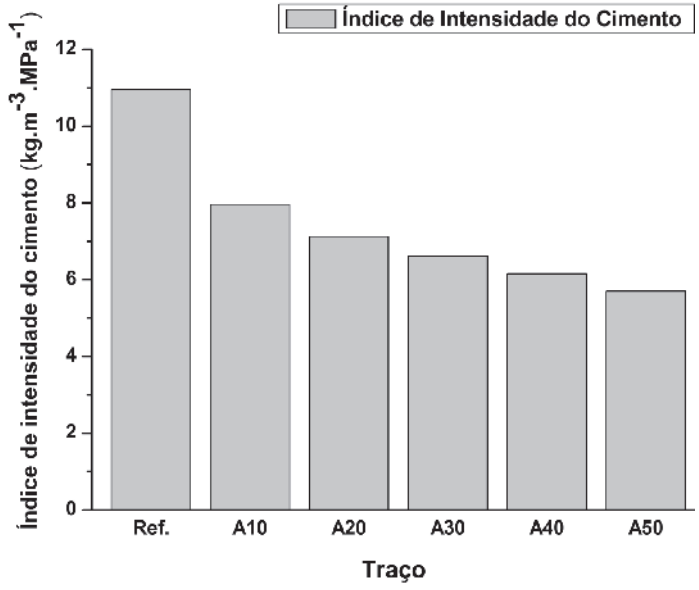
3.1 Resistência à compressão

Conforme observado na Figura 3 e Tabela 4, os concretos com adição do resíduo do polimento do porcelanato (RPP) tiveram resistências superior ao de referência, sendo maiores à medida que se aumentou a adição do RPP.

A adição de RPP no concreto contribuiu para um aumento de resistência média à compressão aos 7 dias de 24,52% para 10% de RPP (A10); 37,59% para A20; 43,85% para A30; 50,98% para A40; e 54,95% para A50. Já aos 28 dias, o aumento da resistência foi ainda mais expressivo com relação ao de referência, sendo 37,69% para A10; 53,79% para A20; 65,69% para A30; 77,89% para A40; e 92,22% para A50.

Esse comportamento era esperado, pois não houve diminuição do consumo de cimento por metro cúbico de concreto e a relação a/c foi mantida constante. Mostra-se, assim, o efeito fíler do RPP, comprovando seu potencial como material de enchimento, aumentando a compacidade e diminuindo os vazios do concreto. Ganho de resistência à compressão em concreto com incorporação do RPP também foi evidenciado no trabalho de Matos *et al.* (2018).

Outro fator positivo para esse aumento de resistência nos traços com altos teores de RPP foi a atuação do superplastificante, pois ele provavelmente contribuiu para uma melhor dispersão das partículas de RPP, evitando com que elas se aglomerassem e conservando a trabalhabilidade do concreto.



▶ **Figura 4**
Resultados do índice de intensidade do cimento

3.2 Índice de intensidade do cimento (IIC)

Os valores obtidos do índice de intensidade do cimento (IIC), de cada traço aos 28 dias, são apresentados na Figura 4.

Nos traços com adição foi observado que com o aumento gradual do teor de RPP, aumentou a eficiência ambiental do cimento, ou seja, resultou na redução do IIC do traço de referência (10,96 $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$). Essa redução foi de 27,37% para A10; 34,97% para A20; 39,65% para A30; 43,79% para A40; e 47,98% para A50. Como o consumo de cimento foi constante e, à medida que adicionou-se o RPP no concreto, a resistência aumentou; logo, os valores do índice de intensidade do cimento foram inversamente proporcionais aos valores da resistência à compressão.

Segundo Matos *et al.* (2018), o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) apresenta um bom desempenho em matrizes cimentícias, comprovando-se através dos valores de IIC. Destaca-se que o índice de intensidade do cimento obtido para o concreto A50 (5,70 $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$) ficou próximo de 5,0 $Kg.m^{-3}.MPa^{-1}$, que é um IIC considerado eficiente para concretos de alta resistência (DAMINELI *et al.*, 2010).

3.3 Potencial de aquecimento global (PAG)

Para determinação do potencial de

▶ Tabela 5 – Resultados do potencial de aquecimento global

Traço	IIC ($kg.m^3.MPa^{-1}$)	Cimento (kg/m^3)	RPP (kg/m^3)	Areia (kg/m^3)	Brita (kg/m^3)	SP (kg/m^3)	PAG (CO_2-eq/m^3 de concreto)	Redução
Ref.	10,96	390,00	0,00	757,69	1021,20	3,90	451,03	0,00%
A10	7,96	283,25	28,33	520,80	741,69	2,83	328,99	-27,06%
A20	7,13	253,60	50,72	439,86	664,04	2,54	295,61	-34,46%
A30	6,61	235,38	70,61	383,74	616,34	2,35	275,31	-38,96%
A40	6,16	219,24	87,70	334,58	574,07	2,19	257,31	-42,95%
A50	5,70	202,89	101,45	288,50	531,27	2,03	238,96	-47,02%

aquecimento global (PAG), consideraram-se a resistência à compressão de 35,59 MPa, que corresponde à média da resistência à compressão do concreto de referência aos 28 dias, e o IIC obtido na análise anterior. Os valores do potencial de aquecimento global (PAG) para todos os traços são expostos na Tabela 5.

Os resultados mostram o consumo de materiais de cada traço para obter uma resistência à compressão de 35,59 MPa. Observa-se que o valor do IIC é proporcional ao consumo de cimento, visto que a resistência requerida era constante para todos os traços. Logo, os traços com menores IIC obtiveram menores consumos de cimento.

Como o cimento possui maior emissão equivalente de CO_2 entre os constituintes do concreto, consequentemente, menores serão os valores de potencial de aquecimento global (PAG) para os traços com menores consumos desse material. Além da redução do consumo de cimento, outros fatores que contribuíram para a redução do PAG, nos traços com adição, foi a redução do consumo de areia, brita e superplastificante, sendo o último dosado com relação à massa do cimento.

Conforme a Tabela 5, foi observado que os traços com adição apresentaram altas reduções de PAG, obtendo-se até 47,02% de redução para o A50. Com isso, o uso de RPP é uma solução satisfatória do ponto de vista ambiental, além de melhorar algumas propriedades do concreto como a resistência à compressão. Resultado semelhante, também, foi observado por Matos *et al.* (2018), em que se constatou que a incorporação do resíduo do polimento do porcelanato reduz o potencial de aquecimento global.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou a influência da adição do resíduo do polimento do porcelanato (RPP) para produzir concretos sustentáveis e avaliar o abatimento de CO_2. Com base nos resultados apresentados neste trabalho, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

- A resistência à compressão aos 28 dias foi aumentando à proporção que aumentou o teor de adição de RPP na mistura, atingindo uma resistência média à compressão de 68,41 MPa para A50 (50% de adição de RPP), enquanto o concreto de referência atingiu 35,59 MPa;
- Com relação ao índice de intensidade do cimento (IIC), à medida que foi adicionado o RPP, os valores do IIC foram menores, atingindo 5,70 $kg.m^{-3}.MPa^{-1}$ para A50, valor próximo do IIC de concretos de alta resistência;
- Para uma resistência à compressão de 35,59 MPa aos 28 dias, o uso de RPP reduziu a emissão de CO_2 equivalente de 451,03 kg CO_2-eq/m^3 de concreto (REF) para 238,96 kg CO_2-eq/m^3 de concreto (A50), demonstrando que o uso do RPP é uma solução satisfatória do ponto de vista ambiental.

Os resultados permitem concluir que o resíduo de polimento de porcelanato apresenta viabilidade técnica como adição para a produção de concretos sustentáveis e resistentes, e pode constituir uma alternativa de disposição ambiental correta do resíduo, contribuindo para o desenvolvimento da construção ecoeficiente.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

[3] DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. Cement and Concrete Composites, v. 32, 2010.

[4] MATOS, P.R.; PRUDÊNCIO JR., L. R.; OLIVEIRA, A. L.; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete. Construction and Building Materials, v. 193, p. 623–630, 2018.

[5] RODRIGUES, P. P. F. Parâmetros de dosagem de concreto. ET-67. 3 ed. São Paulo: IBRACON – Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

Perspectivas de novos tipos de ligantes com menor intensidade de carbono

MARIA ALBA CINCOTTO

Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Construção Civil

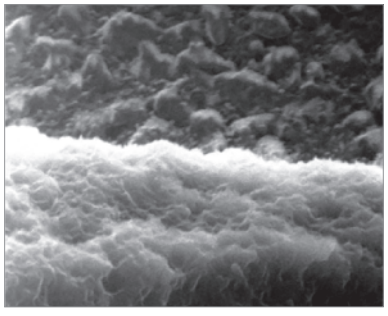
I. INTRODUÇÃO

O *ICCC – International Congress on the Chemistry of Cements*, que se realiza a cada quatro anos, traz revisões dos avanços realizados nesse intervalo de tempo nos temas de maior destaque. Neste XVth ICCC, que se realizará em setembro de 2019, em Praga, Caijun Shi, Bo Qu e John Provis trazem uma revisão dos "Recentes progressos em ligantes de baixo carbono" (SHI, QU e PROVIS, 2019), a partir de 379 referências consultadas, com dados sobre as propriedades fundamentais dos ligantes álcali-ativados, ligantes carbonatados, belita-sulfoaluminato de cálcio, belita-sulfoaluminato de cálcio-ferrita, belita-alita-sulfoaluminato de cálcio: propriedades reológicas, comportamento na pega, caracterização estrutural, estabilidade dimensional, durabilidade, sob a abordagem de ciência dos materiais, e aplicações. Outras séries de cimentos alternativos estão baseadas no hidrosilicato de cálcio, proposto por Garbev e colaboradores (2014), e os cimentos à base de compostos dea magnésio, resumidos na publicação de Walling e Provis (2016), que reúne dados de 402 referências (WALLING e PROVIS, 2016).

Todas essas publicações tratam da produção desses cimentos e das propriedades na hidratação, em sistemas contendo materiais cimentícios suplementares, como a cinza volante e a escória de alto-forno. Apesar do grande esforço na pesquisa, são muitas as lacunas do conhecimento sobre o desempenho e, principalmente, sobre a durabilidade dos sistemas deles derivados.

O assunto é muito amplo e não se trata de apresentar neste texto o estado da arte sobre o conhecimento dos cimentos alternativos, mas um resumo das informações constantes das referências citadas, do processo de produção e características relevantes de cada um.

Cortesia da Elsevier Ed.



▶ **Figura 1**
Micrografia obtida em Microscópio de íons de hélio (MIH) de uma partícula de escória de alto-forno coberta por um gel tipo-folha do silicoaluminato de cálcio e sódio (C-(N)-A-S-H)

2. CIMENTOS ÁLCALI-ATIVADOS (AAM)[1]

A proposta de produzir cimento álcali-ativado advém da possibilidade de reciclar materiais residuais sílico-aluminosos solúveis em meio fortemente alcalino, a saber, resíduos de termoelétricas (cinza volante e cinza de grelha), escória de alto-forno, escórias siderúrgicas, metacaulim e resíduos de concreto. Interagem com ativadores como solução de hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), silicatos alcalinos, carbonatos alcalinos. O produto de reação é um gel, com estrutura semelhante a um polímero termofixo, sendo denominados polímeros inorgânicos ou geopolímeros.

Um hidrato característico dos geopolímeros é a sodalita ilustrada na Figura 1 e na Figura 2, uma imagem 3D de uma seção polimerizada.

O desempenho é muito dependente dos hidratos formados, resultantes da composição química do resíduo de

[1] Referenciada do trabalho de Shi, Qu e Provis (2019).

origem, da concentração dos ativadores, do teor de cálcio no sistema em reação e do teor de água na aplicação. Embora muitos estudos tenham sido publicados, os efeitos da composição da matéria-prima sobre a cinética de reação e os seus produtos ainda não são completamente compreendidos, o que dificulta prever um modelo de hidratação e as fases que se formarão; a sua caracterização é um desafio porque as matérias-primas e o gel formado são amorfos ou mal cristalizados. Como desvantagens, está o fato de a solução de ativação ser fortemente alcalina, em alguns casos, o lento ganho de resistência.

A caracterização desses cimentos é um desafio, abrangendo: determinação das propriedades reológicas, fixação da consistência e trabalhabilidade, tempo de pega, condições de mistura de modo a evitar o fenômeno de tixotropia, o efeito de aditivos e a comprovação da durabilidade. A padronização e a especificação é também um desafio, pois é quase impossível estabelecer parâmetros de qualidade que abranjam, principalmente, a ampla variedade de ativadores potenciais e seus efeitos. Por outro lado, do mesmo modo que para a ampla gama de materiais cimentícios suplementares, a complexidade desse cimento tem sido um campo fértil para introdução de novas técnicas de caracterização, além das técnicas de ciência dos materiais mais comuns.

Com relação às matérias-primas mais empregadas, há que se preceder o estudo do levantamento da sua disponibilidade. O que se pode comentar, por exemplo, sobre a escória de alto-forno e a cinza volante é que têm emprego definido, totalmente consumidas pela indústria de cimento, e é questionável abrir-se mais uma frente de exploração dessas matérias-primas no país em aplicação como geopolímero.

Cortesia da Elsevier Ed.

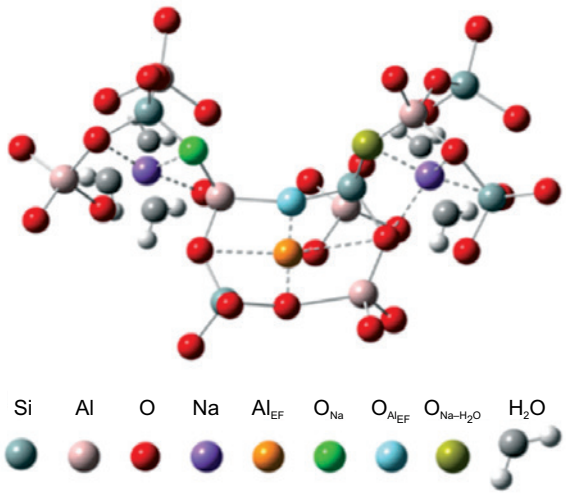


Figura 2
Representação 3D de uma seção polimerizada do gel de sodalita – sílicoaluminato de sódio (N-A-S-H)

Sendo esse cimento muito sensível a diferentes teores de água, torna difícil generalizar a tecnologia de aplicação em concreto, principalmente considerando que os agregados são empregados úmidos, em diferentes teores, o que dificulta o controle de qualidade do concreto. O custo do seu emprego não está disponível, mas alguns estudos revelam que é superior ao do cimento Portland (CSI, 2017).

Os impactos ambientais decorrentes do uso dos ativadores químicos alcalinos são significativos, não podendo ser negligenciados, assim como a segurança em obra na sua aplicação prática.

Internacionalmente, têm sido comercializados em pequenas indústrias, não sendo ainda utilizados em larga escala, até pela própria dificuldade ligada à disponibilidade de cinza volante e escória de alto-forno, e, também, pelo fato de os problemas de durabilidade não terem sido suficientemente resolvidos.

3. LIGANTES CARBONATADOS

O interesse neste tipo de ligante é recente. A sua utilização está baseada no endurecimento resultante da carbonatação de fases do ligante, com desenvolvimento rápido da resistência e sequestro do CO_2 ambiente (SHI, QU e PROVIS, 2019). Essa técnica foi aplicada ao silicato de cálcio, ao cimento Portland, ao cimento à base de óxido de magnésio (MgO) e a ligantes derivados de materiais residuais. Esses quatro ligantes reagem com a água e CO_2, produzindo materiais cimentantes resistentes.

3.1 Silicatos de cálcio carbonatados (CSC)

São os cimentos CSC, cimentos de silicato de cálcio, não hidráulicos, que endurecem por carbonatação. Os silicatos C_3S[2], β- e γ-silicato dicálcico, e

[2] Em química do cimento são empregadas as seguintes abreviações: S = SiO_2; C = CaO; H = H_2O; N = Na_2O.

Cortesia da Elsevier Ed.

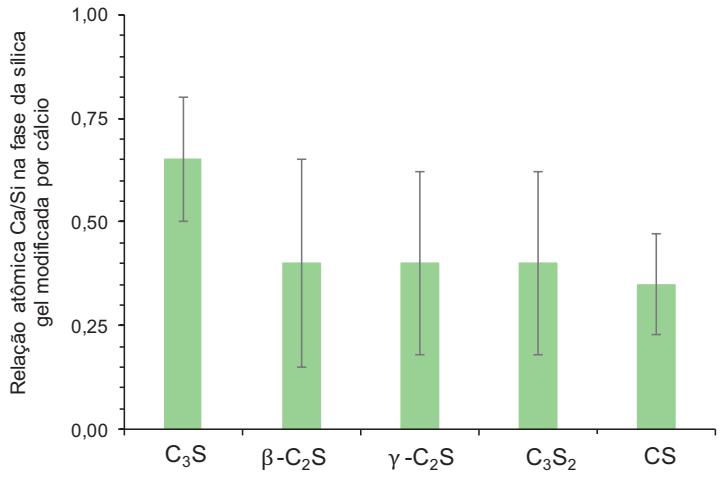


Figura 3
Relações atômicas médias da fase sílica gel modificada por cálcio durante a carbonatação de diferentes silicatos de cálcio

dissilicato tricálcico (C_2S_3) formam matrizes monolíticas resistentes. A carbonatação do silicato de cálcio puro consiste de um processo em duas etapas: um processo inicial de carbonatação superficial, seguida de um processo de difusão controlada do CO_2, formando uma camada de carbonato. A taxa constante de reação varia com o tipo de silicato, na seguinte ordem decrescente: β-C_2S > C_3S> γ-C_2S> C_2S_3 > CS. Os produtos formados do silicato de cálcio puro são a sílica gel modificada pelo cálcio, sílica gel, e as formas polimórficas do carbonato de cálcio (calcita, aragonita) e vaterita amorfa. Quanto ao módulo de elasticidade do ligante rico em carbonato, os valores podem variar numa faixa ampla em função da presença das diferentes formas de carbonato formado. O grau de polimerização da sílica gel modificada por cálcio é a mesma para todos, definido pela relação Ca/Si, um pouco maior para o cimento produzido a partir do C3S (Figura 3). Todavia, o grau de carbonatação é o mesmo para todos, devido ao retardo que ocorre após a formação do mesmo teor de CaCO3 na superfície das partículas potencialmente ativas, por efeito de bloqueio do precipitado formado (Figura 4 e 5).

Cortesia da Elsevier Ed.

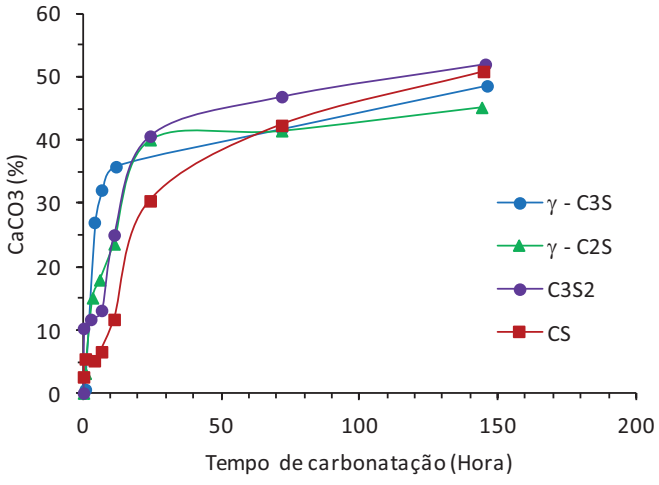


Figura 4
Grau de carbonatação, % em massa de diferentes silicatos de cálcio, em função do tempo de carbonatação

O interesse tem-se concentrado sobre o C_2S por ser obtido em temperatura de síntese mais baixa. O tempo de carbonatação é de 2 horas; foi determinado que o β-C_2S e o γ-C_2S absorvem 9,2% e 18,3% de CO_2 do valor teórico, mas o β-C_2S apresenta o dobro da resistência à compressão do γ-C_2S. A Figura 5 é uma proposta da sequência de reações de hidratação e carbonatação da partícula de γ-C_2S.

Ashraf et al (2019) analisaram o CSC produzido segundo a patente US 92 16926 B2 (RIMAN et al 2015), constituído principalmente de wollastonita e pseudowolastonita (CS), rankinita (C_2S_3) e belita. A síntese é realizada a 1200 °C, portanto cerca de 250 °C abaixo da temperatura de formação do C_3S. Sendo um cimento de baixo consumo de cálcio, tem a vantagem de consumir um teor de calcita para a síntese inferior ao da produção de alita e belita, além do fato de requerer menor consumo energético. Esses cimentos não são hidráulicos, mas endurecem por carbonatação, a qual pode atingir, no máximo, 40% em massa da pasta. Ao redor de 30% de carbonatação forma-se C-S-H e, prosseguindo, forma-se uma sílica gel modificada por cálcio, com elevado grau de polimerização. A resistência à compressão atinge 30-40 MPa para relação a/c na faixa de

Cortesia da Elsevier Ed.

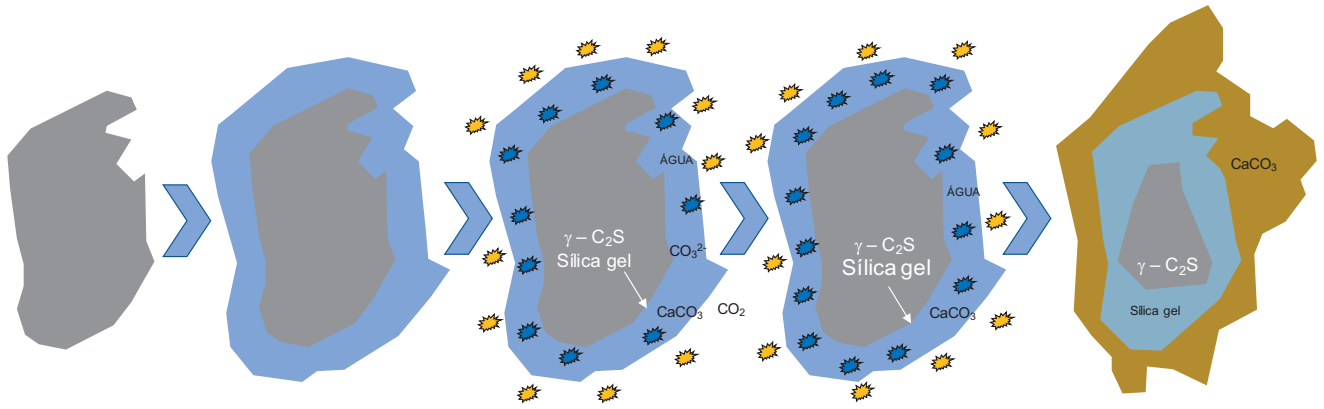


Figura 5
Um diagrama-modelo da carbonatação de uma partícula de γ-C2S

0,4-0,5. No endurecimento armazena 18% de CO_2, em massa, da matriz carbonatada. A fração não carbonatada, da ordem de 20%, contém quartzo, anortita e melilita (akermanita e gelenita).

3.2 Cimento Portland carbonatado

É sabido que a carbonatação acelerada das primeiras idades do cimento Portland resulta em elevada resistência e baixa permeabilidade, em consequência à formação de carbonatos que ocupam maior espaço do que a portlandita liberada na hidratação ($Ca(OH)_2$). Foi sugerido o pré-condicionamento da pasta hidratada para otimizar a carbonatação acelerada. A resistência à compressão do concreto carbonatado em 2 horas após o pré-condicionamento é semelhante à do concreto curado a vapor por 24 horas. O ambiente durante o pré-condicionamento tem maior efeito sobre a eficiência da cura com CO_2. A temperatura aumenta rapidamente até 70 °C logo que é exposto ao CO_2 nos primeiros 15-20 minutos, diminuindo gradativamente em seguida. Com o cimento para poços de petróleo, a precipitação inicial é de carbonato amorfo cristalizando a calcita após 24 horas. O grau de carbonatação é determinado por termogravimetria; sendo mal cristalizado, formado a partir do C-S-H, decompõe-se em temperatura abaixo de 600 °C, enquanto o carbonato natural se decompõe entre 600 °C e 950 °C. O cimento Portland carbonatado é fortemente descalcificado pela formação do $CaCO_3$; do C-S-H forma-se sílica gel modificada pelo cálcio observado pela ressonância nuclear magnética (RNM). Esse tipo de cimento apresenta restrição de uso em concretos armado e protendido, pois a carbonatação leva à perda de passivação das armaduras.

4. CIMENTOS À BASE DE SULFOALUMINATO DE CÁLCIO (CSA) [3]

4.1 Ye'elimita (SHI, QU e PROVIS, 2019)

O clínquer de sulfoaluminato de cálcio (ye`elimita) é produzido a partir de calcário, bauxita e sulfato de cálcio. A vantagem da sua produção é a baixa emissão de CO_2 e menor consumo de energia. Comparativamente à alita, que emite 0,578 kg CO_2/kg dessa fase, quando produzido a partir de calcita e sílica, o sulfoaluminato de cálcio emite somente 0,216 kg CO_2/kg da fase cimentante, quando produzido a partir de calcário-alumina-anidrita. A temperatura de clinquerização também é mais baixa, entre 1250°C e 1350°C. Os cimentos de sulfoaluminato de cálcio ($C_3A.3CaSO_4$) são constituídos de 30-70% pelo mineral ye'elimita com anidrita ou gipsita. A adição do sulfato tem a finalidade de acelerar a hidratação, muito lenta nas primeiras 10 horas. Reage imediatamente com a água e contribui para o desenvolvimento da resistência mecânica inicial, formando como fases principais etringita, monossulfoaluminato e a fase amorfa hidróxido de alumínio (AH_3). Sequencialmente, na Figura 6, que ilustra a hidratação, não se distinguem cristais de etringita e de monossulfato.

A relação quantitativa entre os produtos de hidratação é determinada pelo teor de sulfato na mistura:

– formação do monossulfoaluminato de cálcio:

$$C_3A.3CaSO_4 + 18H \rightarrow C_3A.3CaSO_4.12H + AH_3 \quad (1)$$

[3] Referenciado por Ye'elimita (SHI, QU e PROVIS, 2019).

Cortesia da Elsevier Ed.

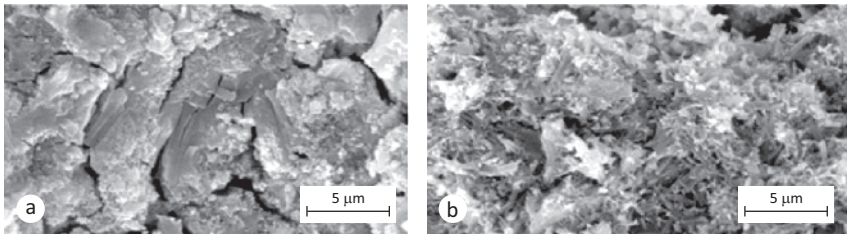


Figura 6
(a) Micrografia do CSA após 7 dias de hidratação, observando-se forte retração (82% de clínquer de sulfoaluminato de cálcio e 18% de sulfato de cálcio);
(b) Micrografia do cimento Portland e sulfoaluminato de cálcio e sulfato de cálcio (53%:35%:12%) a 1 dia de hidratação, observando-se intensa formação de cristais de etringita (GASTALDI et al., 2016)

– formação da etringita:

$C_3A.3CaSO_4 + 2\ CaSO_4 + 34H \rightarrow C_3A.3CaSO_4.32H + 2AH_3$ (2)

Outras vantagens apregoadas sobre o cimento Portland são o ganho rápido de resistência e a capacidade dos produtos de hidratação reter metais pesados. Como desvantagens, tem retração química de 11 cm^3/g após 28 dias, enquanto a do cimento Portland é 4-5 cm^3/g; sendo o produto de hidratação principal formado a etringita, a relação a/c é elevada, igual a 0,6; sofre retração por auto-secagem (retração autógena) quando empregada uma relação a/c baixa, na faixa de 0,30-0,45.

Os desafios que a produção desse ligante enfrenta são o custo da bauxita, o desconhecimento da formação das fases e sua modelagem termodinâmica, evolução das propriedades para materiais com composição variada e o desconhecimento da durabilidade a longa idade.

4.2 Cimento à base de belita + sulfoaluminato + ferrita (I, 6)

Uma vez que o C_3S é o responsável pelo maior consumo de cálcio e, consequentemente, o responsável pela maior contribuição para a emissão de CO_2, foi proposta a produção de clínquer belítico com teor de C_2S maior do que o de C_3S, mais reativo do que o presente no clínquer Portland. As características de produção são: fator de saturação de cal na faixa de 0,78-0,83, módulo de sílica na faixa de 2,75-3,50, baixo teor de cal livre, e temperatura de clinquerização 50-100°C mais baixa. A vantagem é a utilização de calcário de menor pureza, do tipo marga, e adições de fluorita (CaF_2), anidrita ($CaSO_4$), óxido de bário (BaO), óxido de crômio-III (Cr_2O_3), álcalis (Na e K) etc. para estabilizar a fase reativa; os cristais de belita são de pequena dimensão; moída a 320 m^2/kg, atinge resistência inicial de 16 – 22 MPa aos 3 dias e 50 – 60 MPa aos 28 dias.

Com adição de 1% de B_2O_3 como mineralizador, resfriamento rápido (1000 °C/min no intervalo de temperatura de 1300-900 °C), o β-C_2S é mais reativo do que contendo 1,0% de Cr_2O_3. É produzido na China, Alemanha, Japão, Polônia e Rússia. A redução potencial de CO_2 é de 10%.

Tem a desvantagem de ser mais duro na moagem, e de difícil recuperação de calor no resfriamento; em tecnologia de concreto, o teor de álcalis é uma grande desvantagem; apresentam uma microestrutura mais densa, pela ausência da portlandita, elevada resistência a longas idades, mas com desenvolvimento lento, portanto, em aplicações muito específicas, e muito limitado em aplicação em larga escala (ASHRAF et al, 2019)

O cimento belita-ye'elimita-ferrita (BYF) também conhecido como cimento sulfobelítico, se caracteriza por ter como fase principal a belita (45-70%) com ye'elimita (20-45%). A vantagem deste cimento é empregar matéria-prima de alumínio de mais baixa pureza, de mais baixo custo. O interesse no seu emprego foi favorecido pelo conhecimento do controle cuidadoso da reologia e do tempo de pega, e se conseguir maior reatividade da belita, a qual contribui com maior aumento posterior na resistência.

5. CIMENTOS À BASE DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO [4]

O interesse acadêmico e comercial atual foi motivado pelo nível de consumo de energia, se produzido pela decomposição térmica do carbonato de magnésio, mais baixo do que o da obtenção do CaO pela decomposição térmica do carbonato de cálcio. É um cimento que endurece por carbonatação, com consumo de CO_2, ao longo do seu ciclo de vida, quase no nível emitido na produção, um provável "cimento neutro em carbono". A produção inicial foi motivada pela disponibilidade de salmouras ricas em magnésio – Great Salt Lake (Utah), lagos chineses salgados (Qinghai, Xinjiang e

[4] Referenciado por Garbev et al, 2014 e Shi, Qu e Provis (2019).

Tibet) e o Mar Morto (Israel/Jordânia). A produção pela calcinação da magnesita está limitada a algumas regiões geográficas das jazidas. Quanto às jazidas, a China, Coréia do Norte e Rússia acumulam mais de 65% da reserva mundial; a participação brasileira é de 7%, com a jazida situada na Serra das Éguas, Brumado-BA. Embora esses cimentos sejam estudados há 150 anos, requerem atualização de conhecimento quanto à durabilidade a longo prazo e custo/eficiência se pretendidos para aplicação em larga escala.

Outro particular ligado a esses cimentos é que, de um lado, são indicados para aplicações muito especiais, mas não em concreto armado por não propiciarem o meio de alcalinidade elevada de proteção da armadura, citando-se construção em pré-moldados, reparo de rodovias, imobilização de resíduos nucleares, e, por outro lado, de custo de produção superior ao do cimento Portland e na obtenção de fontes reativas de MgO. Pelas exigências de sustentabilidade, a sua utilização voltou a ser enfocada, disponibilizando novos resultados sobre esses ligantes, resumidos por Wallings e Provis (2016).

Não está ainda demonstrado que os cimentos de magnésia reativa tenham ótimo desempenho sob condições ambientais, pois requerem a produção de materiais ou estruturas porosas, controle de umidade interna, níveis elevados de CO_2, que garantam a formação das fases de carbonato de magnésio ligantes.

5.1 Obtenção do MgO

O MgO, denominado magnésia ou periclásio, não é obtido por mineração, por ser quase raro na natureza, enquanto o $Mg(OH)_2$, a brucita, formada do óxido por hidratação, ocorre também em um número limitado de formações geológicas. Um dos processos de produção é por via seca, pela calcinação da magnesita,(Figura 7), em temperatura acima de 600°C (equação 3).

A obtenção de MgO de elevada pureza requer a seleção da jazida rica em magnesita, ou eliminação de impurezas como o Fe_2O_3 e sílica (SiO_2).

$$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 \quad (3)$$

Outro processo é a obtenção por via úmida, pela precipitação do hidróxido ($Mg(OH)_2$) de salmouras ricas em magnésio ou de água de mar. É um processo complexo, de alto custo por incluir as etapas de separação por precipitação como hidróxido, filtração, lavagem e calcinação para se obter o óxido (equações 4, 5 e 6):

$$MgCl_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCl_2 + Mg(OH)_2 \quad (4)$$

$$MgCl_2 + CaO.MgO(OH)_4 \rightarrow CaCl_2 + 2\,Mg(OH)_2 \quad (5)$$

$$Mg(OH)_2 \rightarrow MgO + H_2O \quad (6)$$

Por via úmida, o MgO é obtido também por pirólise do cloreto de magnésio em vapor superaquecido, isto é, a ~1000°C:

$$MgCl_2.6\,H_2O \rightarrow MgO + 2HCl + 5H_2O \quad (7)$$

A reatividade do MgO obtido por processos de calcinação vai depender da temperatura, selecionada pela finalidade de emprego, pois, com o aumento do tempo de residência ou da temperatura, aumenta o tamanho do cristalito, há sinterização e diminuição da reatividade.

5.2 Cimentos à base de carbonato de magnésio e de magnésia reativa

A formação do carbonato de magnésio é simplesmente descrita como reação com o CO_2, formando o carbonato de magnésio (Equação 8) ou pela incorporação de água de cristalização, formando a nesquehonita (Equação 9):

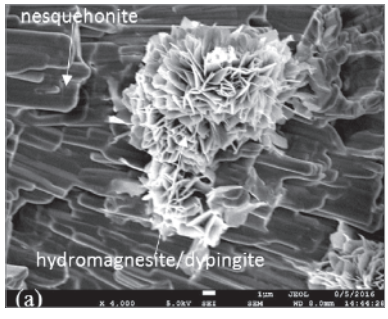
HTTPS://WWW.CRISTAISDECURVELO.COM.BR/PAGES/MAGNESITA-APRENDA-MAIS-SOBRE-ESTE-MINERAL.HTML

Figura 7
Cristal de magnesita com uvita

$$MgO + CO_2 \rightarrow MgCO_3 \quad (8)$$

$$Mg(OH)_2 + CO_2 + 2H_2O \rightarrow MgCO_3.3H_2O \quad (9)$$

O emprego de MgO reativo com cimento Portland data das últimas décadas. A carbonatação de cimentos ricos em magnésia aumenta a resistência à compressão desses sistemas, atribuída à densificação pela formação da nesquehonita, dipingita ($Mg_5(CO_3)_4(OH)_2.5H_2O$) e artinita ($Mg_2(OH)_2CO_3.3H_2O$) ilustradas na Figura 8.



Cortesia da Elsevier Ed.

Figura 8
Micrografia ilustrando a formação da nesquehonita ao lado da hidromagnesita e dipingita

5.2.1 Magnésia reativa [5]

É empregada em mistura com o cimento Portland, forma o hidróxido na hidratação do cimento, carbonata, estabilizando como carbonato de magnésio $MgCO_3.3H_2O$. Esta aplicação visa a substituição do cimento, com a finalidade de diminuir a pegada de carbono. Todavia, as especificações estabelecem restrições sobre o teor de MgO no cimento, por expandir a longo prazo quando presente em grãos grossos.

5.2.2 Cimentos de magnésia expansiva

O teor de magnésia é adicionado ao cimento Portland em pequena quantidade, como um aditivo expansivo, com a finalidade de compensar a retração química que ocorre em primeiras e longas idades em obras de grande porte, como barragens, por exemplo. Cimentos expansivos ou compensadores de retração baseiam-se no aumento do teor de aluminato e sulfato nos cimentos pela adição de ye'elimita ($Ca_4Al_6O_{12}SO_4$) e anidrita ($CaSO_4$), formando a etringita expansiva [$(Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}.26H_2O$]. Recentemente, têm sido aplicados também cimentos com ye'elimita, silicato dicálcico e ferrita cálcica, com a vantagem do controle da expansão pelo teor de água na mistura. Em grandes estruturas, nas quais a retração ocorre no resfriamento, são preferidos os cimentos com magnésia expansiva. O aumento de volume molar na hidratação do MgO para formar o hidróxido é de 117%. Todavia, o seu emprego requer calcinação cuidadosa e controle da finura e dosagem, a fim de que a expansão aconteça durante o resfriamento (GARBEV, 2014).

5.2.3 Novacem

Foi um cimento proposto em pesquisa no Imperial College de Londres, cuja Companhia de produção foi desativada em 2012, restando o conhecimento dessa tecnologia em patentes. Trata-se da produção de blocos por um sistema constituído do óxido ou do hidróxido de magnésio, um hidroxicarbonato com a função de acelerar a hidratação do óxido e fornecer pontos de nucleação para a carbonatação do magnésio, e um sal higroscópico para garantir a umidade e a carbonatação ao longo do tempo. O hidróxido se forma com elevada área específica, mais suscetível à carbonatação (GARBEV, 2014).

5.3 Cimentos de fosfato de magnésio (MPCs)

5.3.1 Cimento de fosfato de amônio e magnésio

É formado pela reação ácido-base entre o MgO e um fosfato ácido solúvel (fosfato de amônio ou fosfato de potássio), com propriedades cimentantes. A equação 10 representa a formação do fosfato de amônio e magnésio:

$$MgO + NH_4H_2PO_4 + 5H_2O \rightarrow NH_4MgPO_4.6H_2O \quad (10)$$

A reação do ácido fosfórico com o óxido de magnésio, na proporção molar 1:1 forma um produto endurecido, mas solúvel em água. Para a formação de um fosfato insolúvel, a proporção é de 1:2, com excesso de magnésio, como mostrado na equação 11:

$$MgO + H_3PO4 + 2H_2O \rightarrow MgHPO_4.3H_2O \quad (11)$$

Essas reações são fortemente exotérmicas, às vezes violentas, o que aumenta o desafio na prática, se a produção é visada em larga escala. Por isso mesmo, a aplicação do processo de ligação fosfato-magnésio para a produção de cimentos requer um sistema que reaja mais lentamente e com liberação de calor de modo gradativo. Esse cimento foi aplicado, na década de 1980, em serviços de reparo rápido, como pavimentos, rodovias e pontes, mas substituído por outros sistemas, de cimento de elevado teor de alumínio-resina epóxi. A liberação de amônea (NH_3) durante o endurecimento e no estado endurecido, nocivo ao ambiente e à saúde, é forte restrição ao seu emprego.

5.4 Cimentos de silicato de magnésio hidratado – M-S-H

Esses cimentos são obtidos de uma fonte de magnésio, MgO reativo, por exemplo, e uma fonte de sílica altamente reativa. A reatividade do MgO é controlada pelo tempo e temperatura de calcinação. Até o momento presente não se têm estudos relativos à aplicação comercial como um ligante; além da resistência à compressão ou durabilidade a longo prazo, as suas propriedades mecânicas têm sido pouco estudadas; não está ainda claro o conhecimento sobre a estrutura das fases do gel que se forma em ligantes de M-S-H. Como um cimento, o emprego do M-S-H em larga escala na construção está limitado pelo tempo de pega lento à temperatura ambiente; a sílica ativa com a qual é produzido tem custo superior ao do cimento Portland o que indica que a sua aplicação estará restrita a nichos, a menos que surja outra matéria-prima de baixo custo.

[5] Referenciado do trabalho de Garbev et al (2014).

5.5 Cimentos de oxicloreto de magnésio – Cimento Sorel- MOC

A sua obtenção baseia-se na reação em solução aquosa de magnésia com cloreto de magnésio, formando uma variedade de fases fortemente dependentes da relação molar da solução, reatividade da magnésia e da temperatura, exemplificada nas equações 12 e 13.

$$3MgO + MgCl_2 + 11\,H_2O \rightarrow 3Mg(OH)_2.MgCl_2.8\,H_2O \quad (12)$$

$$5MgO + MgCl_2 + 13\,H_2O \rightarrow 5Mg(OH)_2.MgCl_2.8\,H_2O \quad (13)$$

O seu emprego teve sucesso em aplicações ornamentais e em pisos, diminuindo pela baixa resistência à água e consequente deterioração em serviço. Na aplicação a magnésia é misturada com materiais de enchimento, formatada e, em seguida, umedecida com a solução de $MgCl_2$ (1,5 a 3 mol/L) e deixada endurecer. Como variáveis influenciam as fases formadas, além da reatividade da magnésia e da concentração da solução, a temperatura, gerada ou por tratamento térmico.

5.6 Cimentos de oxissulfato de magnésio – MOS

O conceito de produção é o mesmo que o do oxicloreto, com a diferença de que o sulfato de magnésio substitui o cloreto de magnésio. Entre as várias fases que podem ser formadas, citam-se as da equação 14 e a da equação 15, sob aquecimento.

$$3MgO + MgSO_4 + 11\,H_2O \rightarrow 3Mg(OH)_2.MgSO_4.8\,H_2O \quad (14)$$

$$5MgO + MgSO_4 + 7\,H_2O \rightarrow 5Mg(OH)_2.MgSO_4.2H_2O \quad (15)$$

É menos higroscópico que o cimento de cloreto de magnésio, portanto, mais resistente ao intemperismo e maior tempo de validade ensacado e de remessa. Tem solubilidade mais baixa à temperatura ambiente, com a vantagem, no entanto, de não ser agressivo à armadura, como é o cloreto.

Esse cimento é de aplicação extremamente limitada. Pela suscetibilidade à água, não é útil como cimento estrutural. A baixa solubilidade do sulfato de magnésio necessita de cura a vapor para formar muitas de suas fases. Isso praticamente limita a aplicação à produção de painéis internos, revestimentos resistentes ao fogo, este sem vantagem sobre os painéis corta-fogo à base de gesso.

6. LIGANTES À BASE DE HIDROSSILICATOS DE CÁLCIO (CHSH)

Uma nova série de materiais cimentícios baseou-se na produção de silicatos de cálcio hidratados amorfos, a partir de sílica (SiO_2) e hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$] e, em seguida, ativado mecanicamente por moagem conjunta com materiais silicosos. É um ligante de baixa pegada de carbono, pois a fração carbonática das matérias-primas empregadas varia entre 30 e 40%, mais baixa do que a fração empregada na produção do cimento Portland, da ordem de 75% (Stemmermann, 2011; Garbev, 2014). A composição química é variável, em função da ampla relação Ca/Si, na faixa de 1 a 3, e a reatividade hidráulica influenciada pelo tipo de moagem. As propostas para a sua produção diferem, em geral, pela matéria-prima empregada, por exemplo, escória de alto-forno, cinza volante, quartzo, materiais de construção e concreto reciclados, ou espécies químicas como a sílica amorfa e óxido de cálcio (CaO) ou hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). O objetivo em todos sistemas formulados é a obtenção do hidrossilicato precursor, o α-$Ca_2[HSiO_4](OH)$, isto é, α-C_2SH cristalino, que, calcinado entre 500°C e 1000°C, forma um C_2S nas modificações polimórficas: β-C_2S, x-C_2S, ou α'_L-C_2S.

Este tipo de ligante foi denominado por Stemmermann et al. (2011) de "Celitement". O processo de produção

Cortesia da Elsevier Ed.

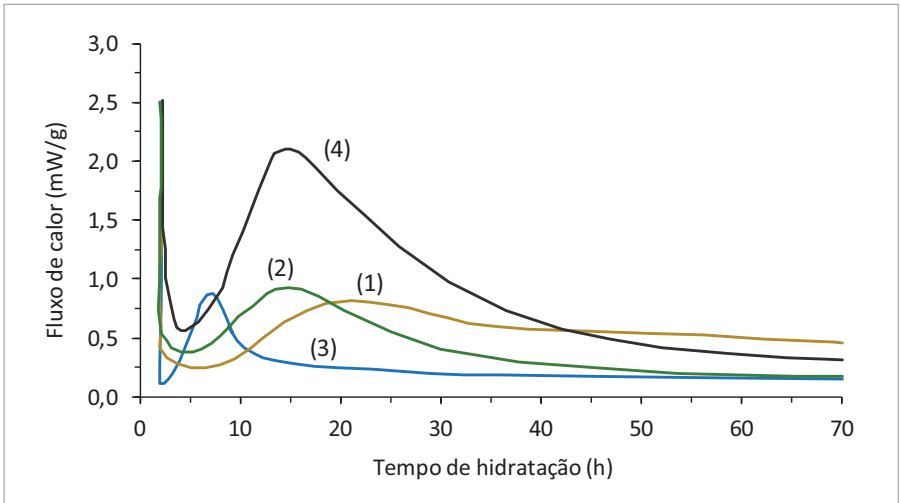


Figura 9
Fluxo de calor liberado na hidratação do α-C_2SH moído com escória de alto-forno (1), com quartzo (2); $C_{1,25}SH$ com quartzo (3) e um cimento Portland comum (4)

empregado por esses autores consiste em tratar a metade das matérias-primas em autoclave, a pressão saturada de vapor, a 200°C, durante 6 horas. Em uma segunda etapa, os silicatos de cálcio hidratados formados são moídos com o restante do material silicoso. Durante a moagem, as ligações de hidrogênio, que estabilizam o produto autoclavado, são destruídas e novos hidrossilicatos amorfos são formados ao redor de núcleos não reativos dos silicatos moídos conjuntamente. A reatividade é ilustrada na Figura 9 para o α-C_2SH moído, com escória de alto-forno (1), com quartzo (2); $C_{1,25}SH$ com quartzo (3) e um cimento Portland comum CEM I 42, 5R (EN 197-1:2000) para comparação (4). A intensidade do pico ilustra o calor liberado nas primeiras horas de hidratação relativos à formação do C-S-H, responsável pela resistência mecânica como também a contribuição relativa desse cimento comparada à do cimento Portland. Influem nesse resultado a composição do silicato de origem, as condições de moagem, distribuição de tamanho de partícula e finura. O CO_2 liberado na calcinação do calcário, para a produção do CaO, é 53% da emissão na produção do clínquer.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diferentemente do concreto, cuja inovação é bastante visível, como o aparecimento dos concretos de pós-reativos, concretos de elevadíssimas resistências, concretos autolimpantes, concretos autoadensáveis, etc., o cimento Portland como material ligante já atingiu um alto patamar de qualidade, desempenho, competitividade e moderna tecnologia de fabricação, características estimuladas pela abundância das suas matérias-primas em âmbito mundial.

O grande desafio que ora se configura para a indústria do cimento é a diminuição das emissões dos gases de efeito estufa, principalmente o CO_2, por fazer parte do processo de fabricação desse insumo.

Portanto, como mostrado neste resumo de informações, as inovações ou pesquisas têm se direcionado ao estudo de novos tipos de cimento que minimizem as emissões de CO_2, ao lado de grande empenho da pesquisa em aprofundar o conhecimento sobre os cimentos alternativos já propostos. Em junho deste ano, foi promovido pela *University College of London*, o *1st International Conference on Innovation in Low-carbon Cement & Concrete Technology* (Winnefeld et al., 2019); a proposta é a sua realização periódica e certamente muito progresso poderá vir nos anos futuros.

O sucesso desses tipos de novos ligantes vai depender da relação custo/benefício ambiental, diretamente dependente das exigências legais e dos compromissos e comportamento da sociedade nos próximos anos.

Todas essas tecnologias estão em estágios diferenciados de desenvolvimento e somente se tornarão possíveis se forem economicamente viáveis, apresentarem comportamento de bom desempenho ao longo do tempo e, principalmente, se tiverem aceitação na indústria da construção.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASHRAF, W.; OLEK, J.; SAHU, S. Phase evolution and strength development during carbonation of low–lime calcium silicate cement (CSC). In: Construction Building Materials. 210p (2019) 473–2482. Doi.org/j.conbuildmat.2019.03.038.

[2] CSI – Cement Sustainability Initiative – ECRA – European Cement Research Academy, State–of–the–art, Technology Papers – Paper nº 5: New binding material: Long term perspective for application in cement industry (2017).

[3] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 15743. Supersulfated cement–composition, specification and conformity criteria, Brussels, Belgium, 2010).

[4] European Standard EN197– 1 Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.

[5] GARBEV, K.; BEUCHLE, G.; SCHEWEIKE, U.; DREGERT, D.M.O; STEMMERMANN, P. Preparation of a novel cementitious material from hydrothermally synthesized C–S–H phases. In: Journal American Ceramic. Soc.97 (7) (2014), doi:101111/jamce.12920.

[6] GASTALDI D, PAUL G., MARCHESE L, IRICOC S., BOCCALERI E., MUTKE S., BUZZI L., CANONICOA F. Hydration products in sulfoaluminate cements: Evaluation of amorphous phases by XRD/solid–state NMR. Cement and Concrete Research. 90 (2016) 162–173p. doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.014.

[7] RIMAN, R.E.; NYE, T. E.; ATAKAN, V.; VAKIFAHMETOGLU, C.; LI, Q.; TANG I. Synthetic formulations and methods of manufacturing thereof, US 92 16926 B2, 2015.

[8] SHI, C.; QU, B.; PROVIS, J.L. Recent progress in low–carbon binders. In: Cement and Concrete Research. 122p (2019), 227–250, doi.org/10.106/j.cemconres.2019.05.009.2008. 500p.

[9] STEMMERMANN, P.; BEUCHLE G.; GARBEV K.; CELITEMENT, S.U. A new sustainable hydraulic binder based on calciumhydrosilicates, 13th. International Congress on the Chemistry of Cements, Madrid, 2011. E

[10] WALLING, S.A.; PROVIS, J.L. Magnesium based cements: journey of 150 years, and cements for the future? In: Chemical Reviews (2016) 116p, 4170 – 4204, doi10.1021/acs.chemrev Sb 00463.

[10] WINNEFELD, F.; EPIFANIA, E.; GARTNER, M.F.E. M. New insights into the hydration of cementitious materials based on magnesium carbonates. 1st. International Conference on Innovation in Low–carbon Cement and Concrete Technology – ICILCCT, 2019.University College London – UK.

A captura e uso do CO_2 em materiais para a construção civil

SÉRGIO ALMEIDA PACCA
Universidade de São Paulo

I. INTRODUÇÃO

Existem várias tecnologias que visam desacelerar o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera, colaborando para a mitigação da mudança climática global. O *Carbon Capture and Storage* (CCS) e o *Carbon Capture and Utilization* (CCU) são duas tecnologias que visam reduzir a concentração de CO_2 na atmosfera. A captura pode se dar diretamente da atmosfera, sendo que, nesse caso, o CO_2 está misturado com nitrogênio e oxigênio a uma concentração relativamente reduzida de 0,04%, ou pode ser aplicada a uma fonte fixa de emissão, na qual a concentração de CO_2 é maior. Em fontes industriais nas quais a emissão da combustão se combina à emissão de reações químicas, como no caso de um forno de produção de cimento, a concentração do CO_2 pode ser ainda maior.

O perfil tecnológico da indústria do cimento no Brasil indica a predominância da rota seca, sendo que a maior parte dos produtores adota um processo com preaquecedor e precalcinador, e o fator de emissão médio em 2014 era de 829 kg de CO_2 por tonelada de clínquer (Vizedo e Pecchio, 2019). A guisa de comparação com a emissão de poluentes, os fatores de emissão em kg/t clínquer dos processos com preaquecedor e precalcinador nos EUA são mostrados na Tabela 1.

Nota-se que a massa emitida de CO_2 é duas ordens de magnitude superior à emissão de NO_x. Mesmo assim, a emissão de poluentes pode causar impactos locais e regionais que não podem ser negligenciados. De qualquer maneira, a gestão das emissões de CO_2 geralmente passa pela segregação do gás dos outros poluentes emitidos e o seu armazenamento de forma perene.

Enquanto o CCS implica a captura do CO_2, o seu transporte, compressão e armazenamento geológico, o CCU implica o desvio do CO_2 que iria para a atmosfera e na sua utilização como um insumo para algum processo industrial. Já uma vertente do CCU, o CCUS (S de *storage*) combina o CCU com a incorporação do CO_2 em um material ou produto. Sendo que este processo faz com que o CO_2 fique retido e não seja mais liberado para a atmosfera.

Os dois processos envolvem uma etapa inicial de captura. Contudo, o CCS demanda um gás com alta pureza, haja visto que este deverá ser comprimido, pois o custo energético e monetário desta operação é relevante e não faz sentido comprimir outros gases juntos com o CO_2. A fim de produzir um fluxo puro de CO_2, o projeto europeu *Low Emissions Intensity Lime & Cement* (LEILAC) pré-aquece o calcáreo em um vaso de aço inox. Esse processo não demanda a adição de substâncias químicas e requer alterações mínimas em comparação com o processo tradicional, uma vez que simplesmente substitui o calcinador (LEILAC 2019).

▶ **Tabela 1 – Emissão específica de poluentes de fornos de cimento nos Estados Unidos**

Tecnologia da planta	SO_2	NO_x	CO	PM*	CO_2	Compostos orgânicos voláteis
Preaquecedor	0,27	2,4	0,49	0,13	900	0,09
Preaquecedor + precalcinador	0,54	2,1	1,8	0,024	900	0,059

* Sistemas com precipitador eletrostático – **Fonte:** EPA 2009

▶ Tabela 2 – Custos de uma planta com CCS produzindo cerca de 120 toneladas por hora de clínquer (Gardarsdottir *et al.* 2019)

	Planta de referência	Absorção por monoetanolamina (MEA)	Combustão com oxicombustível	Absorção por amônia resfriada	Liquefação de CO_2 auxiliada por membrana
Custo total, planta de cimento + planta de captura de CO_2 (M€)	204	280	332	353	450
Custo total, planta de captura de CO_2 (M€)	–	76	128	149	247
OPEX anual (M€)	41	76	58	66	71
Custo do clínquer (€/t clínquer)	62,6	107,4	93	104,9	120
Custo do CO_2 evitado (€/tCO_2)	N/A	80,2	42,4	66,2	83,5

Apesar dos custos elevados (Tabela 2), a tecnologia de CCS está dominada. Atualmente, empresas que exploram petróleo utilizam CO_2 comprimido para a recuperação de petróleo nos poços. Neste caso a origem do CO_2 é o próprio poço de petróleo e a operação significa a reinjeção do gás para facilitar a retirada do petróleo. Em 2017, a Petrobras atingiu a marca de 7 milhões de toneladas de CO_2 capturadas e reinjetadas em poços na bacia de Santos (Global CCS Institute, 2018). Contudo, se por um lado, a tecnologia do CCS já está dominada, por outro, existem apenas alguns projetos-piloto cuja única função é reduzir a concentração de CO_2 na atmosfera. Uma instalação industrial nos EUA captura o CO_2 da produção de etanol e injeta no subsolo, em um lençol freático, em uma formação de arenito. Neste caso, o objetivo é simplesmente estocar o CO_2, sem que a injeção facilite a exploração de petróleo. Acredita-se que um incentivo de US$50/t$CO_2$ poderia favorecer uma nova onda de projetos de CCS nos EUA. Fica claro que o entrave para o desenvolvimento desta tecnologia de mitigação são os custos.

A menos que haja um ambiente regulatório favorável, ninguém vai estar disposto a investir no CCS. Desta forma, o CCU se coloca como uma alternativa interessante, pois pode atrelar a retirada do CO_2 à fabricação de um insumo com valor de mercado.

Este artigo busca avaliar tecnologias para a captura de CO_2 e seu uso como insumo material. Certamente existem várias tecnologias de CCU que buscam converter o CO_2 em insumos energéticos, pela rota biológica, sendo uma abordagem bastante perseguida a produção de algas para sua conversão em um vetor energético ou até mesmo em um insumo para a indústria química. Contudo, neste artigo, apenas serão exploradas tecnologias que transformam o CO_2 diretamente em materiais, de preferência para o uso na construção civil.

2. ROTAS MINERALÓGICAS DO CCU

A utilização do CO_2 em rotas químicas torna possível a retenção do carbono em um ciclo e não faz necessariamente com que a molécula fique incorporada a um material. Todavia, o carbono também pode ser aprisionado permanentemente por mineralização acelerada, para produzir materiais. Na rota mineral, o CO_2 capturado reage com minerais, geralmente silicatos de carbono ou magnésio. A rota mineral pode utilizar minerais naturais diretamente ou minerais processados, tal como o clínquer utilizado na fabricação de Cimento Portland (CP).

Como o carbono na molécula de CO_2 está totalmente oxidado, as reações para separar o oxigênio demandam energia. Algumas tecnologias, como os biorreatores com algas, utilizam a radiação solar, por meio da fotossíntese. Outros processos, como o Skymine, utilizam reações endotérmicas que consomem energia. Este processo envolve a produção de produtos comercializáveis, tais como: hidrogênio, cloro e bicarbonato de sódio. O processo transforma o CO_2 em bicarbonato de sódio por meio do tratamento do gás, absorção e transformação eletroquímica (Figura 1).

Na etapa de tratamento, o gás é resfriado, sendo que o calor e a água produzidos são utilizados e os metais pesados são removidos. O gás remanescente passa por uma coluna de absorção com hidróxido de sódio, que reage com o CO_2 para formar bicarbonato de sódio. O hidróxido de sódio é produzido pela hidrólise da água, que consome eletricidade, e pela reação com o cloreto de sódio. Além do bicarbonato de sódio, o processo produz hidrogênio e cloro. Para cada tonelada de CO_2 são produzidas 1,9 toneladas de bicarbonato de sódio. Contudo, a demanda por este produto é limitada e a aplicação massiva do processo pela indústria poderia produzir cerca de 600 vezes a capacidade instalada no setor químico brasileiro (Vizedo e Pecchio 2019). Em San Antonio, no Texas, foi inaugurada em 2014 uma planta com a tecnologia *SkyMine*, com capacidade de capturar 75.000 toneladas de CO_2 por ano (MacDiarmid and Whittenburg,

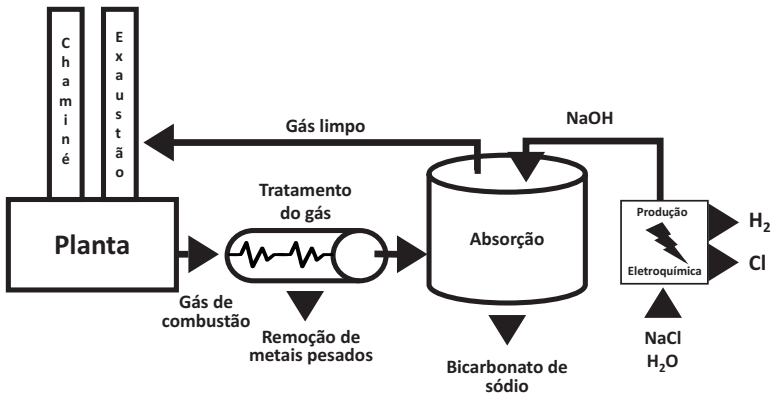


Figura 1
Esquema do processo Skymine (St Angelo *et al*, 2008)

2014). As barreiras para o uso da tecnologia são a saturação no mercado de bicarbonato e as emissões de CO_2 embutidas na produção do NaOH, devido ao consumo de energia.

Alguns minerais naturais convertem o CO_2 em carbonatos inorgânicos por meio de reações químicas. Nesse processo, os óxidos de cálcio e magnésio que estão presentes em rochas, como a Olivina ($MgSiO_4$) e a Wollastonita ($CaSiO_3$), que são ricas em silicatos alcalinos, reagem com o CO_2, produzindo carbonatos de cálcio e magnésio. Este processo de intemperismo é o mesmo processo que foi responsável pela redução na concentração de CO_2 da atmosfera após a formação da Terra. Esses processos implicam no consumo de água e a utilização deles para a mitigação das emissões de CO_2 depende da aplicação de catalisadores para acelerar a reação. Infelizmente, esses minerais não estão disponíveis no Brasil (Vizedo e Pecchio 2019).

Não obstante, recentemente foi divulgada uma experiência na Islândia, na qual o CO_2 teria sido injetado por meio de poços em rochas basálticas a uma profundidade de 400 a 800 m. A maior parte do CO_2 foi absorvido após 2 anos, formando minerais carbonatados estáveis (Matter *et al.* 2016). Neste projeto (CARBFIX), o CO_2 é injetado já dissolvido na água e é isso que faz com que a carbonatação mineral *in situ* seja relativamente rápida. A grande limitação é que o CO_2 necessita de uma grande quantidade de água para se dissolver (a razão de CO_2 para água injetada é de 1 para 25). A energia necessária para injetar este volume de água com CO_2 dissolvido é maior do que para injetar apenas o CO_2. Portanto, esse é um fator negativo quando comparado ao CCS. O basalto é uma rocha abundante no Brasil, contudo, no caso descrito, o basalto havia sido previamente submetido a técnicas de fracionamento hidráulico (*fracking*) para a exploração de gás e foi isso que possibilitou a penetração do CO_2 e o contato do gás com a superfície da rocha. No Brasil ainda não exploramos hidrocarbonetos por meio de fracionamento hidráulico. Certamente estamos perante resultados bastante interessantes, mas ainda é muito cedo para se dizer se esses poderão ser aplicados em larga escala, devido às dificuldades técnicas e aos custos significativos (Vizedo e Pecchio 2019).

A utilização direta de rochas está ainda em fase de pesquisa. Para viabilizar a tecnologia de CCUS em escala comercial, é necessária uma extração ou ativação eficiente dos silicatos alcalinos e a aceleração da cinética da carbonatação.

2.1 Mineralização com resíduos industriais

A tecnologia de mineralização com utilização de resíduos industriais, ao invés de rochas naturais, já existe. Nesse processo, as emissões de CO_2 (provenientes de centrais elétricas ou fabricação de cimento) são combinadas com soluções básicas para formar carbonatos ou bicarbonatos.

Uma das vantagens em termos da utilização de resíduos alcalinos para o sequestro de carbono é que muitos resíduos que se prestam para esse fim são produzidos em locais onde também são emitidas grandes quantidades de CO_2 (Huntzinger, 2009). O uso de finos de cimento ou *Cement Kiln Dust* (CKD) é um desses exemplos. Estima-se que de 15% a 20% da massa de clínquer seja liberada sob a forma de CKD. Uma outra análise do potencial de sequestro do CO_2 estima que 6% da massa de clínquer é transformada em CKD. Uma análise realizada nos EUA concluiu que o potencial de sequestro de CO_2 está entre 14% e 32% da massa de CKD e que o potencial total de mitigação está entre 10-13% da massa de CO_2 emitido pela carbonatação do calcário (Tabela 3). Considerando que o Brasil produz cerca de 50 milhões de toneladas de clínquer, entre 0,4 a 0,9 milhões de toneladas de CO_2 poderiam ser sequestradas por CKD (Vizedo e Pecchio 2019).

Outro resíduo alcalino que pode reagir com o CO_2 é a lama vermelha da produção de alumina. Para cada quatro toneladas de bauxita, duas toneladas de alumina e duas toneladas de lama vermelha são geradas. A capacidade de sequestro da lama vermelha corresponde a 7 g de CO_2 por 100 g de lama vermelha (Sahu et al. 2010). Considerando que a produção de alumina no Brasil é de cerca de 10,4 milhões de toneladas, seria possível sequestrar 0,7 milhões de toneladas de CO_2.

A escória siderúrgica é um resíduo que também apresenta potencial. Tanto

a produção de ferro gusa no alto-forno pode gerar escória quanto a produção de aço pelo processo de arco elétrico (Ghacham et al. 2016). Estima-se que a produção de 1 tonelada de aço em *Basic Oxygem Furnance* (BOF) produza 126 kg de escória e que a produção em sistema de arco elétrico produza 169 kg de escória. Por sua vez, a capacidade de sequestro da escória é 0,05 gCO_2 por grama de resíduo. Considerando que a produção no Brasil de ferro gusa em BOF é cerca de 24 milhões de toneladas e que a produção de aço em arco elétrico é cerca de 6,6 milhões de toneladas, o potencial de captura de CO_2 seria de 200 mil toneladas de CO_2 (Vizedo e Pecchio 2019).

Em resumo, o potencial de sequestro no Brasil dos três resíduos alcalinos considerados é inferior a 2 milhões de toneladas de CO_2. No entanto, em 2014, a indústria brasileira de cimento emitiu 40 milhões de toneladas de CO_2 (Vizedo e Pecchio 2019). Nesse sentido outros processos baseados em produtos minerais e desenvolvidos especificamente para a mitigação de CO_2 devem ser considerados.

2.2 Produtos cimentícios resultantes do uso do carbono

O processo da Calera converte o CO_2 em uma forma sólida de carbonato de cálcio, que pode ser aplicado na fabricação de materiais de construção. O processo mimetiza a produção de cimento marinho, que é utilizado em conchas e recifes de corais. O CO_2 é combinado ao cálcio e ao magnésio presentes na água do mar para formar carbonatos em condições normais de temperatura e pressão.

A empresa Calera projetou, construiu e operou duas plantas-piloto na Califórnia para desenvolver as tecnologias de captura e conversão de CO_2. Essas unidades capturam até 2 toneladas de CO_2 por dia usando diretamente gás de exaustão de termelétricas a carvão, sem haver necessidade da concentração do CO_2 (Calera 2019). O gás de exaustão entra em contato com uma solução alcalina aquosa que efetivamente remove o CO_2 e com uma fonte de cálcio, o que resulta na formação do produto de carbonato de cálcio, que é então seco e transformado em pó. A reação mimetiza o processo natural para formar as estruturas dos corais no mar. Este pó pode então ser usado para fabricação de produtos que se beneficiam da capacidade de cimentação do carbonato de cálcio.

Uma opção é o uso de resíduos industriais que contenham alcalinidade e cálcio, como o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Outra opção são os dois fluxos separados - uma fonte de alcalinidade, como a soda cáustica (NaOH), e uma fonte de cálcio, como o cloreto de cálcio, que pode ocorrer naturalmente ou como um resíduo de processos químicos. Ambos os métodos resultam na captura e conversão de CO_2 no cimento especial de carbonato de cálcio (Calera 2019):

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

$$CO_2 + 2NaOH + CaCl_2 \rightarrow CaCO_3 + 2NaCl + H_2O \quad (2)$$

A empresa instalou uma linha comercial de placas de fibrocimento, para refinar as formulações para produzir as chapas em tamanho real, que são mais leves que os produtos convencionais, com propriedades de desempenho técnico equivalentes. Além disso, o produto também pode ser usado como um suplemento que complementa o CP.

Um estudo recente avaliou a resistência à compressão de misturas de 20% de Calera com cimento Portland comum e os resultados indicam que, no curto prazo (1 a 7 dias), a presença de carbonatos de Calera é benéfica para resistência à compressão, com resistências superiores às misturas que não contêm carbonatos de Calera. Já aos 28 dias, as resistências à compressão obtidas para misturas de cimento Portland comum são ligeiramente superiores (Monteiro et al. 2019).

O magnésio também pode reagir e absorver o CO_2. O Eco-Cement é um tipo de cimento que incorpora MgO reativo e a magnesita ($MgCO_3$) é o mineral utilizado para produzir o composto. O MgO reativo é manufaturado a temperaturas mais baixas (600-750 °C) do que o CP. Em blocos porosos, sob condições de cura adequadas, o MgO reativo carbonata, absorvendo CO_2 e, como resultado, ganha resistência. A magnésia reativa pode ser moída e adicionada ao CP e a granulometria depende da aplicação pretendida. Ao ser utilizado, este cimento terá uma capacidade de absorver CO_2 mais rapidamente do que o CP. A TecEco planeja fazer a magnésia reativa, que é usada no Eco-Cement, usando energia solar em um novo forno que combina aquecimento, moagem e captura de CO_2.

Além do mais, existem algumas tecnologias que absorvem o CO_2 durante a cura de produtos cimentícios. Um concreto produzido com CP tradicional absorve CO_2 apenas nos 10 mm superficiais em períodos de 20 a 30 anos.

Tabela 3 – Massa de CO_2 incorporada em resíduos industriais

Resíduo industrial	Massa de CO_2 incorporada (Mt)
CKD	0,4-0,9
Lama vermelha	0,7
Escória de alto-forno	0,2

A capacidade máxima de absorção de CO_2 de um material cimentício é 0,5 toneladas de CO_2 por tonelada de material. Portanto, o segredo é aumentar a velocidade de absorção e a superfície específica do produto. Alguns substitutos do CP buscam realizar o mesmo tipo de neutralização do CO_2 rapidamente. Tais processos aproveitam o CO_2 contido nos gases de exaustão oriundos da combustão. Um exemplo é o Concreto Solidia, que absorve CO_2 durante a cura. Em comparação com a cura do CP que incorpora o CO_2 pelo processo de hidratação, envolvendo fases de silicato de cálcio altamente calcinadas, a cura do processo Solidia envolve silicatos de cálcio menos calcinados (Ca_3SiO_7) e produz calcáreo e sílica gel sem consumir muita água. As matérias-primas são as mesmas utilizadas para o CP comum. O processo de cura tem a capacidade de absorver 300 kg de CO_2 por tonelada de cimento, o que leva a uma redução de até 70% da pegada de carbono quando comparada ao CP comum (Jain *et al.* 2014).

Outro processo de cura que absorve o CO_2 combina o di-cálcio silicato fase γ (γ-2CaO.SiO_2) com cinzas volantes. Esta mistura, desenvolvida no Japão pela Kajima, substitui o CP na fabricação de produtos de concreto que são levados para a cura em uma câmara, que recebe as emissões diretas de uma termelétrica. O produto é fabricado combinando $Ca(OH)_2$ com pó de SiO_2.

3. CONCLUSÃO

A tecnologia desenvolvida no âmbito do projeto LEILAC, que separa o CO_2 antes da fabricação do clínquer, pode facilitar empresas verticalizadas, produtoras de cimento, que também utilizem o gás para a cura de produtos cimentícios. O consumo de água é relevante para a reação de absorção do CO_2. Portanto, a avaliação das tecnologias deve levar em consideração o consumo de água. Desta forma, a conveniência da tecnologia pode variar regionalmente. A porosidade do material também é relevante sob esse aspecto, pois ela deve permitir a entrada da água e do CO_2 concomitantemente, o que não é trivial.

Existem várias tecnologias de CCUS disponíveis e algumas delas apresentam limitações para a aplicação em larga escala, o que faz com que seja interessante considerar um portfólio com várias tecnologias para atender a mitigação do CO_2 da indústria cimenteira. Isso requer uma organização do setor para elencar os projetos estratégicos para iniciar a peleja.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Calera 2019. http://www.calera.com/beneficial-reuse-of-co2/process.html. Acessado em 5 de agosto de 2019.

[2] de Coninck, Heleen, Hans Reith, and Katy Armostrong. 2011. Carbon Capture and Utilization in the Green Economy: Using CO_2 to Manufacture Fuel, Chemicals and Materials. York, UK: The Cen tre for Low Carbon Futures 2011 and CO_2Chem Publishing 2012. http://co2chem.co.uk/wp-content/uploads/2012/06/CCU%20in%20the%20green%20economy%20report.pdf.

[3] EPA 2009. AP-42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources. Chapter 11 Mineral Products Industry. https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/index.html.

[4] Gardarsdottir, Stefania, Edoardo De Lena, Matteo Romano, Simon Roussanaly, Mari Voldsund, José-Francisco Pérez-Calvo, David Berstad, et al. 2019. "Comparison of Technologies for CO_2 Capture from Cement Production – Part 2: Cost Analysis". Energies 12 (3): 542. https://doi.org/10.3390/en12030542.

[5] Ghacham, Alia Ben, Louis-César Pasquier, Emmanuelle Cecchi, Jean-François Blais, e Guy Mercier. 2016. "CO_2 Sequestration by Mineral Carbonation of Steel Slags under Ambient Temperature: Parameters Influence, and Optimization". Environmental Science and Pollution Research 23 (17): 17635–46. doi:10.1007/s11356-016-6926-4.

[6] Global CCS Institute, 2018. The Global Status of CCS: 2018. Australia.

[7] Huntzinger, Deborah N., John S. Gierke, S. Komar Kawatra, Timothy C. Eisele, e Lawrence L. Sutter. 2009. "Carbon Dioxide Sequestration in Cement Kiln Dust through Mineral Carbonation". Environmental Science & Technology 43 (6): 1986-92. doi:10.1021/es802910z.

[8] Jain, J. Deo, O. Sahu, S. DeCristofaro, N. Solidia Concrete. Solidia Technologies. Piscataway, N.J. February 19, 2014.

[9] LEILAC 2019. Low Emissions Intensity Lime & Cement. A project of the European Union Horizon 2020 Research & Innovation https://www.project-leilac.eu/the-core-technology. Acessado em 6 de agosto de 2019.

[10] MacDiarmid, S. and Whittenburg, J.D. 2014. Skyonic Opens World's First Commercial-Scale Carbon Capture and Utilization Facility http://www.skyonic.com/wp-content/uploads/2014/12/News-Release-Capitol-SkyMine-Grand-Opening-October-20-2014.pdf. acessado em 24/04/2016.

[11] Matter, J. M., M. Stute, S. O. Snaebjornsdottir, E. H. Oelkers, S. R. Gislason, E. S. Aradottir, B. Sigfusson, et al. 2016. "Rapid Carbon Mineralization for Permanent Disposal of Anthropogenic Carbon Dioxide Emissions." Science 352 (6291): 1312–14. doi:10.1126/science.aad8132.

[12] Monteiro, Paulo J.M., Laurence Clodic, Francesco Battocchio, Waruntorn Kanitpanyacharoen, Sejung Rosie Chae, Juyoung Ha, e Hans-Rudolf Wenk. 2013. "Incorporating Carbon Sequestration Materials in Civil Infrastructure: A Micro and Nano-Structural Analysis". Cement and Concrete Composites 40 (julho): 14-20. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.013.

[13] Sahu, Ramesh Chandra, Raj Kishore Patel, e Bankim Chandra Ray. 2010. "Neutralization of Red Mud Using CO_2 Sequestration Cycle". Journal of Hazardous Materials 179 (1-3): 28-34. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.02.052.

[14] St Angelo, D. Clayton, M. Higgs, P. Jones, J. Lynch, J. MacDiarmid, S. CO2 Capture in Solid Form - An overview of the SkyMineTM Process. IEEE Energy 2030. Atlanta, GA 17-18 November, 2008.

[15] Vizedo, G. e Pecchio, M. (eds.) ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono na indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

Captura de CO_2 em materiais cimentícios

EDNA POSSAN

Laboratório de Estruturas, Desempenho e Materiais | Universidade Federal da Integração Latino Americana – UNILA

I. INTRODUÇÃO

A produção do cimento é responsável por cerca de 7% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) do planeta, as quais são, maiormente originárias da descarbonatação da rocha calcária ($CaCO_3$) e da utilização de combustíveis para aquecimento dos fornos de clínquer.

A descarbonatação ocorre a temperaturas de 700 a 800 ºC, conforme equação 1, onde tem-se a decomposição do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e a formação de óxido de cálcio (CaO) e a consequente liberação de CO_2.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (1)$$

Por estequiometria, a emissão de CO_2 do processo de descarbonatação (equação 1) corresponde a 44% da massa dos compostos. Considerando que para produzir uma tonelada de clínquer faz-se necessário empregar aproximadamente 1300 kg de rocha carbonática, só do processo de descarbonatação (sem considerar energia) tem-se em torno de 572 kg·CO_2 por tonelada de material. Ou seja, a descarbonatação é responsável por mais de 60% das emissões da produção do clínquer.

Com base nos dados de 2016 do GNR Project Reporting CO_2 (2018), a média global de geração de CO_2 por tonelada de clínquer cinza produzido é da ordem de 842 kg, sendo que, no Brasil, a emissão é de 866 kg·CO_2 por tonelada. Essas emissões advêm do somatório das emissões da descarbonatação e do uso de combustíveis fósseis para a produção do clínquer.

Contudo, quando se fala em cimento, as emissões por tonelada de produto podem ser bastante reduzidas conforme a classificação brasileira para cada tipo distinto. Em relação às emissões mínimas e máximas para o cimento Portland brasileiro, têm-se os valores de 173 kg·CO_2/t e 823 kg·CO_2/t, respectivamente (ver tabela 1). Isso se deve aos limites normativos para o teor de clínquer contido no cimento. Conforme a nova norma brasileira de cimento Portland (ABNT NBR 16697:2018), para a produção de uma tonelada de cimento, faz-se a substituição do clínquer por de até 5% de sulfato de cálcio (gesso), por até 70% de escória de alto-forno, por até 55% de cinza volante e até 25% de fíler calcário. Ou seja, com os índices de substituição atuais de clínquer por adições da NBR 16697:2018, conforme tabela 1, o teor de clínquer contido no cimento varia de 20 a 95%, representando em massa 200 a 950 kg/t. Como as emissões de CO_2 são proporcionais ao teor de clínquer contido no cimento, quanto menor esse teor, menores as emissões associadas à produção do cimento, o que é desejável do ponto de vista ambiental.

As emissões de CO_2 associadas ao cimento da Tabela 1 foram calculadas

▶ **Tabela 1 – Teor mínimo e máximo de clínquer contido no cimento Portland brasileiro e emissões de CO_2 por tonelada de cimento**

Cimento Portland	Teor de Clínquer (%)*		Emissão de CO_2 (kg · CO_2/t)**	
	Mínimo	Máximo	Máxima	Mínima
CP I	90	95	779	823
CP I-S	85	89	736	771
CP II-F	70	84	606	727
CP II-E	46	89	398	771
CP II-Z	66	89	572	771
CP III	20	90	173	779
CP IV	40	80	346	693
CP V	85	95	736	823

* Foi considerado 5% de sulfato de cálcio em todos os tipos de cimento.

** Segundo dados do GNR Project Reporting CO_2 de 2016, a produção de uma tonelada de clínquer cinza no Brasil emite 866 kg · CO_2/t.

com base nos dados no *GNR Project Reporting* CO_2, considerado os valores limites de clínquer contido no cimento (máximos e mínimos). Nos cálculos realizados, a escória e a cinza volante possuem "zero carbono", uma vez que esses produtos são resíduos de outros processos industriais, sendo que as emissões foram alocadas no processo produtivo que as gerou. A adição do fíler também pode entrar como "zero carbono", uma vez que o mesmo muitas vezes também é um resíduo do próprio processo de produção do cimento, ou de outros processos, como produção de cerâmicas. Porém, se o fíler não for um resíduo, as emissões associadas à sua produção tendem a ser muito inferiores a do cimento, tendo em vista que seu processamento é geralmente mecânico, demandando apenas energia para sua extração, moagem e transporte.

Tendo em vistas as emissões associadas à produção do clínquer, a indústria cimenteira tem buscado mitigar as emissões de seus processos de fabricação, em total convergência com o objetivo do Acordo de Paris. Firmado na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), o Acordo de Paris busca limitar o aquecimento Global em 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, por meio da redução dos gases do efeito estufa (GEE), especialmente as emissões de dióxido de carbono antropogênicas.

Neste contexto, o recém-publicado Roadmap tecnológico do cimento traz diferentes cenários da indústria cimenteira brasileira até 2050. O documento indica que a captura e estocagem de carbono (*CSC – Carbon Storage and Capture*) é uma das tecnologias inovadoras com potencial de uso na indústria cimenteira, cujas aplicações em escala industrial e comercial precisam de pesquisa e desenvolvimento.

2. CAPTURA E ESTOCAGEM DE CARBONO

Existem dois tipos de sequestro de carbono, o direto e o indireto. O sequestro de carbono direto abrange a captura do CO_2 originário de processos industriais e da queima de combustíveis fósseis antes que ele alcance a atmosfera. Neste processo, o CO_2 pode ser removido dos sistemas estacionários de geração de energia, campos de exploração de petróleo e gás, refinarias de petróleo, cimenteiras, siderúrgicas, unidades de produção de gás natural, unidades de produção de fertilizantes, sendo armazenado com segurança em formações geológicas ou utilizado em processos industriais. A cura carbônica de materiais à base de cimento ou tratamento de resíduos de construção e demolição, entre outros, são exemplos de uso de CO_2 em processos industriais da indústria da construção.

Já, no sequestro de carbono indireto, o CO_2 atmosférico é removido posteriormente à sua emissão. Um dos processos indiretos muito conhecidos é a fotossíntese, onde o CO_2 é incorporado à biomassa do vegetal durante o seu crescimento. Este mecanismo incentiva os florestamentos e reflorestamentos em áreas onde a vegetação foi alterada.

Outro processo indireto de sequestro do CO_2 é o da carbonatação de materiais à base de cimento e cal, que ocorre naturalmente nas edificações ao longo dos anos e após a demolição.

3. A CARBONATAÇÃO E A CAPTURA DE CO_2

A reação de carbonatação vem sendo estudada em todo o mundo há mais de 70 anos, sobretudo devido a seu efeito negativo à durabilidade das estruturas de concreto armado. A ocorrência dessa reação reduz o pH do concreto, deixando o aço susceptível à corrosão.

Porém nos últimos anos, essa reação tem sido estudada para outra finalidade: fixação de carbono em materiais à base de cimento e cal. Essa fixação do carbono é conhecida como estocagem,

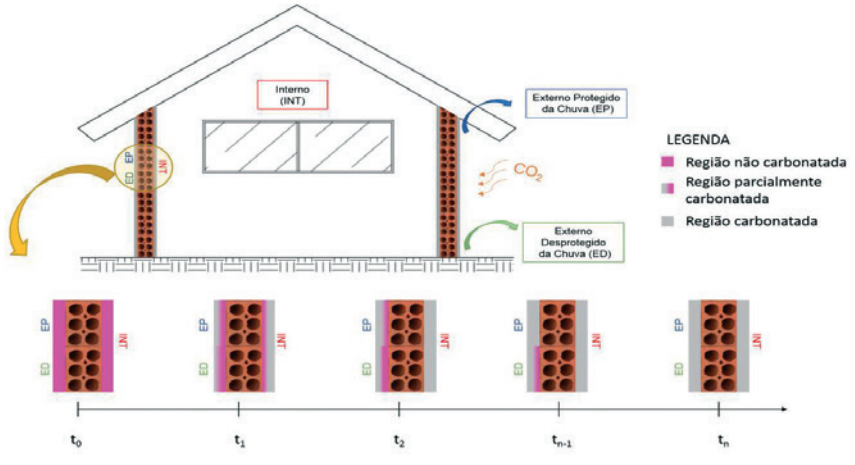


Figura 1
Difusão do CO_2 em diferentes ambientes de exposição para uma edificação revestida com argamassa à base de cimento e cal (figura cortesia de Isabela de Oliveira Antonio)

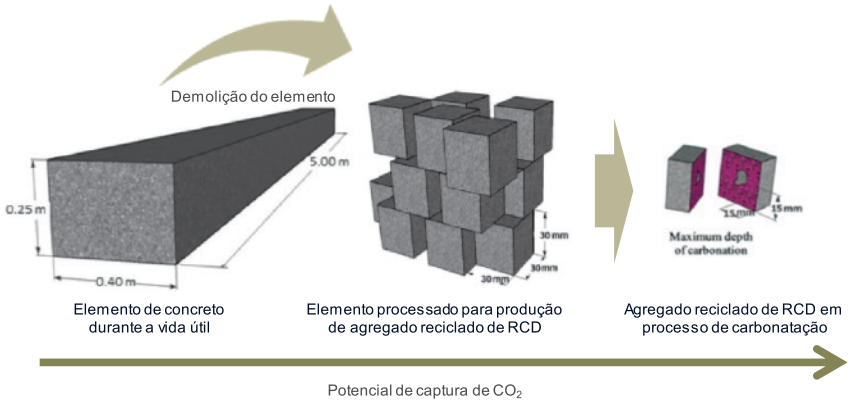


Figura 2
Captura de CO_2 devido à carbonatação – da vida útil até a demolição do elemento de concreto

sequestro ou captura de CO_2, sendo uma das alternativas propostas para minimizar os efeitos da liberação de CO_2 associados à produção do cimento.

A captura de CO_2 devido à carbonatação em uma edificação é representada na Figura 1, onde se representa a ação do CO_2 em uma argamassa de revestimento. Na Figura 2 tem-se a representação da ação do CO_2 em um elemento de concreto durante sua vida útil e após sua demolição.

Destaca-se que o processo de carbonatação consiste na reação do dióxido de carbono (CO_2) com os produtos carbonatáveis presentes na matriz à base de cimento, especialmente o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$ - portlandita), formando carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e água (H_2O), conforme a Equação 2.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2)$$

Apesar de reduzir o pH do concreto, deixando o aço suscetível à corrosão, essa reação de captura do CO_2 da atmosfera é um processo reverso ao da produção do cimento (equação 1). Com isso, parte do CO_2 emitido no processo de descarbonatação pode ser capturado na reação química.

A captura de CO_2 deve ser considerada sobre dois aspectos: a captura potencial e a captura real. A captura potencial ou teórica é a máxima captura de CO_2 possível para o material em estudo. Em geral, não leva em consideração a relação "metros quadrados/metro cúbico de material (m^2/m^3)". Na literatura internacional, é conhecida como "capacidade de estocagem de carbono – CSC" (em inglês, *Carbon Storage Capacity*). Já, a captura real representa o total de CO_2 que foi ou pode ser efetivamente capturado pelo material em análise, levando em consideração os fatores de influência, especialmente a relação metro quadrado/metro cúbico.

Como vários fatores afetam a carbonatação dos materiais à base de cimento e, consequentemente, a captura de CO_2 devido a essa reação, ainda não se tem consenso na literatura sobre o tema, especialmente no que se refere aos quantitativos possíveis de serem capturados ao longo do ciclo de vida (vida útil + demolição) ou no processo de cura carbônica.

4. DETERMINAÇÃO OU ESTIMATIVA DA CAPTURA DE CO_2 DOS MATERIAIS À BASE DE CIMENTO

Materiais à base de cimento e cal, quando em contato com o CO_2, podem absorver CO_2 ao longo do tempo. A captura de CO_2 potencial (CSC) pode ser obtida por meio da equação 3.

$$CO_{2\text{-}CSC} = c \cdot CaO \cdot r \cdot M \quad (3)$$

Onde: *c* é a quantidade de ligante (clínquer ou cal) empregado para produzir um metro cúbico de material à base de cimento (ou seja, sem considerar as adições e sulfato de cálcio); *CaO* é a quantidade de óxido de cálcio contido no material; *r* é a proporção de CaO totalmente carbonatada, ou seja, transformada em $CaCO_3$ (essa variável também é conhecida como grau de carbonatação); e *M* é a fração molar do CO_2/CaO.

Caso o ligante em estudo contenha outros compostos carbonatáveis, como, por exemplo, o hidróxido de magnésio $Ma(OH)_2$, típico de cales dolomíticas, a equação precisa ser ajustada para cada o composto carbonatável presente no material (especialmente as variáveis quantidades de óxidos, grau de carbonatação e a fração molar). Com isso, é possível calcular o potencial de captura para cada composto do material, somando ao final os totais absorvidos.

Já para a determinação da captura efetiva de CO_2, a equação 4 deve ser empregada:

$$CO_{2up} = y \cdot c \cdot CaO \cdot r \cdot A \cdot M \quad (4)$$

Onde: *y* é a profundidade de carbonatação do material (em metros e *A* é a área superficial de material exposta à ação do CO_2 (em m^2)).

A medição da profundidade de carbonatação pode ser obtida pela

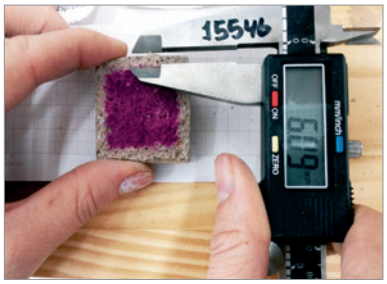


Figura 3
Medição da profundidade de carbonatação com o auxílio de paquímetro

medição direta (Figura 3) da frente de carbonatação em amostra fraturada, após a aplicação de um indicador de pH, como, por exemplo, a fenolftaleína.

Uma forma mais precisa para a determinação da quantidade de CO_2 capturada pela reação de carbonatação é por meio de análises termogravimétricas (TG/DTA) (Figuras 4 e 5).

A determinação da captura de CO_2 pode ser realizada por meio da comparação entre uma amostra carbonatada e outra não carbonatada, considerando a perda de massa dos compostos em relação à temperatura de ensaio, a partir de relações estequiométricas. A diferença entre as perdas de massa dos compostos da amostra carbonatada e não carbonatada confere o montante de CO_2 capturado na reação de carbonatação.

Os dois processos de determinação do total de CO_2 capturado apresentam limitações. O método que emprega análise termogravimétrica tende a ser mais preciso, uma vez que tem os valores reais para amostra em estudo, especialmente o grau de carbonatação. Já, o método da medição da profundidade carbonatada é de interesse especialmente para a construção de cenários. Logo, com a associação dos dois métodos, tem-se a melhor condição para estudos de captura de CO_2 de materiais à base de cimento e cal.

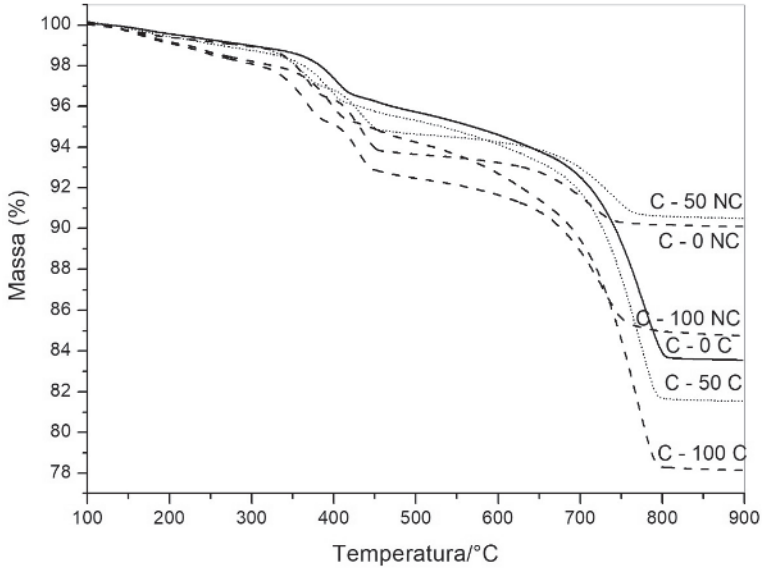


Figura 4
Curvas TG para as amostras de argamassas de zonas carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)

5. O CICLO DO CARBONO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

A captura de CO_2 em materiais à base de cimento pode se conseguida por meio do processo natural de carbonatação, que ocorre ao longo da vida útil e vai até a demolição do elemento à base de cimento, conforme ciclo apresentado na Figura 6.

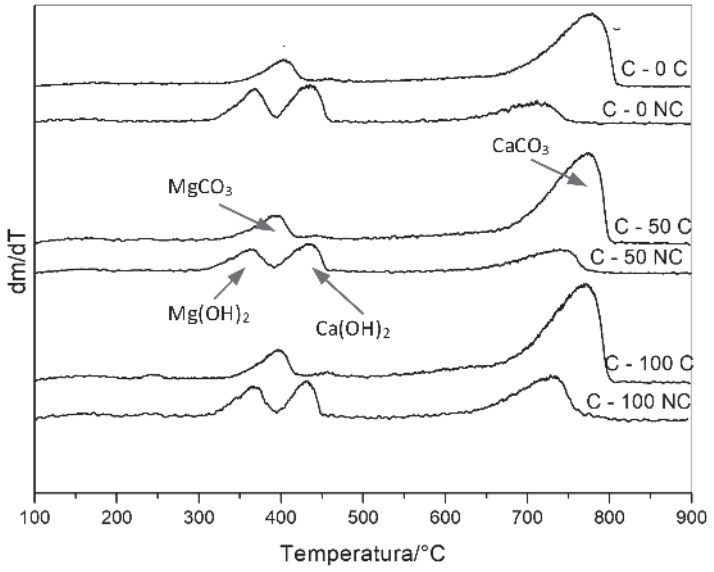


Figura 5
DTG para as amostras de argamassas de zonas carbonatadas (C) e não carbonatadas (NC)

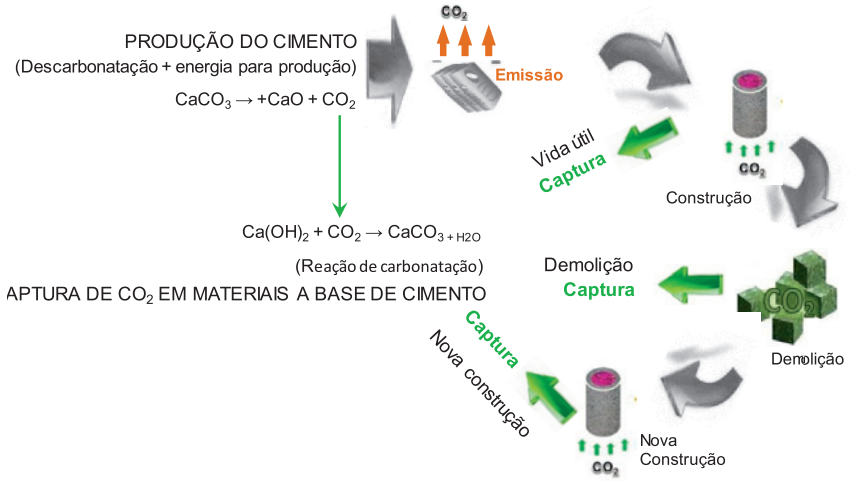


Figura 6
Captura de CO_2 durante o ciclo de vida da construção devido à carbonatação natural

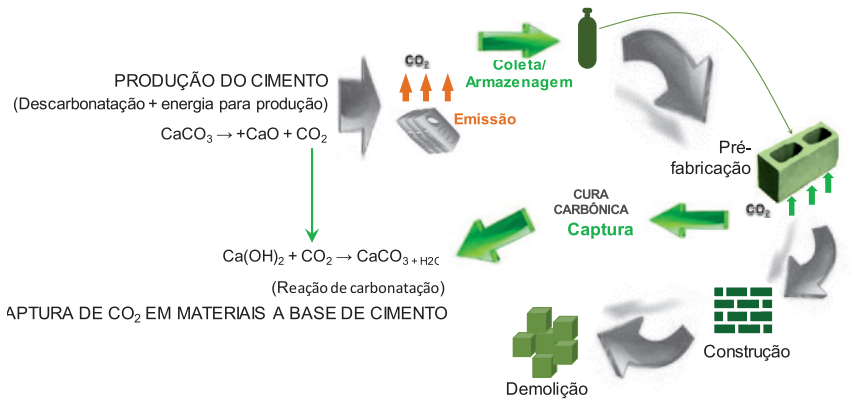


Figura 7
Captura de CO_2 devido à injeção de CO_2 durante a cura de materiais à base de cimento – *carbon cure*

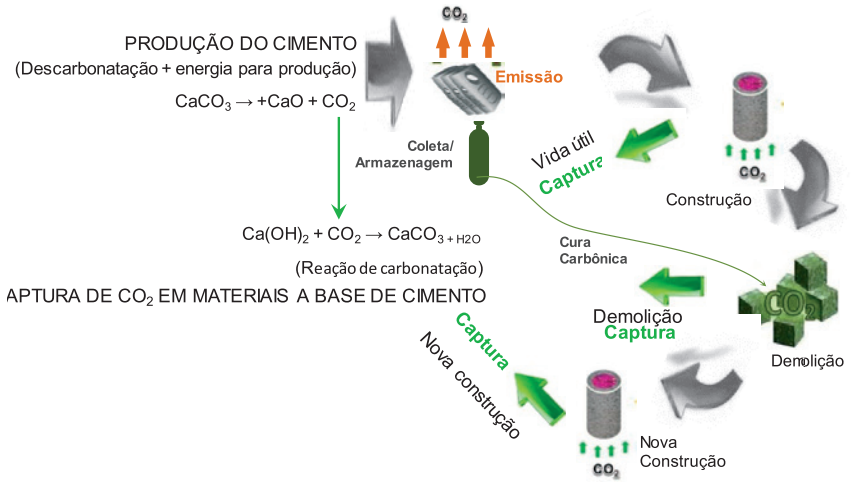


Figura 8
Captura de CO_2 durante o ciclo de vida da construção devido à carbonatação natural e à injeção de CO_2 no agregado reciclado de RCD

Outro processo de captura/estocagem de carbono em materiais à base de cimento se dá pela cura carbônica (*carbon cure*). Nesse processo, o CO_2 emitido na produção do clínquer é coletado diretamente do processo e posteriormente injetado em materiais à base de cimento, durante o processo de cura, conforme clico da Figura 7. A captura de CO_2 ocorre nas primeiras 24 horas após a produção de materiais à base de cimento, sendo que todo o potencial de captura pode ser alcançado. Sua principal aplicação com as tecnologias atuais encontra-se em elementos pré-fabricados, sendo necessários cuidados específicos em relação à descalcificação do C-S-H, principal produto do cimento hidratado, responsável pela resistência mecânica do material.

Conforme ciclo apresentado na Figura 8, o CO_2 coletado por processos diretos de captura também pode ser injetado no agregado reciclado de construção e demolição. Ou seja, ao fim da vida útil do elemento, faz-se o processamento dos materiais à base de cimento para a produção de agregados e injeta-se CO_2 como forma de tratamento do agregado. Esse processo pode ser bastante interessante, uma vez que, na cominuição do resíduo, tem-se uma elevação expressiva da área superficial do material, o que propicia uma maior captura de CO_2. Ainda, os agregados reciclados submetidos à carbonatação têm suas propriedades melhoradas, devido à redução da porosidade e à maior dureza superficial. Contudo, as tecnologias para viabilizar esse processo ainda precisam ser estudadas.

6. FATORES QUE AFETAM A CAPTURA DE CO_2 DEVIDO À CARBONATAÇÃO

Além dos fatores que afetam a

carbonatação, como ambiente de exposição, condições de exposição da estrutura/elemento, características do material e proteção superficial, a captura de CO_2 também é afetada pela área superficial exposta à ação do CO_2, sendo que quando maior a área superficial, maior a captura, conforme esquema representativo na Figura 9.

Essa influência é expressa pela "relação metros quadrados/metro cúbico de material (m^2/m^3)", ou seja, quantos metros quadrados de superfície exposta existem em um metro cúbico de um elemento à base de cimento. Por exemplo, conforme demostrado na Figura 10, um m^3 de uma dada argamassa de revestimento, pode revestir 50 m^2 de uma parede de alvenaria, se adotada uma espessura de revestimento de 20 mm. Se elevada a espessura para 30 mm, essa relação passa a ser de 33,3 m^2.

Para um elemento estrutural em concreto (viga, pilar), essa relação é bem inferior. Andrade e Sanjuan (2018) sugerem a adoção de uma relação igual a 3 (ou seja, um m^3 de concreto aplicado cobre uma área de 3 m^2). Quanto menor essa relação, menos efetiva é a captura de CO_2 ao longo do ciclo de vida de um material à base de cimento.

Destaca-se que a determinação dessa relação é o principal parâmetro para os cálculos de captura de CO_2 dos materiais à base de cimento, uma vez que a carbonatação do concreto ocorre do exterior para o interior do material, em um processo lento, quando em condições naturais de exposição ao CO_2, que depende de diversos fatores, conforme indicado na Figura 11.

Os revestimentos argamassados são de particular interesse, uma vez que são aplicados em pequenas espessuras, apresentando elevadas áreas de exposição ao CO_2, propiciando as condições ideais para a captura de CO_2 em curtos períodos de tempo. Resultados experimentais de Mazurana (2019) mostraram que, em menos 200 dias, uma argamassa de revestimento com 20 mm de espessura, sem

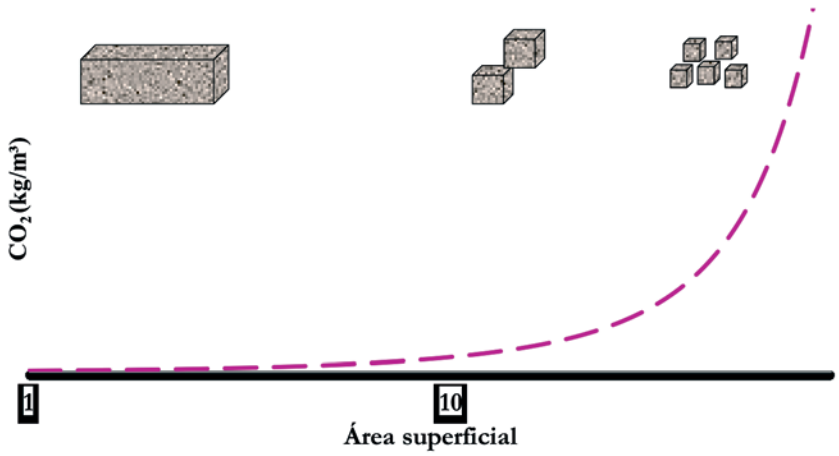


Figura 9
Efeito da área superficial na captura de CO_2 devido à carbonatação de materiais à base de cimento

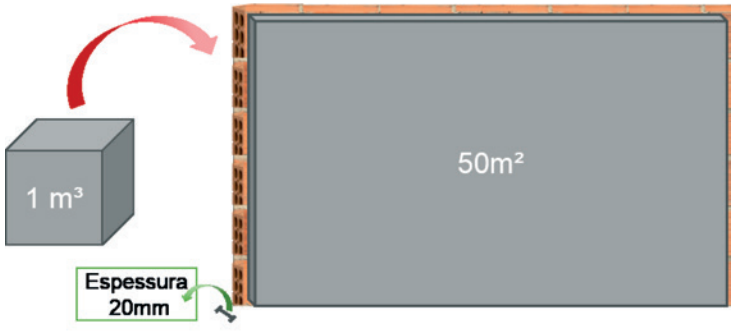


Figura 10
Relação entre 1 m^3 de argamassa e sua área aplicável considerando espessura média de 20 mm (cortesia Lissandra Mazurana)

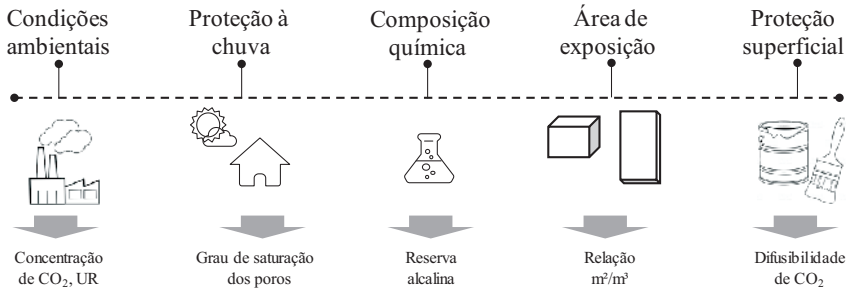


Figura 11
Fatores que afetam a captura de CO_2 (figura cortesia de Gabriel Rossetto Pedry)

proteção superficial, pode ser totalmente carbonatada, atingindo o potencial máximo de captura de CO_2. Elementos em concreto, como os pavimentos de concreto, blocos de concreto para pavimentação, meio-fios pré-fabricados e outros, também apresentam potenciais para a captura de CO_2. Além disso, todos esses elementos não possuem armadura, não gerando divergência ou controvérsias sobre o ponto de vista da durabilidade relacionada à carbonatação.

7. QUANTIDADE DE CO_2 QUE PODE SER CAPTURADO

Os estudos publicados até o momento apresentam divergência nos resultados apresentados, especialmente quanto ao potencial de captura de CO_2 no período pós-demolição, apontando que o concreto pode capturar de 10% a 57% do CO_2 emitido na fabricação do cimento. Alguns estudos relacionam este valor às emissões específicas do processo de descarbonatação, outros às emissões totais. Também há trabalhos que consideram a demolição da estrutura, onde os potenciais de captura (CSC) são mais elevados, podendo chegar a 100%.

Em um estudo global, Xi et al., (2016) estimaram que, entre os anos de 1930 e 2013, o potencial de captura de CO_2 atmosférico devido à carbonatação de materiais cimentícios (CSC) foi de 4,5 giga tonelada. Esse valor representa 43% das emissões de descarbonatação associada à produção de cimento nesse período. Em estudo mais recente, Andrade e Sanjuan (2018) afirmam, por meio de dados experimentais de ensaios de carbonatação de longa duração, que os materiais à base de cimento da Espanha podem capturar de 10,8% a 11,2% das emissões da calcinação, considerando a relação metro quadrado/metro cúbico igual a 3.

Contudo, com base nos estudos já publicados, a Associação Europeia do Cimento (Cembureau) enviou em 2018 uma proposta ao *IPCC* (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), solicitando que seja considerado no balanço das emissões da indústria do cimento o potencial de reabsorção de CO_2 de 25%, tendo em vista a carbonatação dos materiais a base de cimento. Porém, inúmeros trabalhos da literatura indicam valores maiores ou menores desse potencial (CSC), sendo temerário com os estudos atuais especificar esse valor como base. Mas faz-se necessário aguardar o parecer do IPPC em relação ao tema.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os materiais à base de cimento e cal podem capturar CO_2 devido à reação química de carbonatação, compensando em partes as emissões associadas ao processo de produção do clínquer, especialmente as emissões do processo de descarbonatação.

A captura de CO_2 em materiais à base de cimento e cal pode ocorrer por processos naturais ou acelerados. O primeiro ocorre durante o ciclo da vida da construção e no período pós-demolição. Já, o segundo (acelerado) se dá pela injeção de CO_2 tanto na cura carbônica nas primeiras idades do material hidratado, quanto em materiais já hidratados, como no tratamento de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.

A captura de CO_2 é influenciada pela reserva alcalina, grau de carbonatação, proteção superficial e, sobretudo, pela área exposta à ação de CO_2 dada pela relação "metros quadrados/metro cúbico de material (m^2/m^3)".

Com destaque recente, a captura de CO_2 pela carbonatação dos materiais à base de cimento e cal ainda é pouco difundida e conhecida, havendo várias divergências quanto à sua eficácia. Contudo, já existe a solicitação junto ao IPPC da Associação Europeia do Cimento de incluir esse processo como uma medida compensatória para o balanço das emissões do setor cimenteiro.

9. AGRADECIMENTO

Agradecimento especial a todos os alunos que atuam no projeto de Captura de CO_2, em especial a Isabela de Oliveira Antonio, Lissandra Mazurana, Eduardo Rigo e Gabriel Rossetto Pedry. Agradeço ao CNPq e a FPTI pelo fomento às pesquisas sobre o tema.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANDRADE, C.; SANJUÁN, M. A. Updating Carbon Storage Capacity of Spanish Cements. Sustainability, Basiléia, V.10, 2018.
[2] GNR Project. Dados do ano 2016. [S.l.], 2019. Disponível em: <http://www.wbcsdcement.org/GNR-2016/index.html>. Acesso em: 15 julho. 2019.
[3] POSSAN, E.; THOMAZ, W. A.; ALEANDRI, G. A.; FELIX, E. F.; SANTOS, A. C. P. CO_2 uptake potential due to concrete carbonation: A case study. Case studies inconstruction materials, Elsevier, v. 6, p. 147–161, 2017.
[4] MAZURANA, L. Captura de CO_2 em argamassas de revestimento através da carbonatação. 2019 Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira/PR.
[5] XI, F. et al. Substantial Global Carbon Uptake by Cement Carbonation. Nature Geoscience, ISSN 10.1038/NGEO2840, 2016.

Cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados

L. R. FORTUNATO – Doutoranda em Construção Civil
G. A. PARSEKIAN – Professor Doutor
Universidade Federal de São Carlos

A. NEVES JUNIOR – Professor Doutor
Universidade Federal de Mato Grosso

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Banco de Dados de Emissões para Pesquisa Atmosférica Global (EDGAR), em 2016 as emissões mundiais de CO_2 ultrapassaram 32 bilhões de toneladas. Neste contexto, a indústria cimenteira sozinha é responsável pela emissão global de 5 a 8% de dióxido de carbono (ALI, SAIDUR, HOSSAIN, 2011).

A sociedade deseja evoluir para um mundo mais justo em que todos tenham acesso a hospitais, escolas e moradias,e nada disso torna-se viável sem cimento. Logo, pode-se concluir que o consumo de materiais cimentícios está diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico de uma nação. No entanto, quanto mais cimento é consumido, mais CO_2 é emitido à atmosfera (SCRIVENER, JOHNM, GARTNER, 2016). Portanto, chega-se a um dilema, que pode ser solucionado com o desenvolvimento de novas tecnologias para redução da emissão e/ou captura de poluentes.

Desde 1930, alerta-se que a carbonatação traz consequências prejudiciais às estruturas de concreto armado, mas pouco se aborda sobre seus benefícios em determinadas situações. De fato, desde os bancos universitários, os engenheiros civis aprendem que a referida reação química é prejudicial, uma vez que acarreta a destruição da película passivadora que envolve o aço, deixando o material suscetível à corrosão, reduzindo a longo prazo a durabilidade da estrutura de concreto armado. Porém, este trabalho visa mudar o enfoque negativo conferido à carbonatação ao analisá-la sob a ótica sustentável, que é promovida quando se utiliza apenas o concreto simples (sem armadura). Observa-se que, ao se expor por pouco tempo (algumas horas) produtos à base de materiais cimentícios sem armadura recém-fabricados, sob cura em câmara de carbonatação com elevadas concentrações de CO_2 e em condições adequadas de umidade relativa, pressão e temperatura, ocorre o fenômeno da carbonatação acelerada. Essa carbonatação ao promover a captura do CO_2 presente na atmosfera da câmara resulta em ganhos de resistência mecânica, cujos valores são comparáveis aos obtidos em 28 dias quando se utiliza o processo de cura convencional [SHAO et al. (2006), GALAN et al. (2010), WANG et al. (2012) e ZHAN B. et al. (2013)].

Assim sendo, o presente artigo foi desenvolvido com o intuito de apresentar um estado da arte, evidenciando o que vêm sendo realizado no que é referente à cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados, os resultados obtidos e os avanços alcançados.

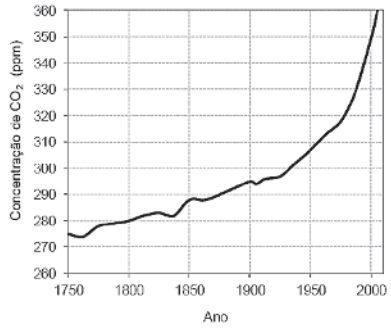
2. ABORDAGEM TEÓRICA

2.1 A construção civil e o efeito estufa

Sabe-se que o efeito estufa é responsável por manter a Terra aquecida, uma vez que atua evitando que os raios solares sejam refletidos para o espaço. Caso ele não existisse a Terra possuiria temperaturas médias inferiores a -10ºC. O grande problema é causado pelo homem, que, com suas intensas atividades,

emite enormes quantidades de CO_2 à atmosfera, acarretando o aumento do efeito estufa (BEIROZ, 2011). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC, sigla em inglês (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (2007) projeta que, até 2100, a concentração de CO_2 poderá alcançar valores que variam de 535 a 985 ppm, correspondendo a um aumento de 41 a 158% em relação aos patamares atuais. A Figura 2.1 demonstra que, após a Revolução Industrial, a concentração global de CO_2 aumentou exponencialmente, corroborando com o fato de que o excesso das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera é advindo das ações humanas.

De acordo com VITO (2001), os procedimentos utilizados para a produção/obtenção dos insumos empregados na construção civil são responsáveis por grande parcela dos gases causadores do efeito estufa, dentre eles destacam-se: cimento, cal, aço, areia e brita (retirada e transporte), queima de combustíveis fósseis, entre outros.



Fonte: Yoon, Çopuroğlu e Park (2007)

Figura 2.1
Concentração global de CO_2 na atmosfera no decorrer dos anos

2.2 Reação de carbonatação acelerada

Através da reação de carbonatação, a qual possui natureza exotérmica, os produtos de hidratação do cimento, sendo o principal deles o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), reagem com o CO_2, gerando produtos à base de carbonato e gel de sílica. A reação principal de carbonatação ocorre entre o $Ca(OH)_2$ e o CO_2 na presença de água e é apresentada na equação 1.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \xrightarrow{H_2O} CaCO_3 + H_2O \quad (2.1)$$

Numerosos estudos realizados na segunda metade do século XX revelaram que não só $Ca(OH)_2$, mas também C-S-H pode ser submetido à carbonatação. De fato, relata-se que a carbonatação do hidrato silicato de cálcio ocorre em um segundo momento, quando a maior parte do hidróxido de cálcio já foi consumido (MORANDEAU et al., 2014). A reação é apresentada na equação 2.

$$3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3CO_2 \rightarrow 3CaCO_3.2SiO_2.3H_2O \quad (2.2)$$

O principal produto formado pelas reações de carbonatação é o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), o qual é insolúvel e aparece na forma mineralógica como calcita, vaterita e, raramente, na forma de aragonita (SMOCZYK, 1976).

De acordo com a composição química do cimento, a presença de adições leva à formação de outros tipos de hidratos em menor quantidade, dentre os quais destacam-se Mg(OH)2, KOH e NaOH, que também sofrem carbonatação e geram carbonatos como produtos.

2.3 Cura por carbonatação acelerada

A cura de produtos não armados à base de materiais cimentícios por meio da carbonatação acelerada vem diretamente ao encontro da necessidade industrial relacionada ao aumento da produção e ganho de tempo, uma vez que o tempo de cura pode ser extremamente reduzido. Além disso, a cura com CO_2 em materiais cimentícios não armados promove a absorção de CO_2 do meio e ganhos rápidos de resistência mecânica. Diversos estudos de Ye (2003), Bertos et al. (2004), Shao et al. (2006), Galan et al. (2010), Zhan B. et al. (2013), Neves Jr (2014), Jang et al (2015), D. Zhang et al. (2016), evidenciam que a referida cura, além de capturar CO_2, promove a densificação da microestrutura e alterações nas ligações químicas dos produtos cimentícios, levando ao aumento de resistência mecânica e durabilidade. Ademais, através da literatura, é possível verificar os bons resultados quanto ao ganho de resistência verificados para situações em que a cura por CO_2 substitui totalmente ou parcialmente a cura úmida e/ou cura térmica, tradicionalmente empregados. Morshed e Shao (2013) verificaram que a cura por CO_2 possui duração consideravelmente menor do que as curas tradicionais, além de valores importantes relacionados à elevada resistência e à baixa permeabilidade do concreto. Boyd et al (2012) compararam a cura por carbonatação acelerada com a cura à vapor e verificaram que, após a cura por

carbonatação, o concreto passa a exibir maior resistência à permeabilidade de cloretos e a ataques de sulfatos, e menores danos foram observados por congelamento e descongelamento. Tais fatos foram atribuídos ao teor significativamente reduzido de hidróxido de cálcio na superfície do concreto carbonatado. Alguns estudos têm combinado a cura com CO_2 com as curas tradicionais, por exemplo, He et al. (2016) submeteram amostras à cura com CO_2 , com posterior hidratação. Essa pós-hidratação através da cura com água aumentou a formação de C-S-H, etringita e monocarboaluminato, os quais promoveram a diminuição da porosidade da matriz cimentícia. Já Pauletti (2004) analisou a cura úmida, realizada antes da cura com CO_2, e verificou que a cura submersa ou úmida promoveu condições satisfatórias para hidratação do cimento mas acabou ocasionando o fechamento dos poros, reduzindo a velocidade da reação de carbonatação. Esses antecedentes desestimulam a adoção dessa ordem de cura para absorção do CO_2. Lo e Lee (2002) compararam a cura ao ar com a cura úmida realizadas anteriormente à cura por CO_2 e observaram que concretos curados em água apresentam apenas 72% da carbonatação dos concretos curados ao ar. Os estudiosos concluíram que a cura ao ar faz com que os poros fiquem mais abertos, o que propicia o aumento da quantidade de canais intercomunicáveis e consequente aumento da velocidade de difusão de dióxido de carbono.

2.4 Vantagens da cura por carbonatação acelerada

2.4.1 Resistência mecânica e durabilidade

Segundo Ye (2003), Shao et al. (2006), Galan et al. (2010), Wang et al. (2012), Zhan B. et al. (2013), Yuan et al. (2013), Neves Jr (2014), Jang et al (2016), Bertos et al. (2017), D. Zhang et al. (2017), obedecendo-se as condições necessárias de umidade relativa, pressão, concentração de CO_2 e temperatura, a cura por carbonatação acelerada em poucas horas proporciona à amostra elevados valores de resistência mecânica à compressão, os quais pelo processo de cura convencional, somente seriam obtidos com o passar de vários dias. Tal fato ocorre porque a reação de carbonatação gera como produto $CaCO_3$, que se precipita nos poros, alterando a porosidade, aumentando a densidade e a resistência do material cimentício.

2.4.2 Absorção de CO_2

Com o intuito de reduzir a presença de gases do efeito estufa na atmosfera, a tecnologia do sequestro de CO_2 em pré-fabricados não armados tornou-se uma dentre várias estratégias utilizadas no controle do aquecimento global. A referida técnica, além da questão ambiental, agrega grande valor econômico, uma vez que envolve o mercado mundial de créditos de carbono.

El-Hassan e Shao (2013) destacam que o uso comercial do CO_2 nos processos de cura nas indústrias agrega ainda mais valor ao dióxido de carbono. Atualmente, empresas como *CarbonCure Technologies Inc*, *Solidia Technologies*, *Calera Corporation*, *TecEco Pty. Ltd*, *Calix Ltd*. e *Kajima Corporation* têm reutilizado beneficamente o CO_2 na cura, fabricação e modificação de cimentos (JANG et al, 2016).

Verifica-se que, ao se expor por pouco tempo (algumas horas), o material cimentício sem armadura recém-fabricado, ou seja, com pouca idade de cura em câmara de carbonatação, com elevadas concentrações de CO_2, condições adequadas de umidade relativa, pressão e temperatura, ocorre o fenômeno da carbonatação acelerada, o qual promove a captura do CO_2 presente na atmosfera da câmara. O CO_2 sequestrado pode ser quantificado através de diferentes métodos, dentre eles destacam-se a termogravimetria, curva de massa e ganho de massa [(WANG et al. (2012) e YUAN et al. (2013)].

2.5 Estudos sobre o processo de cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados

Diversos estudos envolvendo a utilização da cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados têm sido realizados para o desenvolvimento de um processo de cura que possa ser implementado em escala industrial e que seja capaz não apenas de criar as condições ideais para que o produto adquira resistência à compressão exigida por norma, mas também seja sustentável ao promover

a absorção de CO_2 da atmosfera.

As Tabelas 2.1 e 2.2 reúnem artigos nacionais e internacionais publicados dentro dos últimos dezesseis anos e mostram informações relacionadas aos fatores que influenciam na carbonatação dos concretos, como início de cura, tempo de exposição, concentração de CO_2, umidade relativa, temperatura, bem como sua correlação com ensaios naturais, além dos resultados obtidos e os avanços alcançados.

3. ANÁLISE DAS PESQUISAS

Analisando-se as pesquisas relacionadas à cura com carbonatação em pré-fabricados cimentícios não armados apresentadas neste artigo, observou-se que:

- A maioria dos estudos utilizou concentração de CO_2 no interior da câmara em torno de 100%;
- Os blocos de concreto absorveram mais CO_2 e provavelmente isso se deva à menor espessura das paredes do bloco e à menor pressão de compactação durante sua produção, permitindo uma maior difusividade de CO_2;
- Verificou-se também que os materiais cimentícios que receberam spray de água após a cura por carbonatação acelerada apresentaram melhores valores de resistência mecânica do que os carbonatados sem spray de água - concluiu-se que tal resultado é decorrente do fato de que, ao receber a água após a cura, o corpo de prova elevou sua umidade interna, permitindo que as reações de hidratação e consequente ganho de resistência continuassem de forma mais vigorosa com o passar dos dias;
- Em todas as pesquisas, verificou-se a captura CO_2 e ganho de resistência.

Portanto, não resta dúvida de que a cura por carbonatação acelerada é um processo promissor para mitigação de CO_2 da atmosfera e passível de ser implementado em escala industrial.

4. CONCLUSÕES

O anseio da sociedade em progredir na direção de um mundo mais justo implica o aumento do ambiente construído. Esta tarefa manterá ou elevará ainda mais a demanda por materiais à base de cimento com o passar dos anos. Hospitais, escolas, barragens, pontes, viadutos, imponentes arranha-céus, habitações unifamiliares - nada disso seria possível sem o cimento. Para tanto, o desenvolvimento de alternativas sustentáveis visando à redução da concentração de CO_2 na atmosfera devem ser incentivadas.

Neste sentido, a tecnologia para captura e armazenamento de CO_2 em materiais cimentícios não armados promete ser promissora, ao passo que contribui para mitigação do gás carbônico presente na atmosfera.

A difusão dessa técnica em pré-fabricados de concreto vem se

▶ **Tabela 2.1 – Pesquisas sobre a cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados**

Autores	Amostras	Tempo e tipo de cura inicial	Tempo de cura por carbonatação	Câmara de carbonatação				Absorção de CO_2 (%)	Resistência compressão
				Concentração de CO_2 (%)	Pressão	T(°C)	Umidade (%)		
[1] Ye (2003)	Cubos (100 mm) concreto seco	sem cura inicial	2 hs	100	5 bar	ambiente	–	7,0 - 8,0	Resistência do concreto carbonatado é maior que a referência
[2] Shao et al (2010)	Bloco, paver e placas	sem cura/ estufa	2 hs	100	500 KPa	45 - 95	–	9,8 - 19,0	7,8 – 10,5 MPa após 2 hs de carbonatação
[3] Shao e Lin (2011)	Paver	2hs e 19 hs cura úmida	4 hs - 5 hs	99,5	1,5 bar	56	65	3,4 - 7,4	31 MPa - 46 MPa
[3] Shao e Lin (2011)	Amostra de concreto slump zero	sem cura inicial	2 hs	99,5	1,5 bar	40 - 56	65	11,7	9,6 MPa: incremento de 60% com relação a referência aos 28 dias)

[1] YE, G., 2003, — Carbon Dioxide Uptake By Concrete Through Early-Age Curing II. M.Sc Disserta-tion, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canadá.
[2] SHAO Y., MONKMAN S., WANG S., — Market analysis of CO_2 sequestration in concrete building products II. 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Italy, Ancona, 28–30 June 2010.
[3] SHAO Y., LIN.X. Early-Age Carbonation Curing of Concrete Using Recovered CO_2. ACI Committee 236, Material Science of Concrete. Concrete international. 2011.

▶ **Tabela 2.2 – Pesquisas sobre a cura por carbonatação acelerada em pré-fabricados cimentícios não armados (continuação)**

Autores	Amostras	Tempo e tipo de cura inicial	Tempo de cura por carbonatação	Câmara de carbonatação				Absorção de CO_2 (%)	Resistência compressão
				Concentração de CO_2 (%)	Pressão	T(°C)	Umidade (%)		
[4] Rostami et al (2012)	Pasta de cimento, a/c = 0,36	18 hs cura de hidratação	2 hs	100	0,15 MPa	ambiente	–	8,9	Incremento de resistência de 61% em relação a referência
[5] Boyd et al (2012)	Concreto slump zero, a/c = 0,36	18 hs cura ao ar livre	2 hs e 2 hs + spray de água	100	0,15 MPa	25	–	7,0 - 9,0	Resistências com spray de água posterior a carbonatação comparáveis aos não carbonatados com cura térmica
[6] El - Hassan et al (2013)	Blocos de concreto com escória de alto-forno	Cura ao ar livre de 0 hs, 4 hs, 6 hs, 8 hs e 18 hs	2 hs, 4 hs e 96 hs	100	1 bar	25	50	9,0 - 35,0	Maiores resistências para maiores tempos de carbonatação
[7] Zhan B. et al (2013)	Blocos de concreto com agregados reciclados	Sem cura inicial	6 hs, 12 hs e 24 hs	100	0,1 bar	–	–	22,49 - 43,96	Ganhos de resistência variando de 108% a 151% dentro das 24hs de carbonatação
[8] El - Hassan e Shao (2015)	Blocos de concreto produzidos em fábrica manual	Cura ao ar livre de 0 hs, 4 hs, 6 hs, 8 hs e 18 hs e cura térmica	2 hs, 4 hs e 96 hs	100	1 bar	25	50	8,3 - 35,1	Resistências com spray de água posterior a carbonatação comparáveis aos não carbonatados com cura térmica
[9] Fortunato et al (2018)	Peças de concreto para pavimentação	12 hs cura ao ar livre e 12 hs cura inicial a vapor	4 hs e 16 hs	20	1 bar	23	65	1,5 - 5,1	39,7 - 46,4 MPa

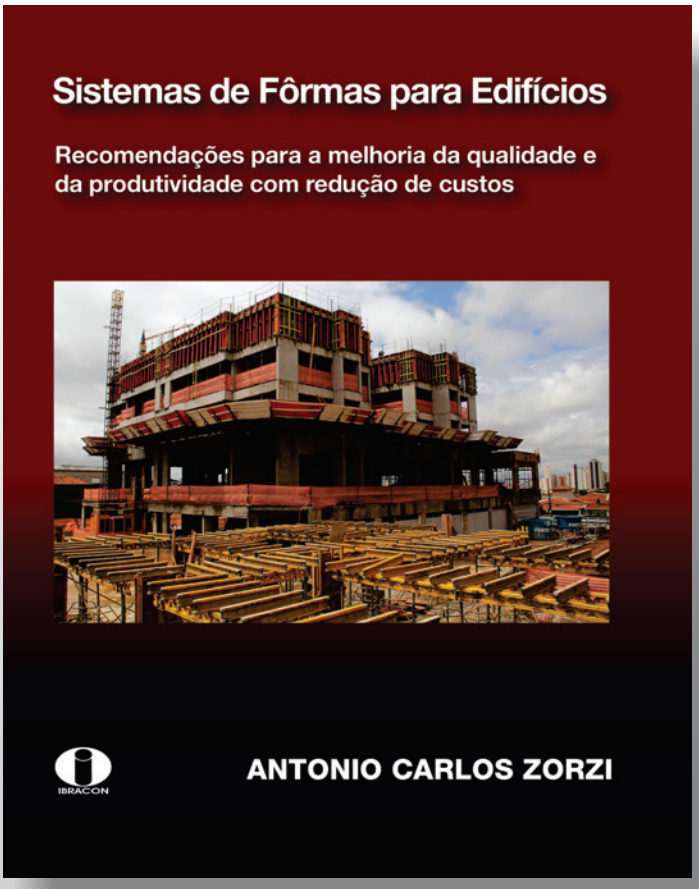
[4] ROSTAMI V., SHAO Y., BOYD AJ. — Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. Cement Concrete Research, n.42, v.1, pp 186–93, 2012.
[5] Boyd, Andrew J., Rostami, V., Shao, Y. Carbonation Curing versus Steam Curing for Precast Con-crete Production. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 24, No. 9, September 1, 2012.
[6] El-Hassan,H, Shao Y, Ghouleh,Z. Effect of Initial Curing on carbonation of Lightweight Concrete Masonry Units, ACI Materials Journal/July-August 2013.
[7] Zhan Baojian, Poon Chisun, Shi Caijun. CO2 curing for improving the properties of concrete blocks containing recycled aggregates. Cement & Concrete Composites 42 (2013), p. 1–8, China, 2013.
[8] El-Hassan, H, Shao, Y, Early carbonation curing of concrete masonry units with ortland limestone cement, Cement & Concrete Composites 62 (2015) 168–177.
[9] Fortunato, L. R., Parsekian, G. A., Neves, J. A., Captura de CO_2 em peças de concreto para pavimentação através da cura por carbonatação acelerada. UFSCar – Universidade de São Carlos, Dissertação de Mestrado. 2018.

juntar aos esforços da indústria de cimento para mitigar as emissões em seu processo de fabricação, que, no Roadmap global , revisado em 2018, fez a previsão de que a captura e armazenamento de CO_2 será responsável por 48% da mitigação que se pretende alcançar até 2050.

Por fim, as pesquisas apresentadas, além de valiosas por seu caráter de sustentabilidade, relacionado à captura permanente de CO_2 e redução da emissão de gases de efeito à atmosfera, de uma forma geral, mostraram o quão satisfatória e promissora pode se mostrar a substituição dos processos de cura tradicionalmente empregados pela cura por carbonatação acelerada para o ganho de resistência inicial nos pré-fabricados cimentícios. Na maioria dos estudos, foram obtidos bons resultados nas propriedades físicas e mecânicas dos produtos produzidos com cura por carbonatação, em geral superiores aos obtidos para os produtos de referência produzidos com cura tradicional da fábrica, usualmente à vapor.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ali M B, R. Saidur, M.S. Hossain. A review on emission analysis in cement industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2011) 2252–2261.
[2] BEIROZ, H. Efeito estufa. Rio de Janeiro: Simonsen – faculdades e colégios, 2011. 5 p. Apostila.
[3] Bertos Fernández M, S.J.R. Simons. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO_2. Journal of Hazardous Materials B112 (2004).
[4] D. Zhang, Y. Shao. Early age carbonation curing for precast reinforced concretes, Constr. Build. Mater. 113 (2016) 134–143.
[5] GALAN, I.; Andrade C.; Mora, P.,Sanjuan,M. Sequestration of CO_2 by Concrete Carbonation. Envorimental Science and Tecnology. Vol. 44, 2010.
[6] He P., et al., Effect of further water curing on compressive strength and microstructure of CO_2-cured concrete, Cem. Concr. Compos. 72 (2016) 80–88.
[7] IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2007: the physical science basis - Summary for policymakers". Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 2007.
[8] INSTITUT WALLON DE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE ET SOCIAL ET D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ASBL. IDD – Institut Wallon – VITO. Greenhouse gas emissions reduction and material flows. 2001. Disponível em <http://www.belspo.be/belspo/home/publ/pub_ostc/CG2131/rappCG31_en.pdf>. Acessado em 27/11/2018.
[9] Jang, J.G., Kim, H.J., Park, S.M., Lee, H.K., The influence of sodium hydrogen carbonate on the hydration of cement. Constr. Build. Mater. 94 (2015).
[10] Lo,Y., Lee,H. Curing effects on carbonation of concrete using a phenolphthalein indicator and Fourier-transform infrared spectroscopy, Build. Environ. 37 (5) (2002) 507–514.
[11] Morandeau A., M. Thiéry, P. Dangla, Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, Cem. Concr. Res. 56 (2014).
[12] Morshed A.Z., Y. Shao, Influence of moisture content on CO_2 uptake in lightweight concrete subject to early carbonation, J. Sustainable Cement-Based Mater. 2 (2) (2013) 144–160.
[13] NEVES, J,A.; Captura de CO_2 em Materiais Cimentícios através da Carbonatação Acelerada / Alex Neves Junior – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.
[14] Pauletti, C. ANÁLISE COMPARATIVA DE PROCEDIMENTOS PARA ENSAIOS ACELERADOS DE CARBONATAÇÃO. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
[15] Scrivener, K.L., John V. M., Gartner, E. M. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO_2, cementbased materials industry. UNEP – United Nation Environment Program, 2016.
[16] SHAO Y., ZHOU X., MONKMAN S., —A new CO_2 sequestration process via concrete products production. EIC Climate Change Technology, Canada, Ottawa, 10-12 May 2006.
[17] SMOCZYK, H. G. Physical and chemical phenomena of carbonation. In: RILEM COLLOQUIUM ON CARBONATION OF CONCRETE, [s. ed], 1976. Proceedings... 1976. Paper 1.1, 10p.
[18] WANG, YC., CHANG, EE., PAN, SY., et al. — CO_2 capture by using blended hydraulic slag cement via a slurry reactorII, Aerosol and Air Quality Research, v.12, n.6, pp 1433-1443, 2012.
[19] YOON, In-S.; ÇOPUROĞLU, O.; PARK, Ki-B. Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete. Atmospheric Environment, v 41, n 34, p.7274-7285, 2007.
[20] YUAN, C., NIU, D., CHEN, N., et al. —Influence of carbonation on microstructure of concrete.II, Guisuanyan Tongbao, v.32, n.4, pp.687-691, 2013.



SISTEMAS DE FÔRMAS PARA EDIFÍCIOS: RECOMENDAÇÕES PARA A MELHORIA DA QUALIDADE E DA PRODUTIVIDADE COM REDUÇÃO DE CUSTOS

Autor: Antonio Carlos Zorzi

O livro propõe diretrizes para a racionalização de sistemas de fôrmas empregados na execução de estruturas de concreto armado e que utilizam o molde em madeira

As propostas foram embasadas na vasta experiência do autor, diretor de engenharia da Cyrela, sendo retiradas de sua dissertação de mestrado sobre o tema.

DADOS TÉCNICOS

ISBN 9788598576237
Formato: 18,6 cm x 23,3 cm
Páginas: 195
Acabamento: Capa dura
Ano da publicação: 2015

Patrocínio

PERI®

Aquisição:
www.ibracon.org.br
(Loja Virtual)

Cimentos álcali-ativados: análise de carbonatação inicial em ambiente natural

MARIANA PERARDT | LUCAS CECONI KRETSCHMER | HENRIQUE LEONARDO BATISTA PEREIRA
DOUGLAS EVERTON CADORE | CAROLINE ANGULSKI DA LUZ
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – UTFPR – CAMPUS PATO BRANCO

1. INTRODUÇÃO

Muitos estudos que visam desenvolver cimentos álcali-ativados (CAT's), nos quais o aglomerante é unicamente um subproduto mineral aluminossilicato, como a escória de alto-forno, vêm sendo realizados. A hidratação desse cimento acontece por meio de uma substância ativadora alcalina que eleva o pH da mistura, solubilizando a escória.

Dados acerca da durabilidade do CAT relacionada ao processo de carbonatação, causado pela penetração de CO_2 na estrutura, ainda são reduzidos. A relevância desse processo está principalmente na redução da alcalinidade do concreto para um pH abaixo de 10, que, em estruturas de concreto armado, provoca a despassivação e consequente corrosão das armaduras (TORGAL *et al.*, 2012).

O processo se inicia quando o dióxido de carbono reage com a água, gerando o ácido carbônico (H_2CO_3). Este, por sua vez, passa a reagir com os compostos hidratados do cimento. No concreto de cimento Portland, esse ácido ataca primeiramente a portlandita (CH) e, quando esta é totalmente consumida, pode também atacar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto da hidratação do cimento que mais contribui com a resistência mecânica. Essas duas reações têm como produtos o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e a água, que reduzem a basicidade do meio (TORGAL *et al.*, 2012; BEHFARNIA & ROSTAMI, 2017).

Quando o concreto é à base de CAT de escória, no processo de hidratação não há formação de portlandita. Assim, em uma situação de carbonatação, o H_2CO_3 ataca diretamente o C-(A)-S-H (silicato de cálcio hidratado com teor de substituição de alumínio) (PUERTAS *et al.*, 2006).

Através da redução da alcalinidade do meio causada por essas reações, é possível obter índices de carbonatação através da profundidade do concreto em que se verifica redução do pH, a chamada profundidade de carbonatação.

A concentração de CO_2 na atmosfera global é aproximadamente 400 ppm, ou seja, 0,04% (Earth System Research Laboratory, 2016 *apud* BEHFARNIA & ROSTAMI, 2017). A penetração desse gás em um material como o concreto é consequentemente lenta. Devido a isso, ensaios de carbonatação na forma acelerada, expondo os materiais a concentrações maiores de CO_2 em condições controladas, são frequentes.

Bernal *et al.* (2012b), no entanto, verificaram que esses ensaios de carbonatação acelerada devem ter seus resultados analisados com cautela, uma vez que condições assim extremas reduzem o pH interno do concreto a níveis que jamais seriam alcançados pelo processo natural de carbonatação. Assim, esse método de ensaio pode levar a uma previsão de vida de serviço subestimada.

O presente trabalho procura testar o CAT de escória quanto ao processo de carbonatação em condições naturais de ensaio através de medidas de profundidade de carbonatação, resistência à compressão e análise da microestrutura, comparando seu desempenho com o cimento Portland. Compara ainda resultados de profundidade de carbonatação para ambas as condições acelerada e natural.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

O mineral precursor utilizado para

fabricação do CAT nesse estudo foi escória de alto-forno (relação CaO/SiO_2 igual a 0,97), proveniente de forno a carvão vegetal. Possui massa específica igual a 2,76 g/cm³, superfície específica igual a 4307 cm²/g e sua composição química é apresentada na Tabela 1.

O ativador alcalino utilizado foi hidróxido de sódio (NaOH) em pérolas e seu teor foi definido em 5% da massa de escória para todas as amostras.

O cimento Portland escolhido para comparação foi o cimento Portland pozolânico, CP IV. Os agregados utilizados foram areia natural e brita 0 (faixa de diâmetro entre 4,80 e 6,30 mm.

2.2 Preparação das amostras

As pastas, para posterior análise da microestrutura, foram preparadas com uma relação água/aglomerante de 0,45. A mistura foi realizada por dispositivo mecânico e utilizou-se como moldes recipientes plásticos de volume igual a 50 cm³.

Para o preparo dos concretos, o procedimento de mistura foi através de dispositivo mecânico. Para os ensaios de resistência à compressão, foram moldados em molde prismático de 4 x 4 x 16 cm. Para medidas de profundidade de carbonatação, moldou-se corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm. Ambos os traços foram de 1 : 2 : 3 : 0,5 (aglomerante : areia : brita : água).

O tempo de cura para todas as amostras de pasta e concreto foi de 28 dias, em ambiente de RH > 95% e temperatura de 23 ± 2ºC.

As amostras a serem condicionadas à carbonatação natural foram posicionadas, após a cura, no ambiente do estacionamento do bloco J1 da UTFPR – *Campus* Pato Branco, para avaliação do material em serviço na idade de 90 dias.

Para carbonatação acelerada, esse estudo fez uso de câmara de carbonatação, com controle automatizado do teor de dióxido de carbono, umidade relativa e temperatura do ambiente interno. Optou-se por utilizar a câmara com teor constante de 5 ± 1% de CO_2, umidade relativa de 60 ± 0,5% e temperatura de 23 ± 0,1ºC.

2.3 Análise da microestrutura

Foram moldadas amostras de pasta para análise da microestrutura por difratometria de raios X (DRX), uma para cada idade (28). Em cada idade, uma das amostras foi fragmentada e imersa em acetona por 2h e depois seca em estufa a 40 ± 2ºC por 24h para interromper a hidratação. A amostra era, então, triturada até a granulometria de 150 µm. A análise foi realizada com os seguintes parâmetros: comprimento de 1,54 Å; intervalo de leitura de 5° a 80° (2θ); passo de 0,02°, com tempo de 0,4 segundos, para cada passo; radiação de Cu-Kα e voltagem da corrente de 40kV.

2.4 Resistência mecânica

Os prismas de 4 x 4 x 16 cm foram todos rompidos à flexão na primeira idade. As suas metades foram na sequência utilizadas para ensaio de resistência à compressão nas idades de 28 e 90 dias.

2.5 Profundidade de carbonatação

Para esse ensaio, foram utilizados

Tabela 1 – Composição química da escória de alto-forno

Óxidos	%
SiO_2	38,1
CaO	37,0
Al_2O_3	13,9
MgO	6,2
Fe_2O_3	1,3
MnO	1,1
K_2O	0,9
TiO_2	0,8
Na_2O	0,2
SO_3	0,1

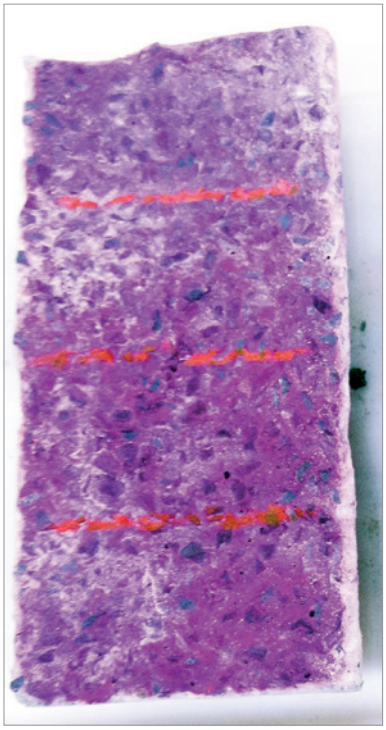


Figura 1
Corpo de prova preparado para medida de profundidade de carbonatação com fenolftaleína. Medidas realizadas em 3 pontos igualmente espaçados em cada face

os corpos de prova de concreto expostos à carbonatação natural e acelerada. O procedimento consistiu em romper o corpo de prova à compressão diametral, partindo-o ao meio. Na sequência, com um borrifador, aplicava-se uma solução do indicador ácido-base fenolftaleína. Após estabilização do indicador na amostra, as medidas de profundidade de carbonatação eram realizadas com um paquímetro em três pontos igualmente espaçados em cada lado da amostra, como mostra a Figura 1.

3. RESULTADOS

3.1 Resistência mecânica

Os dados de resistência à compressão são apresentados na Tabela 2. Na primeira idade, com a qual os materiais ainda não haviam sido expostos ao ambiente externo propício à carbonatação, o concreto de CAT mostrou resistência superior à do concreto de CP IV. No entanto, aos 90 dias, que correspondem a 60 dias de exposição, a resistência do CP IV manteve-se crescendo significativamente (41,4%), superando a do concreto de CAT. Este, por sua vez, nessa idade apresentou pouco desenvolvimento de resistência em comparação (somente 8,3%), mas nenhum dos materiais perdeu resistência. Visivelmente, nenhum sinal de deterioração foi observado.

Tabela 2 – Resistência à compressão de concreto de CAT exposto ao processo de carbonatação natural

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	
	CAT	CP IV
28	32,97	30,13
90	35,69	42,61

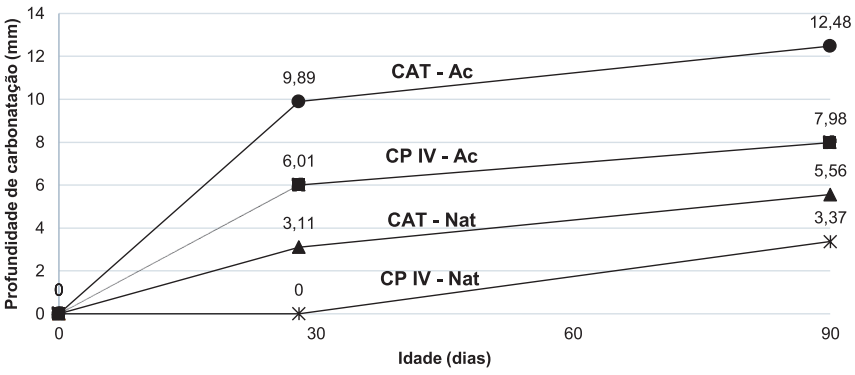


Figura 2
Gráfico da profundidade de carbonatação comparativa entre CAT e CP IV, expostos à carbonatação natural e acelerada

3.2 Profundidade de carbonatação

O gráfico das medidas de profundidade de carbonatação nas condições natural e acelerada do CAT e do CP IV é apresentado na Figura 2. O CAT 90 dias, sujeito à carbonatação acelerada, apresentou profundidades de carbonatação cerca de 124% maiores do que as do mesmo material em condições de carbonatação em serviço. Para o CP IV, essa diferença foi maior, em torno de 135%.

O CAT, de modo geral, mostra-se com maior difusividade de gases CO_2, uma vez que nesse material houve maior facilidade e rapidez para penetração e difusão das substâncias agressivas e, consequentemente, maiores medidas de frente de carbonatação. A menor velocidade de avanço da frente de carbonatação do concreto de CP IV, se deve, em tese, à sua composição e estrutura interna mais compacta.

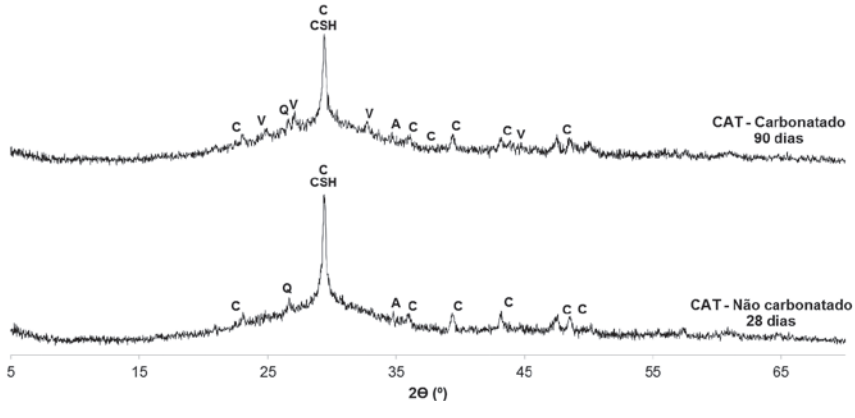


Figura 3
Difratograma de CAT não carbonatado, aos 28 dias, e 90 dias, exposto à carbonatação. Carbonatação em ambiente natural
(C: calcita, V: vaterita, A: alita)

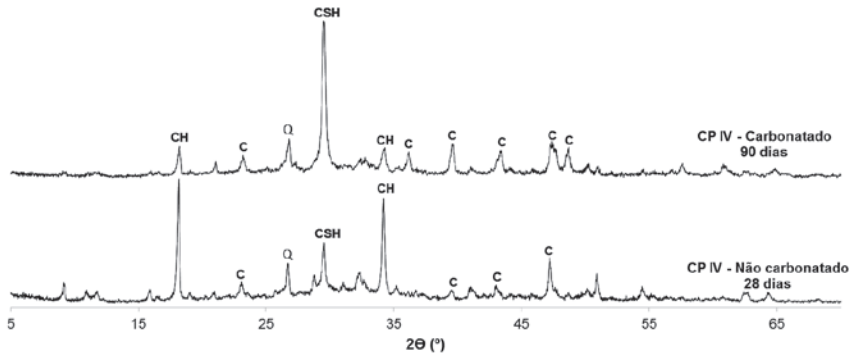


Figura 4
Difratograma de CP IV não carbonatado, aos 28 dias, e 90 dias, exposto à carbonatação natural (C: calcita, CH: portlandita)

3.3 Análise da microestrutura por DRX

A análise da difratometria de raios X da pasta de CAT em condições naturais de carbonatação (Figura 3) mostra que houve leve descalcificação do C-S-H e surgimento de picos de vaterita, uma fase de $CaCO_3$. Não há variação significativa nos picos de calcita, outra forma de $CaCO_3$. A redução no pico de C-S-H está relacionada com o ganho reduzido da resistência à compressão que esse material apresentou, devido à carbonatação.

A pasta de CP IV (Figura 4), com a carbonatação, continuou desenvolvendo C-S-H. No entanto, apresentou forte redução nos picos de CH e aumento nos picos de calcita.

Isso confirma que, no concreto de cimento Portland, o produto da hidratação do cimento mais consumido pelo H_2CO_3 é a CH, que sofreu reduções bruscas em seus picos. O C-S-H, por sua vez, manteve-se em desenvolvimento e teve grande aumento em seu pico, o que corrobora o fato de a resistência à compressão ter aumentado apesar da condição de carbonatação a que a pasta foi exposta.

4. CONCLUSÕES

A profundidade da carbonatação é preocupante para aplicações de materiais à base de CAT em estruturas de concreto armado ou protendido. Embora a formação de calcita deixe o material externamente mais duro, a descalcificação do C-S-H faz com que o material deixe de ganhar resistência e, por conseguinte, deixa o concreto mais suscetível a novos ataques de mesma ou diferente natureza.

A avaliação da profundidade de carbonatação acelerada conduziu a resultados de profundidade muito maiores que a carbonatação em condições naturais de serviço, se devendo isso à concentração mais elevada de dióxido de carbono (5%), enquanto em condições de serviço esse valor é muito menor.

O desempenho do CAT, tanto em condições de carbonatação em serviço quanto em condição acelerada de carbonatação, foi em geral inferior ao do CP IV, tanto no que diz respeito à profundidade de carbonatação quanto à resistência à compressão. No entanto, esses resultados mostram que ensaios de carbonatação acelerada levam a uma desvalorização, por vezes, indevida dos materiais. Nessa avaliação de desempenho inicial em serviço, não houve perda de resistência no concreto à base de CAT, ou seja, a perda de qualidade do material devido ao processo de carbonatação não afetou significativamente seu desempenho em uso.

Assim, apesar de desempenho inferior nesse estudo, o CAT mostra-se como material promissor por suas vantagens econômicas e ambientais e necessita estudos de durabilidade em idades mais avançadas para que sua aplicação seja ampliada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BEHFARNIA, Kiacher; ROSTAMI, Majid. An assessment on parameters affecting the carbonation of alkali-activated slag concrete. Journal of Cleaner Production, v. 157, p. 1-9, 2017.

[2] BERNAL, Susan A. et al. Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: the role of pore solution chemistry. Cement and Concrete Research, v. 42, n. 10, p. 1317-1326, 2012.

[3] PUERTAS, F.; PALACIOS, M.; VÁZQUEZ, T. Carbonation process of alkali-activated slag mortars. Journal of Materials Science, v. 41, p. 3071-3082, 2006.

[4] TORGAL, F. Pacheco et al. An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC. Construction and Building Materials, v. 36, p. 141-150, 2012.

A robust seismic strengthening technique for Unreinforced Masonry (URM) walls, using sprayable Eco-Friendly Ductile Cementitious Composite (EDCC)

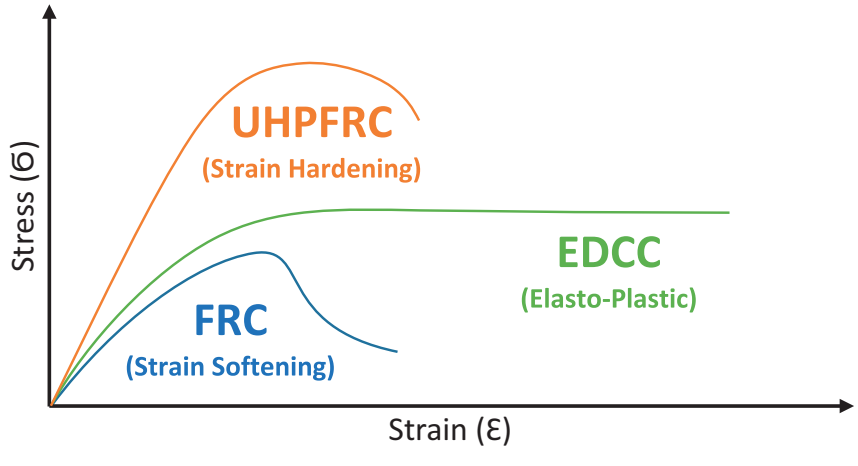
SALMAN SOLEIMANI-DASHTAKI* – Postdoctoral Fellow and Sessional Lecturer
NEMKUMAR BANTHIA – Professor and Canada Research Chair in Infrastructure Rehabilitation
CARLOS E. VENTURA – Professor and Director of the UBC Earthquake Engineering Research Facility
Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada

I. INTRODUCTION

This paper elaborates on development of a novel, effective, and practical methodology for a robust out-of-plane seismic strengthening technique toward seismically upgrading Unreinforced Masonry (URM) partition walls, using a thin plaster layer of sprayable Ecofriendly Ductile Cementitious Composite (EDCC). The newly developed high performance material is sprayable, ductile, and resilient, while being affordable, and easy to apply, with much less carbon footprint compared to other similar repair materials. Typical behaviour of EDCC compared to other types of fiber reinforced cementitious-based materials has been schematically shown in Figure 1.

Every year hundreds of thousands of lives are taken away worldwide by natural disasters such as earthquakes. Walls made of concrete blocks or bricks, are amongst the most vulnerable type of walls, which tend to collapse during an earthquake. Debris from collapsing walls fall on pedestrians and building occupants, leaving behind a great deal of injuries and fatalities, even if the building frame is still standing.

This research work has been devoted to develop an effective, practical, and affordable technology to help secure such walls, which exist in most parts of the world and, specifically, in developing countries, where the world's highest population density is concentrated. Through this work, a novel sprayable material, called Ecofriendly Ductile Cementitious Composite (EDCC), has been developed, used to strengthen real-scale versions of such walls, which were subsequently tested on a shake table, using the strongest actual historical earthquake records. The developed technology aims to save millions of lives worldwide.



▶ **Figure 1**
Schematic comparison between different FRC Classes

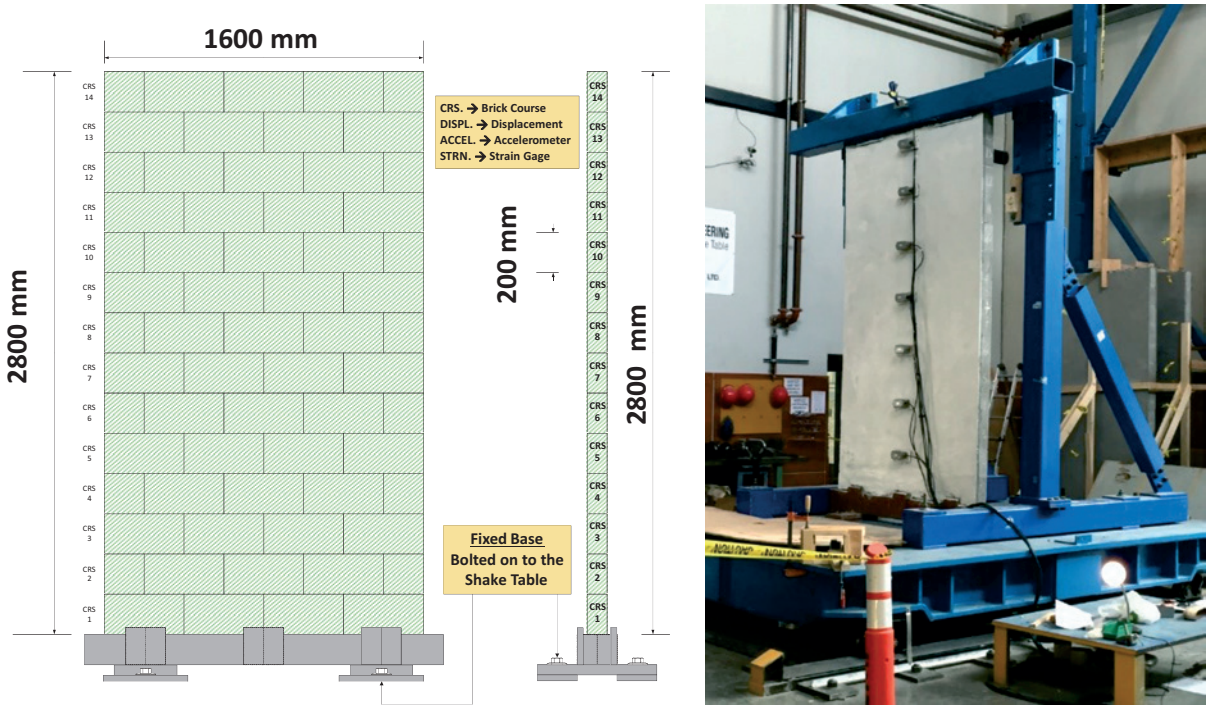


Figure 2
Wall specimens – six specimens, 1.6 m wide by 2.8m tall

The EDCC layer is devoted to secure URM walls, which exist in most parts of the world; specially, in developing countries, where world's most population density is concentrated. In many of these countries, retrofit is the only option, since building replacement is not practical nor an economically feasible solution. The EDCC material can be applied in three different methods: hand troweled, hopper sprayed, or pump sprayed. The thickness of the layer can vary between 10mm to 20mm, depending on the design variables (Soleimani-Dashtaki, 2018).

As part of this study, full-scale URM walls are built, strengthened, and tested on a shake table, using the strongest real historical earthquake records. It is shown that the EDCC layer is providing nearly full out-of-plane (OP) detention for the wall's building blocks, as well as minor but uniform in-plane shear capacity enhancements; therefore, holding the masonry units together from falling apart and being thrown during an earthquake generated ground motion.

EDCC retrofit technique is now an available strengthening option in the third edition of the Seismic Retrofit Guidelines (SRG III) developed for the province of British Columbia, Canada, for restraining the unreinforced masonry walls to prevent out-of-plane failure during an earthquake-generated ground shaking. The last sections of this paper provide further details.

2. DYNAMIC TESTING OF FULL SCALE RETROFITTED WALL SPECIMENS

Nine full scale retrofitted masonry walls are tested on the uniaxial shake table for the out of plane behaviour (Figure 2). The wall dimensions and the building block sizes are consistent for all the full scale wall tests performed for the schools retrofit project at UBC; three none-retrofitted URM walls were initially tested, as control specimens.

The other six walls were retrofitted and then tested to compile a complete set of data. The test variables were decided based on the test results of meso scale specimens during the retrofit material development and optimization phase.

Dynamic testing of full scale specimens is one of the most effective experiments which can be performed to fully understand the out of plane (OP) behaviour of such walls (Soleimani-Dashtaki, Ventura, & Banthia, 2017). In fact, in this type of test, the location of the plastic hinge formation fully depends on the overall behaviour of the wall, opposed to a quasi-static test where the location has to be predetermined and usually very well predictable prior to testing.

Figure 3
Different application methods for EDCC

3. EDCC – MATERIAL DEVELOPMENT AND APPLICATION TECHNIQUES

The focus has been put on the development of a cost effective novel methodology for seismic retrofit of low rise masonry buildings, using sprayable Ecofriendly Ductile Cementitious Composite (EDCC), which is a form of fiber reinforced engineered cementitious based composite material. In particular, this retrofit strategy will be targeting unreinforced, un-grouted, and unconfined non-loadbearing masonry walls of up to 6m tall. This type of wall would predominantly be a common type of partition wall system used in many of the mid-age low-rise school buildings in BC, Canada. The material can be applied in three different methods, as illustrated in Figure 3. The EDCC layer thickness can vary between 10mm to 20mm.

EDCC is considered one specific type of Engineered Cementitious Composite (ECC), which is a class of fiber reinforced cementitious composites with strain-hardening type behavior under tension. EDCC uses about 30% cement content of a typical ECC mix, contains only natural sand, and adapts a hybrid fiber system to exhibit strain-

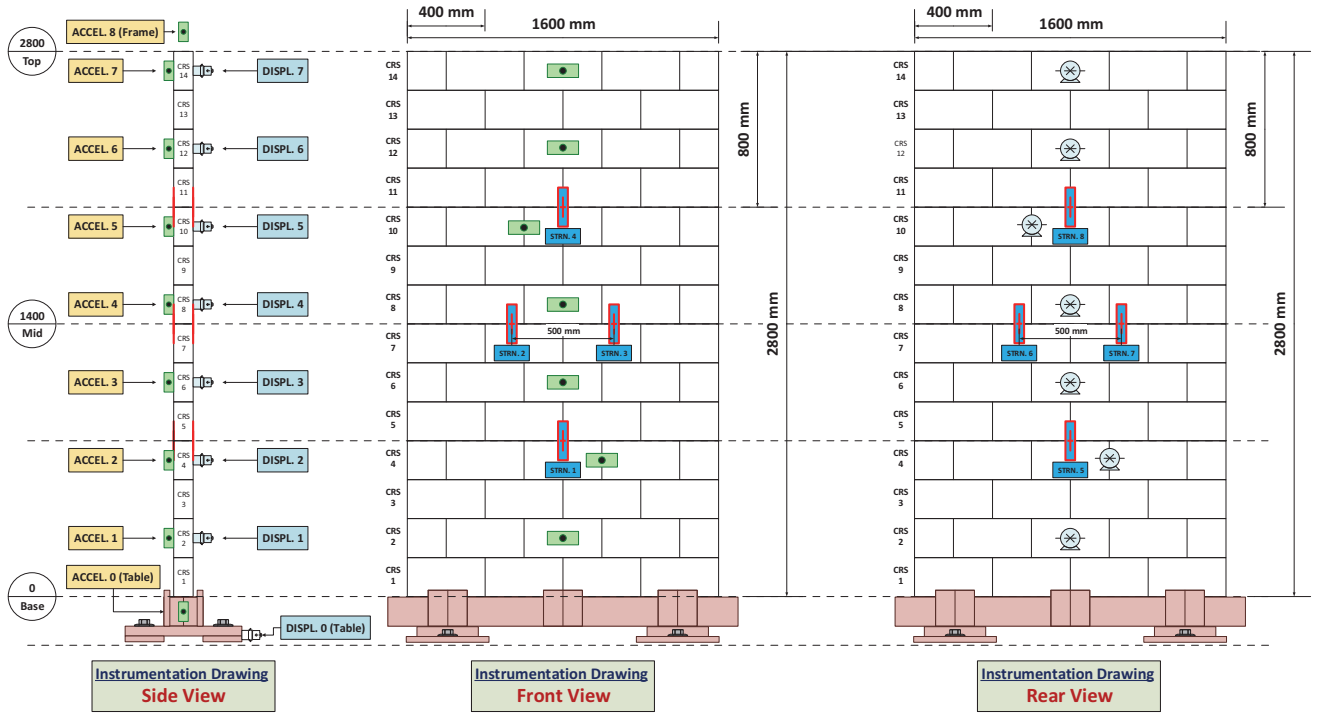


Figure 4
Schematics of the instrumentation of the wall tests

hardening type behavior and achieving about 5% ultimate strain capacity in pure tension (Soleimani-Dashtaki, Soleimani, Wang, Banthia, & Ventura, 2017).

This unique tensile strain hardening modus results from an elaborate design using a micro-mechanical model taking into account the interactions amongst fibers and the matrix as well as the fiber-matrix interface (Wang, Banthia, & Sun, 2013). Therefore, these attributions not only do make EDCC a much more cost-effective material, but also make it a considerably more sustainable material, being a low-CO_2 concrete with low-cement content, compared to the other available conventional cement based repair systems.

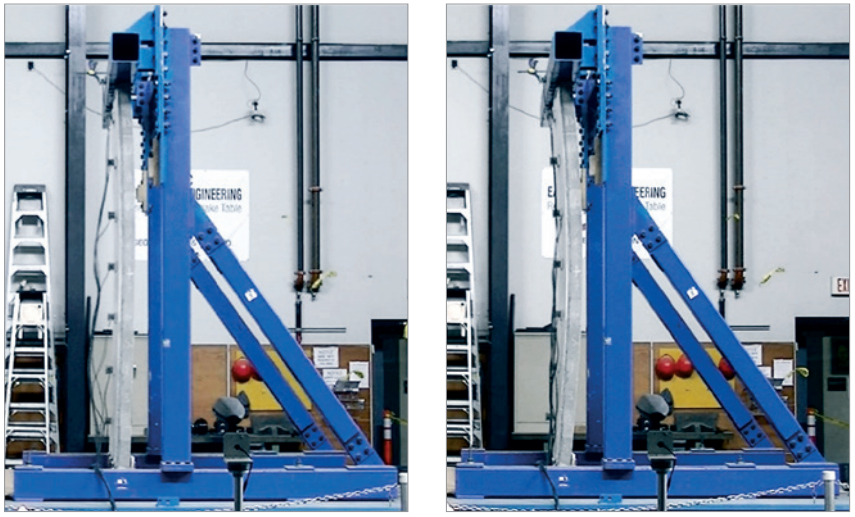


Figure 5
Single sided retrofit using the premium EDCC mix tested at 180% actual intensity of the 2011 Tohuku motion

4. INSTRUMENTATION AND DATA ACQUISITION

The test was setup using a steel frame on the Linear Shake Table (LST) at the Earthquake Engineering Research Facility (EERF) of the University of British Columbia, developed for testing masonry wall specimens in out-of-plane loading, towards development of next edition of the Seismic Retrofit Guidelines (SRG III, 2017).

In this experimental work, six full scale walls have been tested on LST under different ground motions with varying intensities. For this experimental phase, the full scale unreinforced non-grouted masonry wall specimens were casted in late Jan 2016 and got field cured for a few weeks. The specimens then got retrofitted using sprayable Eco-Friendly Ductile Cementitious Composites (EDCC) in Feb 2016, followed by 56 days of field curing, and subsequently tested over the months of June and July 2016 one by one. The 56 days of curing is recommended as the repair material consists of high volumes

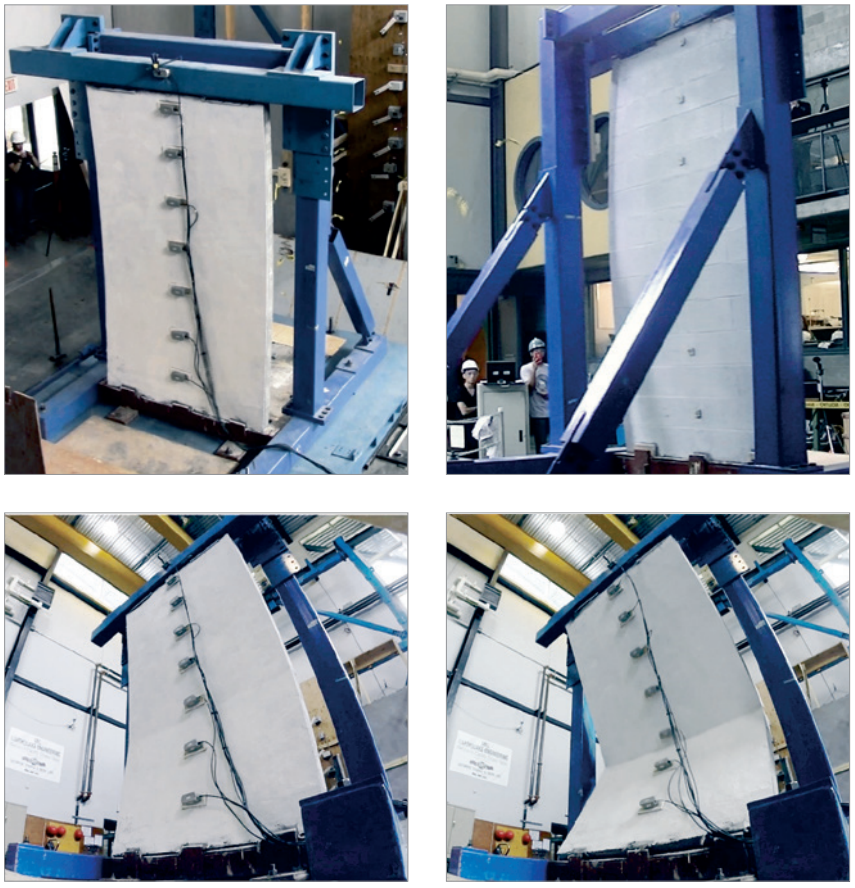


Figure 6
Different views of the single sided wall at extreme deformations at 200% intensity of the 2011 Tohuku Eq.

▶ Table 1 – Summary of the shake table testing results (Part 1)

Spec. No. & description	Ground motion	Scale factor (% of actual int.)	Collapse (Yes / No)	Comments on damage state
Wall # 1 **Wall:** 4" CMU URM Wall with joint Wall-Locks **Retrofit:** Double Sided retrofit with Premium Mix EDCC	2011 Tohoku, Japan – Miyagi-Oki Station (Subduction)	10 %	No	No damage
		20 %	No	No damage
		30 %	No	No damage
		40 %	No	No damage
		50 %	No	No damage
		80 %	No	No damage
		100 %	No	No damage
		120 %	No	No damage
		150 %	No	No damage
		180 %	No	No damage
		200 %	No	No damage
	1995 Kobe, Japan – Nishi-Akashi Station (Crustal)	100 %	No	No damage
		120 %	No	No damage
		150 %	No	No damage
		200 %	No	No damage
	1999 Chi-Chi, Taiwan – Jiji Station (Crustal)	100 %	No	No damage
		150 %	No	No damage
		200 %	No	No damage
		250 %	No	No damage
		300 %	No	Minor cracks
	Verteqii Waveform – Synthetic Motion	100 %	No	Minor cracks
		150 %	No	One major crack
		200 %	Yes	One localized crack at lower half of the wall height

▶ Table 1 – Summary of the shake table testing results (Part 2)

Spec. No. & description	Ground motion	Scale factor (% of actual int.)	Collapse (Yes / No)	Comments on damage state
Wall # 2 **Wall:** 4" CMU URM Wall with joint Wall-Locks **Retrofit:** Single Sided retrofit with Premium Mix EDCC	2011 Tohoku, Japan – Miyagi-Oki Stn. (Subduction)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	1995 Kobe, Japan – Nishi-Akashi Station (Crustal)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	2011 Tohoku, Japan – Miyagi-Oki Station (Subduction)	120 %	No	Minor cracks at some joints
		150 %	No	Minor cracks at most joints
		180 %	No	Cracks at all the joints
		200 %	Yes	One localized crack at the mid-height of the wall

of fly ash, which delays the hardening and maturity of the repair system (Soleimani-Dashtaki, Soleimani, Wang, Banthia, & Ventura, 2017).

As seen in Figure 4, the walls were fully instrumented and data were collected in 34 different channels, as follow (Soleimani-Dashtaki, Ventura, & Banthia, 2017):

- Accelerometers @ 10 channels;
- Displacement sensors (string pods) @ 8 channels;
- Strain sensing (strain gages) @ 8 channels;
- Synchronized video recording (cameras) by 8 cameras.

5. TESTING PROGRAM AND EXPERIMENTAL SETUP

Out of six walls, three of them were retrofitted only with one side and three of them were double sided retrofit. There are two different mixes of the EDCC materials, the "Premium Mix" and the "Regular Mix", studied in this testing program. The walls were tested with different ground motions of all three types of crustal, sub-crustal, and subduction, with different intensities. Generally, each wall was tested with 100% intensity of the targeted ground motions, from the same records used throughout the analytical phases of the SRG project. Thereafter, the intensity was subsequently increased until the failure of the wall. Figure 5 shows a single sided wall flexing under 180% of the actual intensity of the Japan's 2011 Tohuku earthquake.

The preliminary analysis of the test results confirms that a single sided retrofit with premium mix can extremely increase the overall ductility of the system and changing the fundamental behaviour of the wall from a typical "Rocking Mechanism" to a "Beam" type behaviour, with significant rotations at the hinge

supports. In this system, a plastic hinge is formed at all the wall mortar joints and the observed deformations are significant.

This flexibility of the system results in a substantial amount of energy dissipation, and therefore, pushing the wall to the deformation limits above the requirements. Peak accelerations of up to 6.0g were recorded at the mid-height of the wall during the tests, and significant damping were noticed at each of the loading and unloading cycles. The wall shown in Figure 5 finally collapsed at the 200% scale of the actual intensity of the 2011 Tohuku ground motion of Japan, recorded at the Miyagi-Oki Station; this is a considered a long duration subduction event.

At failure, the wall developed a major plastic hinge at about 40% height from the base, and a localized crack was formed at the EDCC layer, where the wall started to rock at this joint and failed after 4 full rocking cycles. This was a controlled failure mechanism, with minimal debris flying and scattering around. Figure 6 shows the failure sequence of this wall at the final test.

The results conclude that the double sided retrofit is performing beyond most of the requirements, but it can be a very good solution for areas with extreme seismicity. The double sided EDCC retrofitted wall was tested up to 300% intensities of most of the motions in hand, but finally it had to be tested using an aggressive synthetic motion at 250% intensity to fail.

6. SUMMARY OF THE SHAKE TABLE TESTING RESULTS

As previously mentioned, all of the

▶ Table 1 – Summary of the shake table testing results (Part 3)

Spec. No. & description	Ground motion	Scale factor (% of actual int.)	Collapse (Yes / No)	Comments on damage state
Wall # 3 **Wall:** 4" CMU URM Wall with joint Wall-Locks **Retrofit:** Double Sided retrofit with Regular Mix EDCC	2003 Tokachi-Oki, Japan – Hombetsu Station HKD 090 (subduction)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	1995 Kobe, Japan – Nishi-Akashi Station (Crustal)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	2011 Tohoku, Japan – Miyagi-Oki Station (subduction)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
		150 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	1995 Kobe, Japan – Nishi-Akashi Station (Crustal)	150 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
		80 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	2003 Tokachi-Oki, Japan – Hombetsu Station HKD 090 (subduction)	150 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	1999 Chi-Chi, Taiwan – Jiji Station (Crustal)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
		150 %	No	Minor cracks at some joints
	1992 Landers, California, US – (Sub-Crustal)	150 %	No	Minor cracks at some joints at the mid-height of the wall
	1999 Chi-Chi, Taiwan – Jiji Station (Crustal)	200 %	No	One major crack at about the mid-height of the wall
	2011 Tohoku, Japan – Miyagi-Oki Station (Subduction)	50 % (1st aftershock)	No	One major crack at about the mid-height of the wall
		100 % (1st aftershock)	No	One major crack and some minor cracks at about the mid-height of the wall
	2003 Tokachi-Oki, Japan – Hombetsu Station HKD 090 (subduction)	100 % (1st aftershock)	No	One major crack and some minor cracks at about the mid-height of the wall
	1995 Kobe, Japan – Nishi-Akashi Station (Crustal)	100 % (1st aftershock)	No	One major crack and many cracks at about the mid-height of the wall
	1999 Chi-Chi, Taiwan – Jiji Station (Crustal)	50 % (2nd aftershock)	No	One major crack and many minor cracks at about the mid-height of the wall
		100 % (2nd aftershock)	No	One major crack and many major cracks at about the mid-height of the wall
	1995 Kobe, Japan – Nishi-Akashi Station (Crustal)	100 % (2nd aftershock)	Yes	One major localized crack (same crack) became unstable and fails

six specimens are unreinforced 4" thick concrete masonry walls retrofitted with EDCC and tested under a number of different ground motions of different types. Table 1 summarizes the performances of all these walls under different ground motions.

Note: for each wall, the results are presented in the same order in which the wall was tested.

7. AVAILABLE FINISHES FOR EDCC

Whether the EDCC material is applied by hand or sprayed, the final product can look smooth or rough. There is a major cost difference between the two finishes, since like any other finishing work, there is some additional labour-hour needed to trowel the wall for the final look. Figure 7 shows some photos of the process, as well as the smooth vs. a rough finish for EDCC.

8. COST ANALYSIS: STRENGTHENING USING EDCC VS. CONVENTIONAL TECHNIQUES

What makes Sprayable EDCC a more attractive retrofit option is the cost effectiveness of this material compared to the conventional techniques. In the current retrofit strategies there are two independent systems required for upgrading both in-plane and out-of-plane behavior of the unreinforced masonry partition walls (Soleimani-Dashtaki, 2018).

The bulk material cost for the current EDCC mixes are around 500 $/m^3 for the Regular Mix and 900 $/m^3 for the Premium Mix. Considering an average placement with about 0.6" thickness, these prices would be about 8 $/m^2 and 13 $/m^2, respectively. In terms of the labour cost for application, in one full hour a crew of two would be able to hand apply (trowel on) EDCC to about 10 – 15 m^2 or, using one of the spray systems (guns), the same crew would be able to roughly cover an area of 20 – 30 m^2 with sprayed EDCC. Assuming a labour cost of about $25/ hour per person, this would put the balk part of the price to about $10 to $16/ m^2 in average. Table 2 provides the summary of the aforementioned total cost estimation (material + labour).

In order to provide some basis for the comparison, based on the current market price, the cost of Sprayed Fiber Reinforced Polymer (SFRP) and Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheets are about 35 $/m^2 and 60 $/m^2, respectively. Depending on the structural design of the retrofit, the targeted wall

▶ Table 1 – Summary of the shake table testing results (Part 4)

Spec. No. & description	Ground motion	Scale factor (% of actual int.)	Collapse (Yes / No)	Comments on damage state
Wall # 4 **Wall:** 4" CMU URM Wall with joint Wall-Locks **Retrofit:** Single Sided retrofit with Regular Mix EDCC	1994 Northridge, California, US – USGS 5108 Santa Susana Ground Station (Crustal)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	1995 Kobe, Japan – Nishi-Akashi Station (Crustal)	100 %	No	Minor cracks at some joints
		120 %	Yes	One localized crack at the upper half height of the wall

▶ Table 1 – Summary of the shake table testing results (Part 5)

Spec. No. & description	Ground motion	Scale factor (% of actual int.)	Collapse (Yes / No)	Comments on damage state
Wall # 5 **Wall:** 4" CMU URM Wall without joint Wall-Locks **Retrofit:** Double Sided retrofit with Regular Mix EDCC	1992 Landers, California, US – (Sub-Crustal)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	2011 Tohoku, Japan – Miyagi-Oki Station (Subduction)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	2003 Tokachi--Oki, Japan – Hombetsu Station HKD 090 (subduction)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	1995 Kobe, Japan – Nishi-Akashi Station (Crustal)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	1992 Landers, California, US – (Sub-Crustal)	150 %	No	No damage or visible cracks present anywhere

might need up to 3 layers of FRP wraps in order to achieve the desired performance (Soleimani-Dashtaki, 2018).

In order to provide a simplified head-to-head comparison, using EDCC brings a significant reduction in the material cost, down to about one third (1/3). It should be kept in mind that FRP wrapping would mostly require substantial amount of surface preparation and grinding to get to the desired surface roughness; whereas, EDCC would only require a relatively clean and pre-moisturized surface.

It is worth mentioning that EDCC retrofit, compared to other available techniques, would also add some in-plane strengthening which could potentially reduce or completely eliminate the need for providing additional support for the existing Lateral Drift Resisting System (LDRS) of the building, to control the lateral movements of the structure during an earthquake shaking. The in-plain enhancements are assumed based on the preliminary test data, which can easily be verified with further testing, if need be.

9. RETROFIT OF AN URM WALL AT ANNIE B. JAMIESON ELEMENTARY SCHOOL

In order to demonstrate the implementation of the technology in a real-life application, as part of the research plan, Dr. Annie Jamieson Elementary School is

▶ **Table 1 – Summary of the shake table testing results (Part 6)**

Spec. No. & description	Ground motion	Scale factor (% of actual int.)	Collapse (Yes / No)	Comments on damage state
Wall # 6 **Wall:** 4" CMU URM Wall without joint Wall-Locks **Retrofit:** Single Sided retrofit with Regular Mix EDCC	1992 Landers, California, US – (Sub-Crustal)	100 %	No	No damage or visible cracks present anywhere
	1999 Chi-Chi, Taiwan – Jiji Station (Crustal)	100 %	No	Minor cracks at some joints
	1992 Landers, California, US – (Sub-Crustal)	150 %	No	Minor cracks at some joints
	1999 Chi-Chi, Taiwan – Jiji Station (Crustal)	150 %	Yes	One localized crack at about the mid-height of the wall

▶ **Figure 7**
EDCC casting, preparation, wall pre-moisturizing, and different application processes

▶ **Table 2 – Cost estimation (per m²) summary for the EDCC retrofit option**

Retrofit option	Sprayed	Hand applied
EDCC regular mix	$15	$20
EDCC premium mix	$10	$15

selected, with the help from the structural engineers working on the project. This school is owned by the Vancouver School Board and it operates under the legislations of BC Ministry of Education. The school has been going through a seismic upgrade, for which Bush, Bohlman & Partners LLP is the structural design firm in charge and Heatherbrae Builders Co. LTD is the general contractor. The retrofit of the URM wall was completed on Nov 7, 2017, based on the retrofit details provided in SRG III for the EDCC retrofit option (URM#11); this document is provided in Appendix A of this paper, for reference. The actual retrofit work is done by S. Soleimani-Dashtaki et. Al., and a sub-contractor was hired by UBC to provide help with material and equipment transportation, as well as providing labour work during the course of EDCC retrofitting of the URM wall at Jamieson School. The photographic project highlights are provided in the proceeding sections.

9.1 Summary of the retrofit details, based on SRG III

Retrofit Option Name

URM partition walls - Restraint of Wall using Sprayed EDCC (SRG III, 2017).

Description of Retrofit

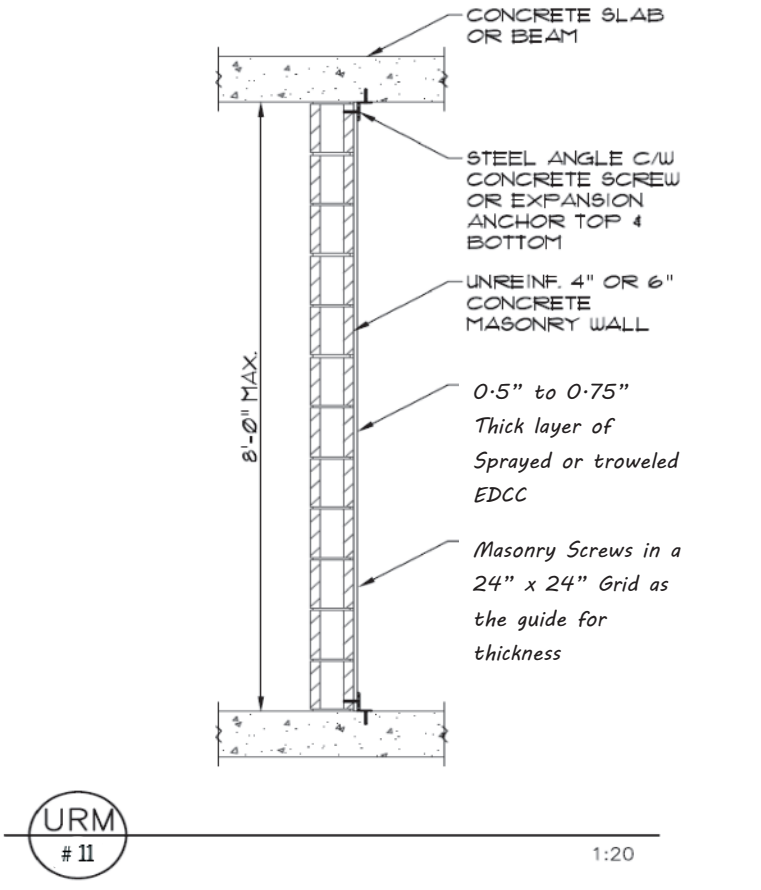
Mechanically restrain the UR masonry wall throughout the full height, by spraying 0.5" to 0.75" thick layer of the EDCC (Ecofriendly Ductile Cementitious Composite) material on one side of existing wall. This retrofit can be used to brace URM walls out-of-plane.

Typical Existing Building Conditions

Partition walls are typically of 4" or 6" concrete masonry units or 4" clay bricks.

Example factors affecting cost of retrofit:

- Re/re existing finishes and services;
- Interior or exterior walls;
- Ease of access;
- Storey height;
- Remediate vermiculite void fill;
- Application options: Sprayed or Hand Applied;
- Finish options: Smooth Finish (troweled) or Rough Finish.



Seismic Retrofit Guidelines	URM Partition # 11	Scale 1:20
Third Edition Library of Retrofit Details May 2017	EDCC	Sheet No· URM # 11

Figure 8
URM partition walls – restraint of wall using sprayed EDCC (SRG III, 2017)

9.2 Selected photos from the project at Jamieson Elementary School

This section highlights a few photos and snapshots taken during the retrofit process of a URM wall at Dr. Annie B. Jamieson Elementary School in Vancouver, BC. This demonstration retrofit project took place during the course of three days, from November 6th to November 8th, 2017.

10. CONCLUSION

In brief, dynamic testing of full-scale specimens is one of the most effective experiments, which can be performed in order to fully understand the out-of-plane behaviour of brittle systems, like URM walls. The experimental results from the shake table testing have

Demo project at Jamieson Elementary School

Figure 9
The UBC crew setting up and getting ready to start at Jamieson School

Demo project at Jamieson Elementary School

Figure 10
EDCC mix prepared with a mortar mixer and applied at Jamieson School

revealed that EDCC retrofit technology is a very effective technique for seismic strengthening of such walls.

Shake table tests indicated that even a single-sided retrofit with appropriate EDCC can significantly enhance the overall ductility of the system and would change the fundamental behaviour of the wall from a typical "Rocking Mechanism" to a "Beam" type behaviour, with significant base rotations at the supports. The added flexibility to the system resulted in a substantial increase in energy dissipation, and thereby increasing the overall drift capacity before collapsing, causing the wall to withstand extensive levels of shaking under different types and intensities of earthquake generated ground motions.

The overall results of the experimental program also confirm that a single-sided EDCC retrofit of 20mm thickness would be sufficient for most of the low-rise school buildings across the province of British Columbia, Canada. A double-sided EDCC retrofit is also a great option for special cases where the ultimate drift needs to be limited for serviceability considerations. Examples of such cases include hospital buildings, where walls generally contain several mounted accessories, or libraries where heavy bookshelves need to be attached to the walls. Therefore, the wall movements need to be limited for safety and serviceability concerns.

REFERENCES

[1] Seismic Retrofit Guidelines for BC Low-Rise School Buildings, 3rd Edition (SRG III). (2017). Vancouver, British Columbia, Canada: University of British Columbia, Association of Professional Engineers and Geoscientists of BC (APEGBC), and the BC Ministry of Education.

[2] Soleimani-Dashtaki, S. (2018). Seismic Strengthening of Unreinforced Masonry Walls using sprayable Ecofriendly Ductile Cementitious Composite (EDCC). Vancouver, British Columbia, Canada: University of British Columbia.

[3] Soleimani-Dashtaki, S., Soleimani, S., Wang, Q., Banthia, N., & Ventura, C. E. (2017). Effect of high strain-rates on the tensile constitutive response of Ecofriendly Ductile Cementitious Composite (EDCC). PROTECT2017: The 6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading. Engineering Procedia. Guangzhou (Canton), China: ELSEVIER (Engineering Procedia). Retrieved from www.elsevier.com/locate/procedia

[4] Soleimani-Dashtaki, S., Ventura, C. E., & Banthia, N. (2017). Seismic Strengthening of Unreinforced Masonry Walls using Sprayable Eco-Friendly Ductile Cementitious Composite (EDCC). 6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, PROTECT2017, 11-12 December 2017. Procedia Engineering. Guangzhou (Canton), China: ELSEVIER (Engineering Procedia). Retrieved from www.elsevier.com/locate/procedia

[5] Wang, Q., Banthia, N., & Sun, W. (2013). Development of engineered cementitious composites with non-oiled polyvinyl alcohol fibers and natural sand. Proceedings of FIBRE CONCRETE 2013, September 12–13, 2013. Prague, Czech Republic.

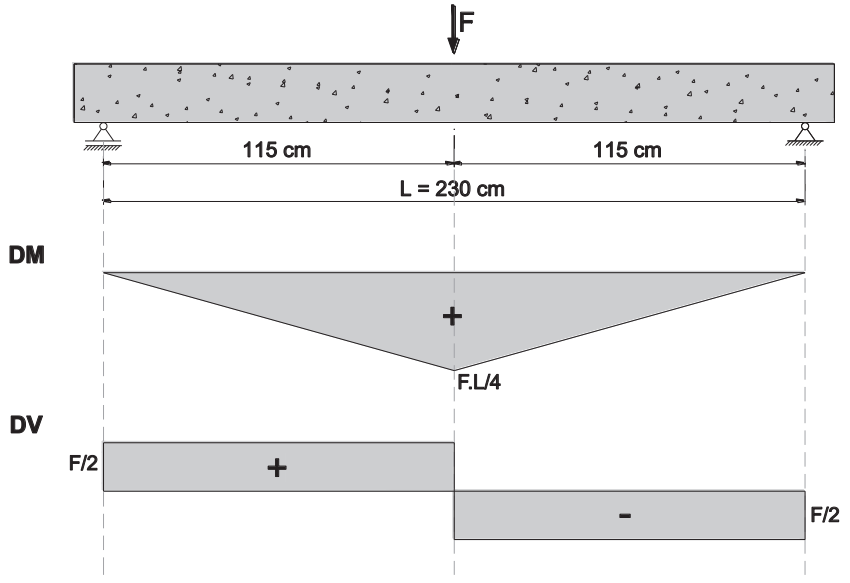
Dimensionamento de sistema de reforço à flexão com materiais compósitos segundo a técnica EBR: Parte B

GLÁUCIA MARIA DALFRÉ – PHD
GUILHERME ARIS PARSEKIAN – PHD
DOUGLAS DA COSTA FERREIRA – MESTRE
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS (UFSCAR)

I. INTRODUÇÃO

A técnica de reforço EBR (*Externallly Bonded Reinforcement*) tem se mostrado eficiente no aumento da capacidade de carga de elementos submetidos à flexão. Aumentos entre 10 e 160% já foram verificados em estudos. Visto que a utilização da técnica EBR na aplicação do reforço com materiais compósitos de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) é crescente na indústria da construção civil e visando um melhor entendimento deste sistema de reforço, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo analítico da eficiência da técnica EBR no incremento da capacidade de cargas de vigas de concreto reforçadas à flexão com mantas de CFRP. De posse dessas informações, será possível obter um melhor entendimento da eficiência do sistema de reforço CFRP EBR aplicado em vigas de concreto armado.

Para informações sobre o CFRP e EBR, consultar artigo na edição 94 da CONCRETO & Construções.



Fonte: Ferreira (2019)

▶ **Figura 1**
Carregamento e diagramas de momento fletor (DM) e esforço cortante (DV)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Um estudo analítico do comportamento de quatro vigas biapoiadas de concreto armado foi realizado. Posteriormente, os resultados analíticos foram comparados aos ensaios realizados por Ferreira (2019). A Figura 1 apresenta o esquema do ensaio de flexão em três pontos e os diagramas de momento fletor e esforço cortante. As características geométricas e as armaduras longitudinais das vigas encontram-se representadas na Figura 2.

Quatro vigas de concreto armado foram confeccionadas com dimensões de 12x20x250 cm, vão livre entre os

apoios de 230 cm e concreto com resistência à compressão de 28,5 MPa.

As vigas de concreto armado foram produzidas com armadura longitudinal positiva, composta por 2 barras de aço CA-50, com diâmetro de 10mm (taxa de armadura longitudinal de 0,75%), seção transversal retangular de 12 cm x 20 cm e vão livre de 230 cm. Para evitar a ruptura por cisalhamento, estribos de aço CA-60, com diâmetro de 5 mm, foram espaçados a cada 10 cm, conforme ilustrado na Figura 2.

Das quatro vigas, duas não possuíam nenhum tipo de reforço, sendo utilizadas como referência, e as demais foram reforçadas à flexão, com uma camada de manta de CFRP aplicadas segundo a técnica EBR (Figura 3).

Para o sistema de reforço EBR, considerou-se o uso de manta de fibra de carbono, com módulo de elasticidade de 248 GPa, resistência à tração de 3150 MPa, deformação última de 1,28%, espessura de 0,176mm e largura de 11cm. Considerou-se vigas localizadas no interior de uma edificação, obtendo-se, desta forma, um fator de redução das propriedades devido à exposição ambiental (C_E) igual a 0,95. Vale ressaltar que o sistema de reforço foi aplicado na borda inferior das vigas (face tracionada) segundo a técnica EBR. Assim, todos os cálculos atenderam aos limites impostos pelas normas ABNT NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2014), enquanto o incremento de capacidade de carga das vigas reforçadas será estimado segundo as recomendações ACI 440.2R (2017).

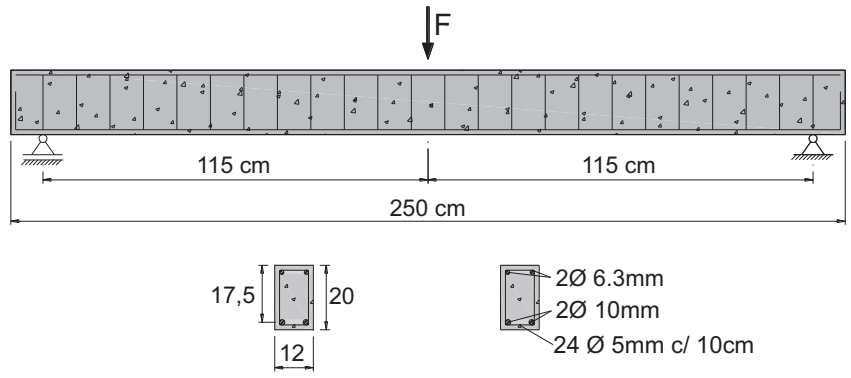
2.1 Modelos de dimensionamento

Apresentam-se aqui os modelos de dimensionamento utilizados para o cálculo das vigas de concreto armado de referência (sem nenhum tipo de reforço), que seguiram as recomendações das normas ABNT NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2014), assim como das vigas reforçadas com mantas de CFRP, que foram dimensionadas segundo a ACI 440.2R (2017).

2.1.1 ABNT 6118 (2014)

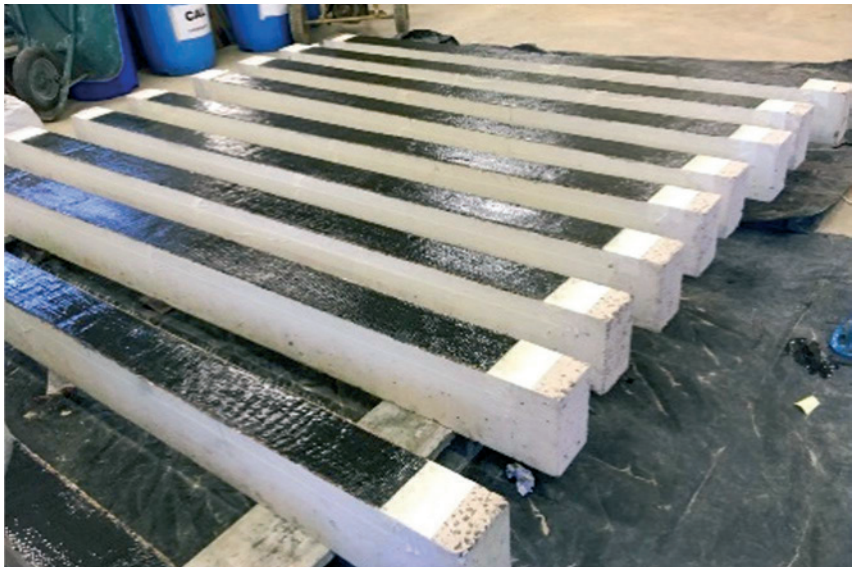
A determinação da resistência à flexão das vigas de referência foi baseada na ABNT NBR 6118 (2014), com o uso do diagrama simplificado de distribuição de tensões e deformações de uma viga de seção retangular com armadura simples (Figura 4).

A determinação da profundidade de linha neutra é obtida com o uso da Equação 1, onde A_s é a área da



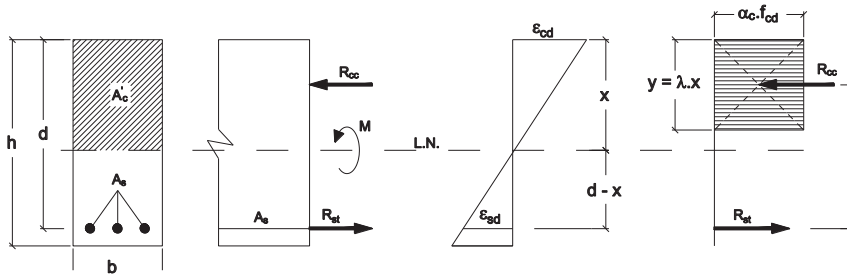
Fonte: Ferreira (2019)

Figura 2
Viga de concreto armado utilizada no dimensionamento do sistema de reforço (dimensões em cm)



Fonte: Ferreira (2019)

Figura 3
Configuração do reforço com manta de CFRP



Fonte: o autor

Figura 4
Diagrama de tensão e deformação de uma viga de seção retangular

armadura longitudinal (2 ϕ 10mm, perfazendo uma área de 1,57cm^2), f_y é a tensão de escoamento do aço (500MPa), d é a altura útil (17,5 cm), λ é o valor definido em 0,8 para a altura do diagrama retangular simplificado da distribuição de tensões do concreto comprimido de resistência até 50 MPa, x é a profundidade da linha neutra, b_w é a largura da seção transversal, α_c é igual ao valor de 0,85 da tensão máxima de compressão para concretos até 50 MPa e f_c é a resistência característica do concreto (28,5 MPa).

$$x = \frac{A_s \cdot f_y}{\alpha_c \cdot \lambda \cdot b_w \cdot f_c}$$

$$x = \frac{1{,}57cm^2 \cdot (50kN/cm^2/1{,}15)}{0{,}85 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}12m \cdot (28500kN/m^2/1{,}4)} = 0{,}041m \quad (1)$$

Pela comparação com $x_{2/3}$=0,259·d e x_{lim}=0,45·d, verifica-se que tal profundidade de linha neutra indica que o dimensionamento encontra-se em Domínio 2. Para o cálculo do máximo momento resistente, foram utilizadas as formulações apresentadas nas Equações 2 e 3, onde M_{dc} e M_{ds} são os momentos resistentes obtidos pela análise do bloco comprimido ou tracionado, respectivamente.

$$M_{dc} = \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot \lambda \cdot x \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2}\right) \quad (2)$$

$$M_{dc} = 0{,}85 \cdot \left(\frac{28500kN/m^2}{1{,}4}\right) \cdot 0{,}12m \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}041m \cdot \left(0{,}175m - \left(\frac{0{,}8 \cdot 0{,}041m}{2}\right)\right) = 10{,}8kN.m$$

$$M_{ds} = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2}\right)$$

$$M_{ds} = 1{,}57cm^2 \cdot \left(\frac{50kN/cm^2}{1{,}15}\right) \cdot \left(0{,}175m - \left(\frac{0{,}8 \cdot 0{,}045m}{2}\right)\right) = 10{,}8kN.m \quad (3)$$

Tendo em vista a configuração de carregamento utilizada, este momento corresponde a uma carga concentrada, aplicada a meio vão, de 18,8 kN.

2.1.2 ACI 318 (2014)

Com relação ao dimensionamento segundo o ACI 318 (2014), esta recomendação também permite como simplificação o uso de um diagrama retangular equivalente, tal como apresenta a Figura 5. Entretanto, o dimensionamento é realizado com o uso de valores característicos de propriedades dos materiais, os quais serão posteriormente minorados pelo fator de redução ϕ.

Os valores de β_1 variam de acordo com a classe de resistência à compressão do concreto (f_c) e possuem os valores apresentados na Equação 4. Tendo em vista a resistência à compressão de 28,5MPa, um valor de β_1 igual a 0,846 foi obtido.

$$\beta_1 \begin{cases} 0{,}85 & para \quad f'_c < 28MPa \\ 0{,}85 - \dfrac{0{,}05 \cdot (f'_c - 28)}{7} & para \quad 28 < f'^1_c < 55MPa \\ 0{,}65 & para \quad f'_c > 55MPa \end{cases} \quad (4)$$

Tal como considerado pela ABNT NBR 6118 (2014), a profundidade

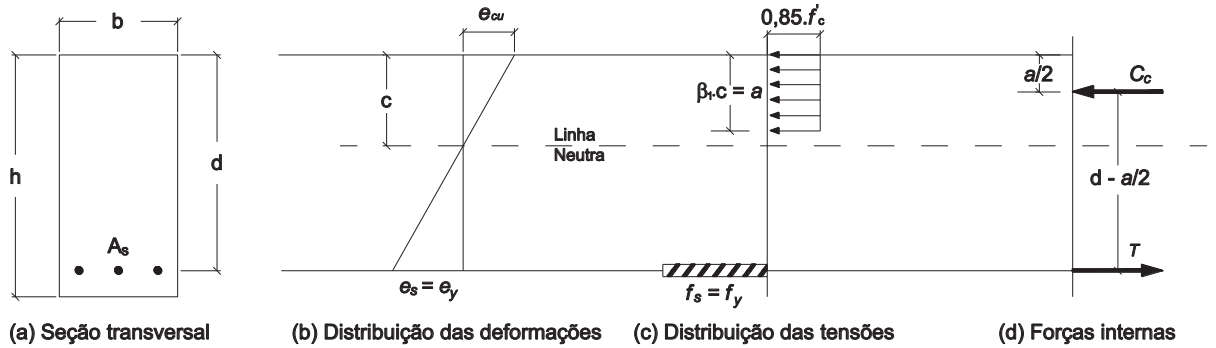


Figura 5
Diagrama retangular equivalente

do bloco retangular equivalente (a) é obtida com o uso da Equação 5, onde A_s é a área da armadura longitudinal (1,57cm²), f_y é a tensão de escoamento do aço (500MPa), b é a largura da seção transversal e f'_c é a resistência característica do concreto (28,5 MPa).

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0{,}85 \cdot f'_c \cdot b} = \frac{1{,}57cm^2 \cdot 50kN/cm^2}{0{,}85 \cdot 28500kN/m^2 \cdot 0{,}12m} = 0{,}027m \quad (5)$$

A profundidade da linha neutra (c) é calculada por meio da Equação 6.

$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{0{,}027m}{0{,}846} = 0{,}032m \quad (6)$$

A deformação do aço (ε_s) é obtida a partir da compatibilidade de deformações apresentada na Equação 7. A norma ACI 318 (2014) considera que a deformação última no concreto (ε_{cu}) ocorre com valor de 3‰. Assim:

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d-c}{c}\right) \cdot \varepsilon_{cu} = \left(\frac{0{,}175m - 0{,}032m}{0{,}032m}\right) \cdot 3‰ = 13{,}4‰ \quad (7)$$

Desta forma, quando o aço está escoando (ou seja, $\varepsilon_s > \varepsilon_{sy}$, Equação 8, onde o módulo de elasticidade do aço (E), pela norma americana, possui valor de 200GPa), obtém-se o momento nominal resistido pela análise do bloco tracionado (M_n), o qual é calculado por intermédio da Equação 9.

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_y}{E} = \frac{500MPa}{200000MPa} = 0{,}0025 = 2{,}5‰ \quad (8)$$

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)$$
$$M_n = 1{,}57cm^2 \cdot 50kN/cm^2 \cdot \left(0{,}175m - \frac{0{,}032m}{2}\right) = 12{,}5kN.m \quad (9)$$

O momento resistente de cálculo (M_u) é obtido pelo produto entre o momento nominal e o fator de redução ϕ, tal como apresentado nas Equações 10 e 11. Para a determinação de ϕ, ε_s é o nível de deformação da armadura de aço obtida no dimensionamento (neste caso, 13,4‰) e ε_{sy} é a deformação de escoamento da armadura de aço (2,5‰).

$$M_u = \phi \cdot M_n \quad (10)$$

$$\phi \begin{cases} 0{,}90 & para \quad \varepsilon_s \geq 0{,}005 \\ 0{,}65 + \frac{0{,}25 \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0{,}005 - \varepsilon_{sy}} & para \quad \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0{,}005 \\ 0{,}65 & para \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (11)$$

Considerando-se os resultados acima apresentados, ϕ é igual a 0,90. Assim:

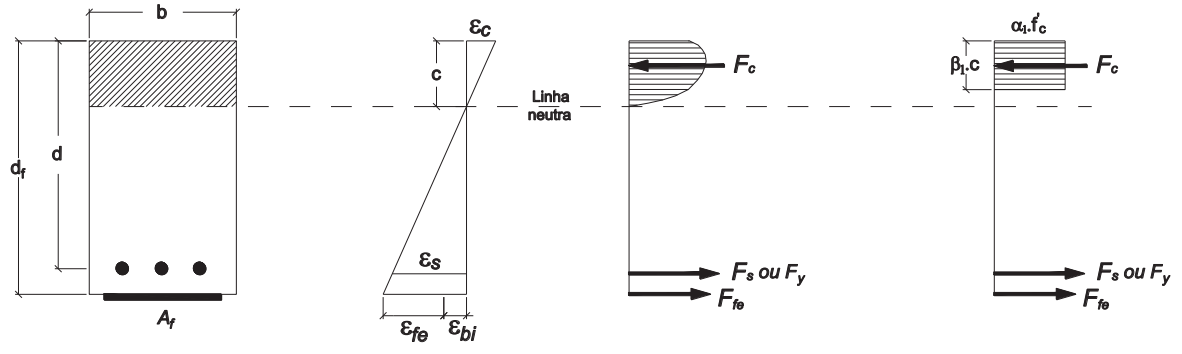
$$M_u = \phi \cdot M_n$$
$$M_u = 0{,}90 \cdot 12{,}5kN.m = 11{,}2kN.m$$

Tendo em vista a configuração de carregamento utilizada, este momento corresponde a uma carga concentrada, aplicada a meio vão, de 19,5 kN.

2.1.3 ACI 440.2R (2017)

Para o cálculo da resistência teórica da viga após a aplicação do sistema de reforço CFRP EBR, foram consideradas as recomendações da ACI 440.2R (2017). A esquematização do equilíbrio de forças de uma viga de concreto armado reforçada com mantas de CFRP segundo a técnica EBR pode ser verificada na Figura 6.

Conforme especificações da norma ACI 440.2R (2017), a tensão de tração máxima de projeto do compósito de FRP (f_{fu}) depende da tensão fornecida pelo fabricante do FRP ou obtida em análises experimentais (f^*_{fu}) e o coeficiente de exposição ambiental (C_E), o qual é apresentado na Tabela 1. A tensão de tração máxima no compósito, após incidência do coeficiente de agressividade do meio, é dada pela Equação 12. Mesma análise é realizada para a deformação, cujo valor máximo de



Fonte: ACI 440.2R (2017)

Figura 6
Equilíbrio de forças da seção reforçada

projeto do compósito de FRP (ε_{fu}) também depende da deformação máxima do compósito de FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) (ε^*_{fu}), fornecida por ensaio ou por catálogo do fabricante, e da aplicação do coeficiente (Equação 13).

$$f_{fu} = f^*_{fu} \cdot C_E \quad (12)$$

$$\varepsilon_{fu} = \varepsilon^*_{fu} \cdot C_E \quad (13)$$

Neste caso, considerou-se que a viga dimensionada se encontra em um ambiente interno e será reforçada com mantas de CFRP. Deste modo, o coeficiente C_E adotado é igual a 0,95 e as propriedades para dimensionamento são apresentadas nas Equações 14 e 15.

$$f_{fu} = 3150MPa \cdot 0{,}95 = 2992{,}50MPa \quad (14)$$

$$\varepsilon_{fu} = 12{,}8‰ \cdot 0{,}95 = 12{,}16‰ \quad (15)$$

No cálculo do máximo momento resistente da viga reforçada, foram utilizadas as formulações apresentadas nas Equações 16 a 27.

A máxima deformação permitida para o CFRP (ε_{fd}) é obtida pela análise do menor dos valores obtidos segundo a Equação 16, onde f_c é a resistência característica do concreto, n é o número de camadas de CFRP, E_f é o módulo de elasticidade da fibra de carbono, t_f é a espessura e ε_{fu} é a deformação do CFRP.

$$\varepsilon_{fd} \leq \begin{cases} 0{,}41 \cdot \sqrt{\dfrac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \\ 0{,}9 \cdot \varepsilon_{fu} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{fd} \leq \begin{cases} 0{,}41 \cdot \sqrt{\dfrac{28{,}50MPa}{1 \cdot 248000MPa \cdot 0{,}176mm}} = 0{,}01047 = 10{,}47‰ \\ 0{,}9 \cdot 0{,}01216 = 0{,}01094 = 10{,}94‰ \\ \therefore \varepsilon_{fd} = 0{,}01047 = 10{,}47‰ \end{cases} \quad (16)$$

Para dar início ao dimensionamento, arbitra-se uma posição inicial para a posição da linha neutra (c) para se encontrar a deformação efetiva (ε_{fe}) e a tensão de ruptura do CFRP (f_{fe}), cujos valores são obtidos por intermédio da Equação 17. Note-se que ε_{cu} é a deformação última do concreto, sendo limitada em 3‰ segundo a norma americana, d_f é a altura útil do reforço à flexão (considerada como sendo a altura total do elemento) e ε_{bi} é a deformação pré-existente no concreto no momento da instalação do reforço (neste caso, frente à presença do peso próprio do elemento, $\varepsilon_{bi} = 0{,}092‰$).

O valor para a profundidade de linha neutra recomendado pela norma para a primeira iteração é igual a $0{,}2 \cdot d$, o qual, para este exemplo, não leva ao equilíbrio entre os blocos comprimidos e tracionados. Deste modo, neste exemplo, foi arbitrada a profundidade de linha neutra de 4,82cm.

$$\varepsilon_{fe} \leq \begin{cases} \varepsilon_{cu} \cdot \left(\dfrac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \\ \varepsilon_{fd} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{fe} \leq \begin{cases} 3‰ \cdot \left(\dfrac{20cm - 4{,}82cm}{4{,}82cm}\right) - 0{,}092‰ = 9{,}36‰ \\ 10{,}47‰ \\ \therefore \varepsilon_{fe} = 9{,}36‰ \end{cases} \quad (17)$$

Utilizando-se a Lei de Hooke, sabendo-se que E_f é igual a 248 GPa e utilizando-se a Equação 18, determina-se o valor da tensão efetiva instalada no material de reforço (f_{fe}).

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}$$
$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 248000MPa \cdot 9{,}36‰ = 2321{,}28MPa \quad (18)$$

Uma vez definida a deformação no material de reforço, a deformação (ε_s) e a tensão (f_s) na armadura longitudinal, assim como a deformação no concreto (ε_c), foram determinados na sequência com o uso das Equações 19 e 20.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c}\right)$$
$$\varepsilon_s = (9{,}36‰ + 0{,}092‰) \cdot \left(\frac{17{,}5cm - 4{,}82cm}{20cm - 4{,}82cm}\right) = 7{,}9‰ \quad (19)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c}\right)$$
$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c}\right) = (9{,}36‰ + 0{,}092‰) \cdot \left(\frac{4{,}82cm}{20cm - 4{,}82cm}\right) = 3{,}00‰ \quad (20)$$

A intensidade de deformação obtido na armadura (7,9‰) indica que ela já se encontra em escoamento. Deste modo, a tensão da armadura para esta intensidade de deformação é igual a f_s = 500 MPa .

Uma vez que as intensidades de tensão e deformação no CFRP e na armadura longitudinal foram determinados, o equilíbrio interno da seção é encontrado com o uso das Equações 21 a 25, onde ε_c é a deformação máxima do concreto não confinado,

▶ Tabela 1 – Coeficiente de exposição ambiental

Condição de exposição	Tipo de fibra	C_E
Concreto não exposto à água e intempéries	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
Concreto exposto ao ambiente	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
Concreto exposto a ambientes agressivos	Carbono	0,85
	Vidro	0,50
	Aramida	0,70

Fonte: adaptado de ACI 440.2R (2017)

E_c é o módulo de elasticidade do concreto (segundo a norma americana, $E_c = 4700\sqrt{f_c}$), β_1 é razão de profundidade do bloco retangular das tensões de compressão, α_1 é um parâmetro definido para seção retangular de blocos de concreto à compressão, A_s é a área de aço da seção, A_f é a área da seção transversal da fibra de carbono, f_s é a tensão de escoamento do aço e f_{fe} é a tensão na fibra de carbono. Assim:

$$\varepsilon_c' = \frac{1{,}71 \cdot f_c'}{E_c}$$
$$\varepsilon_c' = \frac{1{,}71 \cdot 28{,}5MPa}{4700\sqrt{28{,}5MPa}} = 0{,}00194 = 1{,}94‰ \quad (21)$$

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon_c' - 2 \cdot \varepsilon_c}$$
$$\beta_1 = \frac{4 \cdot 1{,}94‰ - 3‰}{6 \cdot 1{,}94‰ - 2 \cdot 3‰} = 0{,}84 \quad (22)$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2}$$
$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot 1{,}94‰ \cdot 3‰ - (3‰)^2}{3 \cdot 0{,}84 \cdot (1{,}94‰)^2} = 0{,}89 \quad (23)$$

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot b}$$
$$c = \frac{1{,}57cm^2 \cdot 50kN/cm^2 + 0{,}1936cm^2 \cdot 232{,}128kN/cm^2}{0{,}89 \cdot 2{,}85kN/cm^2 \cdot 0{,}84 \cdot 12cm} = 4{,}82cm \quad (24)$$

Como a profundidade de linha neutra (c) arbitrada é igual a obtida no dimensionamento, considera-se o equilíbrio entre os blocos comprimidos e tracionados.

O momento nominal (M_n) do elemento reforçado pode ser encontrado com o uso da Equação 25, onde F_s é a força resultante da armadura tracionada (M_s), Ψ_f é o fator de redução (0,85) baseado em análises de confiabilidade de elementos reforçados à flexão e F_f é a força resultante da fibra de carbono tracionada (M_f).

$$M_n = F_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2}\right) + \Psi_f \cdot F_f \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 \cdot c}{2}\right)$$
$$M_s = F_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 . c}{2}\right)$$
$$M_s = 1{,}57cm^2 \cdot 50kN/cm^2 \cdot \left(0{,}175m - \frac{0{,}84 \cdot 0{,}0482m}{2}\right) = 12{,}15kN.m$$
$$M_f = \Psi_f \cdot F_f \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1 . c}{2}\right)$$
$$M_f = 0{,}85 \cdot 0{,}1936cm^2 \cdot 232{,}128kN/cm^2 \cdot \left(0{,}2m - \frac{0{,}84 \cdot 0{,}0482m}{2}\right) = 6{,}87kN.m$$
$$M_n = M_s + M_f = 12{,}15 + 6{,}87 = 19{,}02kN.m \quad (25)$$

Por fim, o momento resistente de projeto (M_u) é obtido pelo produto entre fator de redução (ϕ), o qual é obtido com o uso da Equação 26, e o momento nominal (M_n), tal como apresentado na Equação 27.

$$\phi \begin{cases} 0{,}90 & para \quad \varepsilon_s \geq 0{,}005 \\ 0{,}65 + \dfrac{0{,}25 \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0{,}005 - \varepsilon_{sy}} & para \quad \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0{,}005 \\ 0{,}65 & para \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (26)$$

Neste caso, como ε_s = 7,9‰, ϕ possui o valor de 0,90. Assim, o momento resistente da seção transversal é igual ao apresentado na Equação 27.

$$M_u = 0{,}90 \cdot 19{,}02kN.m = 17{,}11kN.m \quad (27)$$

Tendo em vista a configuração de carregamento utilizada, este momento corresponde a uma carga concentrada, aplicada a meio vão, de 29,8 kN.

2.2 Estudo paramétrico

Com o uso da metodologia de dimensionamento anteriormente apresentada, fez-se o dimensionamento da mesma seção transversal anteriormente apresentada, mas variando-se o número de camadas de material de reforço (1 a 5). Neste sentido, a Tabela 2 apresenta a previsão do momento resistente da seção transversal (M_u), o incremento na capacidade de carga esperado com a utilização do sistema de reforço e a deformação esperada no concreto, armadura existente e sistema de reforço. Nesta Tabela, ρ_f é a taxa de material de reforço [$(\rho_f = A_f/(b \cdot d_f)$] da seção transversal e ρ_{eq} é a taxa de armadura metálica equivalente [$(\rho_{eq} = A_s/(b \cdot d) + (A_f \cdot E_f/E_s)/(b \cdot d_f)$].

Baseado na geometria analisada e nas propriedades dos materiais utilizados, verifica-se que, independentemente do número de camadas de mantas de CFRP aplicadas, o sistema de reforço é capaz de proporcionar incrementos significativos

Tabela 2 – Resultados analíticos do cálculo do reforço com mantas de CFRP

Camadas de CFRP	ρ_f (%)	ρ_{eq} (%)	M_u (kN.m)	Incremento (%)	ε_c (‰)	ε_s (‰)	ε_f (‰)
0	—	0,75	11,2	—	3,0	13,4	—
1	0,08	0,84	17,1	52,7	3,0	7,9	9,4
2	0,16	0,94	20,0	78,6	3,0	6,1	7,3
3	0,24	1,03	22,0	96,4	2,9	5,0	6,1
4	0,32	1,12	22,0	96,4	2,8	4,3	5,2
5	0,40	1,22	22,0	96,4	2,8	3,8	4,7

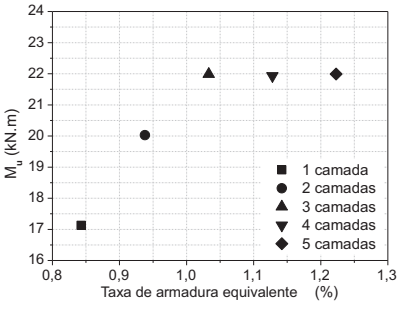


Figura 7
Incremento da capacidade de carga *versus* taxa de armadura equivalente (ρ_{eq})

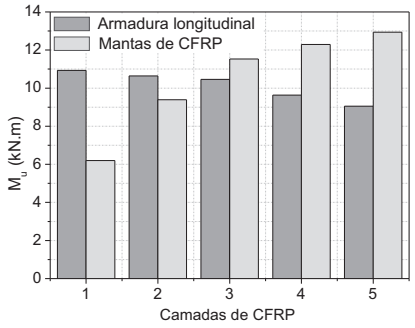


Figura 8
Parcela de momento resistido pela armadura longitudinal e pela manta de CFRP de acordo com a quantidade de camadas de mantas de CFRP

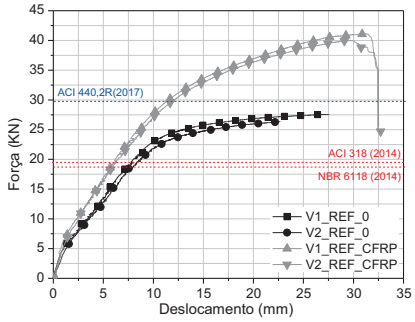


Figura 9
Relação Força *versus* Deslocamento vertical das vigas analisadas

na capacidade de carga das vigas de concreto. Verificou-se que o sistema de reforço CFRP EBR proporcionou incrementos de carga que variaram de 52,7% a 96,4%, respectivamente, em relação às previsões de dimensionamento da viga de referência segundo a norma ACI 318 (2014). A Figura 7 apresenta o diagrama M_u *versus* taxa de armadura equivalente para os elementos reforçados analisados. Verifica-se que a maior eficácia do sistema de reforço foi obtida com a aplicação da primeira camada de material de reforço, o qual proporcionou uma expectativa de capacidade resistente de 52,7% em comparação à viga dimensionada segundo a ACI 318 (2014). A partir de três camadas de mantas de CFRP, o incremento de capacidade resistente das vigas reforçadas fica limitado devido aos limites de ductilidade impostos pela ACI 440.2R (2017) e, também, pela limitação de tensões cisalhantes na camada de adesivo, o qual é utilizado para colagem do sistema de reforço ao substrato de concreto. A análise dos resultados apresentados na Tabela 2 também permite verificar a redução das deformações no concreto, aço e material de reforço. Desta forma, o reforço dessa viga deve ser feito com até três camadas de mantas.

A Figura 8 apresenta a parcela de momento resistente (M_u), tanto pela armadura longitudinal existente (M_{us}) quanto pelo sistema de reforço composto por mantas de CFRP (M_{uf}). Note-se que o aumento do número de camadas de reforço leva à redução do momento resistido pela armadura longitudinal existente e a um aumento significativo do momento resistido pelas mantas de CFRP.

2.3 Comparação entre os modelos de dimensionamento e resultados experimentalmente obtidos

Os resultados obtidos no programa de ensaios são apresentados e discutidos de forma a avaliar a expectativa de capacidade resistente obtida via modelos de dimensionamento. Na Figura 9 apresenta-se a curva Força (F) *versus* deslocamento vertical na seção solicitada.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados experimentais médios obtidos no momento do início do escoamento da armadura (ε_{sy}) e quando as vigas registraram o máximo carregamento (F_{max}). Nesta tabela, F_{sy} e F_{max} são as forças registradas para as deformações de início de escoamento da armadura longitudinal e para a máxima força, respectivamente; u_{sy} e $u_{F\,max}$ são os deslocamentos verticais

Tabela 3 – Resumo dos resultados médios obtidos no programa experimental

Identificação	Escoamento da armadura longitudinal (ε_{sy})				Máxima força registrada						Modo de ruptura
	F_{sy} (kN)	u_{sy} (mm)	ε_c (‰)	$\varepsilon_{t,max}$ (‰)	F_{max} (kN)	$u_{F\,max}$ (kN)	ε_c (‰)	ε_s (‰)	$\varepsilon_{t,max}$ (‰)	IR (%)	
V_REF	22,9	10,6	—*	—	26,9	25,1	—*	11,4	—	—	Escoamento da armadura
V_REF_CFRP	26,6	9,5	0,9	2,9	40,6	32,6	2,6	13,4	9,9	50,4	Destacamento do CFRP

* Extensômetros mecanicamente danificados

registrados para F_{sy} e F_{max}; ε_c, ε_s e $\varepsilon_{F\ max}$ são as deformações no concreto, armadura longitudinal e na manta de CFRP para F_{sy} e F_{max}, respetivamente. Apresenta-se, ainda, o indicador da eficácia das soluções de reforço à flexão adotada em termos de aumento da capacidade máxima de carga (IR), o qual foi obtido pela força média registrada para as vigas reforçadas e sem reforço, respectivamente, e o modo de ruptura para cada viga ensaiada.

Uma análise geral dos dados da Tabela 3 e da Figura 9 permite constatar que o reforço é muito eficaz para aumento da capacidade de carga das vigas reforçadas. As vigas sem reforço apresentaram primeira fissura visível quando uma força média de 5 kN foi obtida, enquanto as vigas reforçadas apresentaram fissuras visíveis com força média de 7,5 kN. A partir desses pontos, todas as vigas apresentaram redução de rigidez devido à fissuração. Essa nova rigidez mantém-se estável até o início do escoamento da armadura longitudinal tracionada. Para a máxima força registrada no ensaio das vigas de concreto reforçadas com uma camada de manta de CFRP, verifica-se um aumento de capacidade de carga de 50,4% e redução do deslocamento vertical de 16% e 10% em relação as vigas não reforçadas. Com relação aos modos de ruptura, as vigas de referência (sem nenhum tipo de material de reforço) apresentam ruptura dúctil baseada no escoamento da armadura longitudinal tracionada. As vigas reforçadas apresentam ruptura menos dúctil devido ao destacamento do material de reforço aderido ao substrato de concreto.

A Figura 9 também apresenta a comparação entre o comportamento obtido em laboratório e a expectativa de carga obtidas com as normas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014) e ACI 440.2R (2017). Verifica-se, para as vigas analisadas, que os modelos de dimensionamento utilizados conduzem a resultados seguros.

3. CONCLUSÕES

A técnica de reforço de estruturas de concreto armado com FRPs está cada vez mais presente na indústria da construção civil para o aumento da capacidade de carga de um elemento estrutural. Neste sentido, este trabalho apresentou o dimensionamento à flexão de uma viga biapoiada reforçada segundo o sistema EBR CFRP, cujos resultados foram comparados aos obtidos em ensaios. Além disso um estudo paramétrico sobre o comportamento desse elemento, variando o número de camadas da manta de reforço, foi realizado.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

- O dimensionamento baseado no uso da técnica EBR proposto pelo ACI 440.2R (2017) mostra-se analiticamente eficaz para determinar o incremento da capacidade de carga de vigas de concreto armado reforçadas com FRPs;
- Os modelos apresentados permitem dimensionamento seguro dos elementos de concreto com e sem sistemas de reforço;
- Verifica-se que a maior eficácia do sistema de reforço foi obtida com a aplicação da primeira camada de material de reforço, o qual proporcionou uma expectativa de incremento de capacidade resistente de 52,4% em comparação à norma ACI 318;
- A partir de três camadas de mantas de CFRP, não há aumento na capacidade de carga das vigas reforçadas devido aos limites de ductilidade impostos pela ACI 440.2R (2017);
- O aumento do número de camadas de reforço causa uma diminuição da contribuição da armadura longitudinal no momento resistente, uma vez que o sistema de reforço passa a absorver os esforços de tração do elemento reforçado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ACI Committee 440.2R. (2017). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, ACI Committee 440, 116 pp.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014) . Projeto de estruturas de concreto: NBR 6118, Rio de Janeiro.

[3] ACI Committee 318R. (2014). Building code requeriments for structural concrete. ACI Committee 318, Detroit, Michigan.

[4] Ferreira, D. C. (2019). Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.

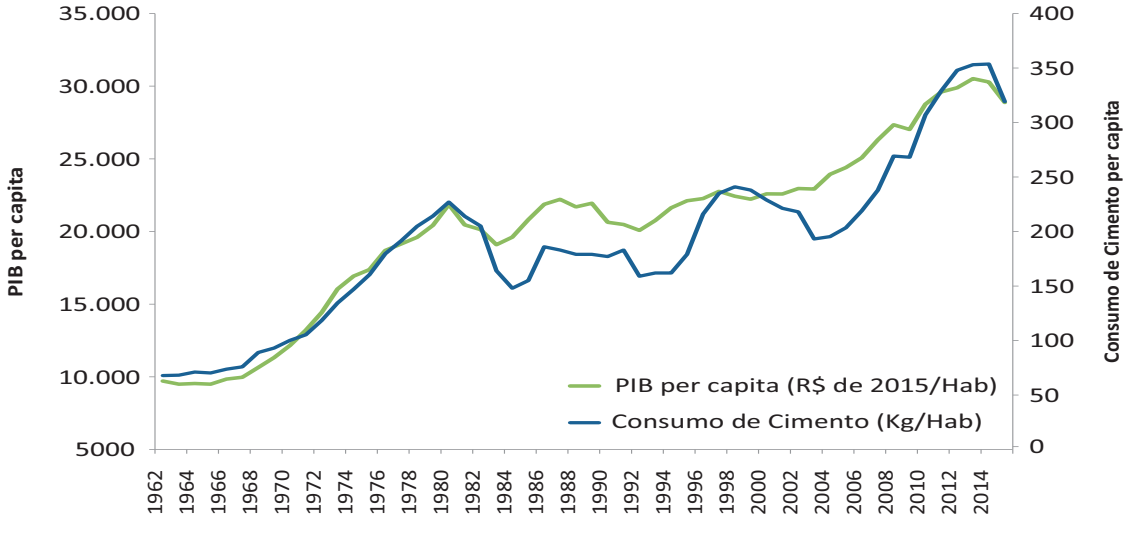
Projeções para o consumo de cimento no Brasil e de emissões absolutas de CO_2 para o período 2020 a 2050

FLAVIO GUIMARÃES – Economista
GONZALO VISEDO – Coordenador de Meio Ambiente
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

I. INTRODUÇÃO

O Brasil ainda é um país onde estão presentes inúmeras carências e tem no déficit habitacional e na infraestrutura dois dos principais gravames que comprometem o bem-estar e qualidade de vida de sua população. Para mudança deste quadro é imprescindível o uso de um insumo utilizado do início ao fim de qualquer obra: o cimento. Não à toa! Ele é parte fundamental do concreto, o material produzido pelo homem mais consumido no mundo.

O Roadmap Tecnológico do Cimento, lançado recentemente pela indústria de cimento brasileira, em parceria com inúmeros atores nacionais e internacionais, traz pela primeira vez uma projeção potencial de produção e consumo para as próximas décadas deste importante insumo para o desenvolvimento do país. E vai além, projetando também diferentes cenários de redução das emissões de CO_2 pela indústria, até 2050.



Fonte: SNIC e IPEA Data, 2016

▶ **Figura 1**
Brasil: PIB *per capita* e consumo de cimento per capita (1962 – 2015)

▶ **Tabela 1 – Cenário referência para projeção do consumo de cimento**

	2014	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PIB (bilhões 2015 USD em PPC[34]	3.234	3.196	3.796	3.232	4.928	5.413	5.660	6.218
População (milhões)	203	212	218	223	226	228	228	226
PIB *per capita* (2015 USD/hab)	15.951	15.072	17.386	18.386	21.765	23.724	24.810	27.470

[34] PPC é a paridade do poder de compra, segundo IBGE, 2015. | **Fonte:** Roadmap Tecnológico do Cimento, 2019

2. VARIÁVEIS E CENÁRIOS DE PROJEÇÃO

Diversas variáveis estão relacionadas com o consumo de cimento e, portanto, apresentam potencial para explicá-lo e projetá-lo. A renda nacional é uma candidata óbvia, já que é uma medida satisfatória do dinamismo da economia e de seu crescimento. A observação da relação de longo prazo entre a renda, medida pelo PIB, e o consumo de cimento para um conjunto significativo e variado de países, inclusive o Brasil, mostra que, de fato, essa variável está estritamente correlacionada com o consumo de cimento, sendo fortemente influenciado pelos ciclos econômicos (Figura1).

Essa cointegração entre as duas séries levou à bem-sucedida adoção de um modelo de projeção baseado em um mecanismo de correção de erros (MCE).

Para o Roadmap do Cimento, foram considerados dois cenários para o crescimento do PIB até 2050: baixa demanda e alta demanda. Com isso, fez-se as projeções de consumo de cimento por habitante e total, levando-se em consideração as elasticidades de longo prazo estimadas. Os cenários para o crescimento do PIB foram construídos a partir de um conjunto de projeções de instituições financeiras, organismos internacionais (Banco Mundial e FMI) e a mediana das projeções do relatório Focus do Banco Central do Brasil.

Alguns fatos foram levados em conta: as grandes deficiências em infraestrutura, o elevado déficit habitacional, os avanços tecnológicos e o crescimento populacional.

Estradas, pontes, portos, aeroportos, geração e distribuição de energia elétrica e redes de saneamento e abastecimento de água, entre diversos outros tipos de obra, demandarão cimento em sua construção. Uma vez construída esta infraestrutura, haverá moderação no crescimento da demanda pelo material – como é hoje observado em países desenvolvidos, ainda que sua manutenção tenda a manter o consumo em níveis elevados.

No que diz respeito a habitações, espera-se que, com o crescimento da renda e sob a hipótese da persistência de políticas habitacionais ativas, ocorra a eliminação ou pelo menos uma diminuição significativa deste déficit, o que igualmente impulsionaria o consumo de cimento por alguns anos, seguindo-se, então, um período de moderação no consumo para uso na construção residencial.

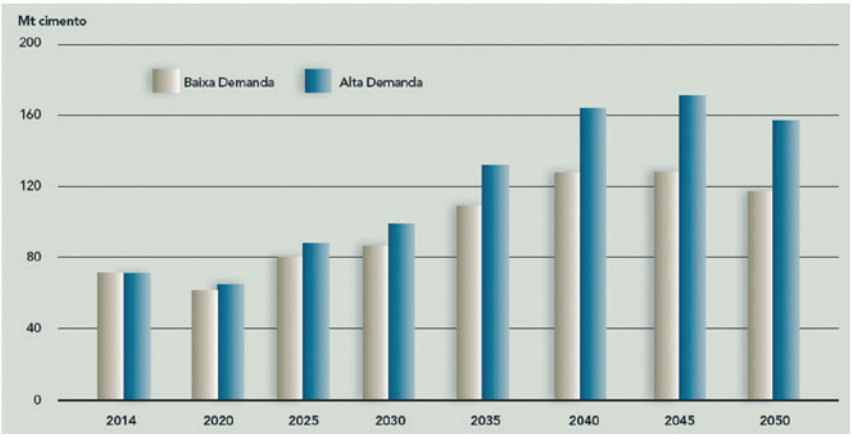
Por sua vez, no longo prazo, avanços tecnológicos e técnicas mais modernas de construção tendem a aumentar a eficiência no uso do material, acarretando uma menor demanda de cimento para um mesmo número de edificações.

Finalmente, outra variável que não poderia ficar de fora desse modelo de projeção é a população. Segundo as projeções do IBGE, as taxas de crescimento populacional cairão ao longo do período de projeção e, após atingir um pico de 228,4 milhões de habitantes em 2042, o próprio tamanho da população brasileira passará a cair, chegando a 2050 com 226,3 milhões de habitantes.

Todos esses fatores apontam na direção de uma redução, a partir de certo momento no horizonte de projeção, na intensidade da relação de longo prazo entre a renda do país, medida pelo PIB, e o consumo de cimento. Este efeito foi incluído no modelo estimado (Tabela1).

3. PROJEÇÃO DE CONSUMO DE CIMENTO

A análise dos resultados obtidos indica um crescimento significativo da demanda por cimento no Brasil entre 2014 e 2050 nos dois cenários, principalmente no período entre 2025 e 2045.



Fonte: Roadmap Tecnológico do Cimento – 2019

▶ **Figura 2**
Projeção do consumo aparente de cimento 2020 – 2050

A magnitude deste crescimento está fortemente condicionada ao crescimento da renda do país, ainda que menos que no passado, devido a mudanças esperadas na relação de longo prazo entre o consumo de cimento e a renda nacional que devem ocorrer nas próximas décadas, intensificando-se no final do período de projeção. Destacam-se a redução do déficit habitacional, o aumento do investimento em infraestrutura, uma maior eficiência no uso do produto no longo prazo e as profundas mudanças demográficas que transformarão a composição e o tamanho da população brasileira nas próximas décadas. Projeta-se que o consumo deva crescer com força até meados da década de 2040 para, a partir de então, desacelerar, até que haja redução de demanda a partir de 2045. Esse crescimento de longo prazo representa um desafio considerável para a indústria de cimento brasileira em termos de demanda de energia e emissões de CO_2.

4. PROJEÇÃO DAS EMISSÕES DE CO_2

As projeções de emissões e seus potenciais de redução foram estimadas tendo a variante de baixa demanda como parâmetro, por ter sido considerada a mais realista. Em uma eventual variante de alta demanda, o crescimento da produção de cimento exercerá maior pressão sobre os esforços para reduzir a intensidade de carbono, já que a emissão também será maior.

Nesse contexto de baixa demanda, mantendo constantes os padrões atuais de emissão (de 564 kg de CO_2/t de cimento produzida), o setor sairia de 40 milhões de toneladas de CO_2 emitidas em 2014 para 66 milhões de toneladas de CO_2 emitidas em 2050. Em contrapartida, adotando-se uma série de medidas de mitigação dessas emissões descritas no Roadmap, o setor conseguiria reduzir sua intensidade de carbono para 375 kg de CO_2/t de cimento até 2050, alcançando uma emissão total de 44 milhões de toneladas até 2050, ou seja, uma redução de 33% em relação ao cenário de referência.

▶ **Tabela 2 – Resultados da projeção**

	2014	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Consumo per capita de cimento (kg/hab.)								
Variante de baixa demanda	352	290	355	385	478	555	556	513
Variante de alta demanda	352	305	402	441	579	714	744	691
Produção de cimento (Mt)								
Variante de baixa demanda	71	62	80	86	108	127	127	116
Variante de alta demanda	71	65	88	98	131	163	170	156

Fonte: Roadmap Tecnológico do Cimento, 2019

Contribuição dos concretos de alto desempenho na redução do impacto ambiental e incremento da sustentabilidade

JÉSSIKA PACHECO
PhD engenharia | UNICAMP

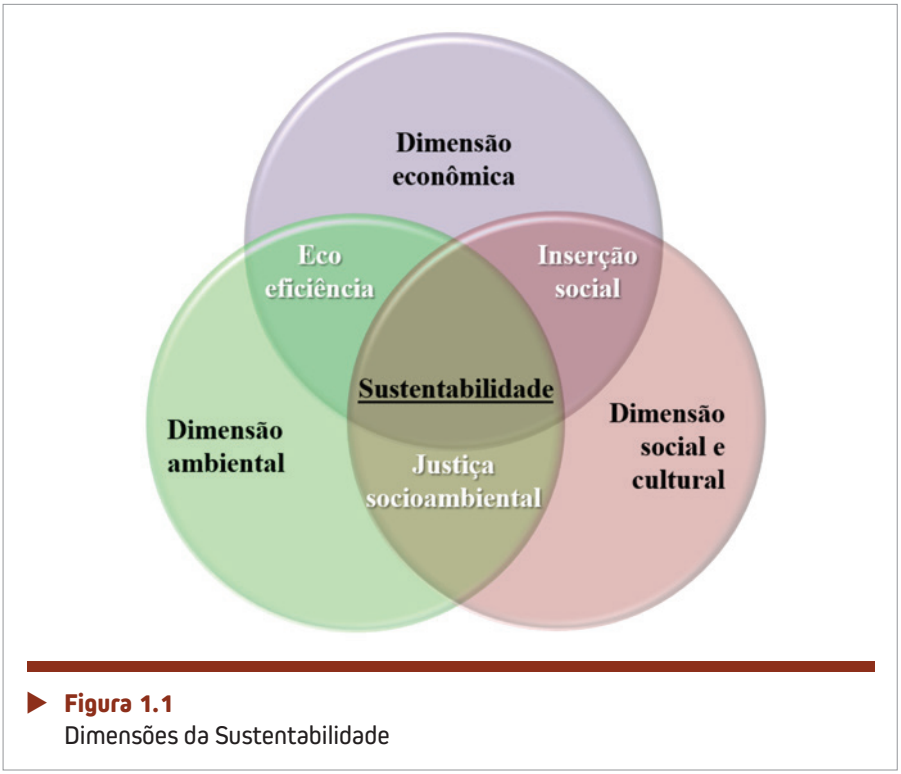
MARIANA RIBEIRO
InterCement

PAULO HELENE
PhD Engenharia | IBRACON

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável deve ocorrer em três dimensões, como se ilustra na Fig. 1.1:

1. Ambiental: no intuito de encontrar um equilíbrio entre proteger o ambiente físico e seus recursos e utilizar esses recursos de modo que o planeta continue provendo uma qualidade de vida aceitável aos seres humanos;
2. Econômica: requerendo o desenvolvimento de um sistema econômico que facilite o acesso de todos aos recursos e às oportunidades, promovendo a prosperidade dentro do que é ecologicamente possível e sem violar direitos humanos básicos;
3. Social: buscando o desenvolvimento de sociedades justas, que permita o desenvolvimento humano e garantam oportunidades de aperfeiçoamento pessoal e qualidade de vida aceitável.



▶ **Figura 1.1**
Dimensões da Sustentabilidade

A indústria da construção civil é o setor que emprega 7% da população mundial, que usa 2/5 de toda a energia produzida no mundo e consome 50% do total de recursos naturais da crosta terrestre. O concreto é o material que ocupa a posição de maior destaque, sendo o produto industrializado mais utilizado pela sociedade, com consumo atual mundial estimado em 17 bilhões de toneladas ao ano, considerando um consumo de cimento médio de 300 kg/m³ (CEMBUREAU, 2017).

Portanto, o estudo do concreto no âmbito da construção sustentável torna-se a cada dia mais primordial. Este artigo recupera conceitos de gestão ambiental e propõe a observação de novos critérios de sustentabilidade no projeto e execução das estruturas de concreto armado, empregando, paradoxalmente, concreto de alta

resistência com elevados consumos de cimento.

2. GESTÃO AMBIENTAL

Quando a busca pelo desenvolvimento econômico passou a comprometer seriamente os ecossistemas e a saúde humana, por meio da poluição e do esgotamento de recursos naturais, a questão da sustentabilidade veio à tona. A partir de então, diversas conferências com enfoque neste tema ocorreram, no intuito de elaborar prescrições normativas, iniciando-se no Brasil em 1992 com a conferência RIO-92.

Como resposta a esta demanda mundial por uma gestão ambiental mais confiável, justa e consciente, a Comissão Técnica 207 da ISO (TC 207), em 1994, desenvolveu a série de normas ISO 14000, que propôs o conceito de Avaliação do Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment – LCA*). Este conceito envolve a análise e determinação dos impactos ambientais de produtos ou serviços em todas as fases de seu ciclo de vida: aquisição de matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final do produto ou dos resíduos resultantes do serviço.

Através da Avaliação do Ciclo de Vida é também possível produzir a Declaração Ambiental de Produto (*Environmental Product Declaration – EPD*), considerada uma das melhores e mais completas referências de sustentabilidade atualmente.

A EN 15804:2012 estabelece três tipos de EPD, com base nos estágios do ciclo de vida abordados no estudo de cada produto ou serviço:

1. *Cradle to gate* ("do berço ao portão"): recomendada, aborda apenas o estágio de produção (suprimento de materiais, transporte, manufatura e processos associados);
2. *Cradle to gate with options*: opcional, aborda o estágio de produção e outros estágios adicionais, de escolha do fornecedor do produto ou serviço;
3. *Cradle to grave* ("do berço ao túmulo"): opcional, envolve os processos de produção, instalação, uso, manutenção, reparo ou substituição, demolição, tratamento para reuso, reconstituição, reciclagem e disposição final, considerada a opção mais correta, porém mais trabalhosa de análise.

Ainda, segundo a EN 15804:2012, os indicadores de impacto ambiental, quantificados em diferentes categorias em cada estágio das EPDs, envolvem a análise dos parâmetros elencados a seguir (BENTO & ROSSIGNOLO, 2015):

a. Potencial de aquecimento global, em kg de CO_2 equivalente – gás emitido durante a produção do cimento;
b. Potencial de esgotamento da camada de ozônio estratosférico, em kg de CFC 11 equivalente;
c. Potencial de acidificação do solo e da água, em kg de SO_2 equivalente – decorrente dos processos de combustão para a produção de eletricidade e aquecimento;
d. Potencial de eutrofização, em kg de $(PO_4)^{3-}$ equivalente – enriquecimento abrupto e excessivo de nutrientes à base de nitrogênio ou fósforo na água ou no solo;
e. Potencial de formação de ozônio troposférico, em kg de etileno equivalente – devido ao transporte rodoviário;
f. Potencial de esgotamento de recursos abióticos (elementos), em kg de antimônio (Sb) equivalente;
g. Potencial de esgotamento de recursos abióticos (combustíveis fósseis), em MJ.

Além desses indicadores de impacto ambiental, a mesma norma também expõe parâmetros que descrevem a utilização de recursos naturais (renováveis ou não), energia e água.

Ainda no contexto de construções sustentáveis, diversas entidades internacionais, visando incentivar este segmento de construção, criaram certificações para valorizar e orientar a transformação de projetos convencionais em projetos ecologicamente corretos. Dentre estas certificações, pode-se destacar o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), Selo Casa Azul (Sistema de certificação brasileiro desenvolvido pela Caixa Econômica Federal), HQE (*Haute Qualité Environmentale*), BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) e DGNB (*German Sustainable Building Council*). Entretanto, os critérios de avaliação dessas certificações, equivocadamente, não contemplam o emprego de concretos de alta resistência na composição positiva das pontuações.

Apesar de parecer um paradoxo, ao longo deste artigo, serão apresentadas as diversas vantagens envolvidas na adoção deste tipo de concreto, visando fundamentar a proposta de sua inclusão nos sistemas de certificação.

3. O CONCRETO É SUSTENTÁVEL?

Conforme já abordado, o concreto é o material de construção mais amplamente utilizado no mundo, devido, principalmente, à sua resistência, flexibilidade, durabilidade, facilidade de execução e baixo preço. Entretanto, como qualquer outro produto a ser utilizado na construção, a produção do concreto

e de seus componentes (em especial, o cimento) consome energia e água, além de resultar na geração CO_2.

Segundo o Roadmap Brasil (2019) a produção do cimento consome 3,5GJ de energia por tonelada de clínquer, libera em torno de 564 kg de CO_2 por tonelada de cimento e é responsável por cerca de 7% das emissões totais de CO_2 no mundo. O Brasil, com produção anual de 54 milhões de toneladas de cimento (CEMBUREAU, 2017), contribui com aproximadamente 2,6% do total de emissões de CO_2 do mundo.

O impacto ambiental do concreto, entretanto, não é causado apenas pelo cimento. Para a produção do concreto, são também utilizados materiais e recursos naturais não renováveis, como a areia e a brita, beirando o montante de consumo de 12 bilhões de toneladas anuais. Considerando o impacto da exploração, do processamento e do transporte dessas matérias-primas, observa-se que todo processo de produção do concreto parece afetar desfavoravelmente o ambiente, a despeito de ser fundamental para a melhoria da qualidade de vida da humanidade através da construção de casas, pontes, estradas, viadutos, portos, estações de tratamento de água e de esgoto, escolas, hospitais, etc.

A indústria do concreto utiliza também grande quantidade de água potável, cerca de 1 trilhão de litros a cada ano, só como água de amassamento, à qual ainda se somam grandes parcelas de água de lavagem das betoneiras e equipamentos e água de cura do concreto.

Para uma análise completa e adequada dos impactos ambientais das estruturas de concreto deve-se considerar sua resistência à compressão, sua durabilidade e a vida útil, levando em conta o longo prazo (mais de 50 anos) das construções em concreto.

Entretanto, ocorre que, segundo a EN 15804:2012, apenas a análise *cradle to gate* do ciclo de vida é atualmente recomendável e até obrigatória em certas circunstâncias. Com isso, as empresas de serviços de concretagem, por exemplo, estão se concentrando em realizá-la, desestimulando, equivocadamente, a utilização de concretos de alta resistência. Em correspondência com esta visão equivocada, os impactos ambientais expostos Tab. 3.1 se referem somente à produção do concreto usinado.

Contrariando esta visão, Levy (2005) explica que os concretos de alto desempenho (*HPC High Performance Concrete*) possuem uma estrutura de poros mais compacta porque, em sua formulação, aditivos superplastificantes e adições minerais reagem com a cal livre, preenchendo os poros e melhorando a resistência à compressão. Em razão disso, nos HPCs, a relação água/cimento é inferior à de um concreto convencional, o que eleva suas propriedades mecânicas e sua durabilidade.

O comportamento mecânico superior dos HPCs permite, ainda, reduções expressivas de seções estruturais, especialmente em elementos comprimidos, gerando grande

▶ Tabela 3.1 – Impactos ambientais para 1m³ de concreto usinado produzido pela empresa de serviços de concretagem *Allied Concrete* (traduzido de *ALLIED CONCRETE*, 2014)

Parâmetro	Impacto / m³						
Resistência à compressão (MPa)	20	25	30	35	40	45	50
Potencial de aquecimento global (kg CO_2 eq)	333	366	395	445	513	539	609
Potencial de esgotamento da camada de ozônio estratosférico (kg CFC 11 eq 10^{-5})	1,10	1,19	1,26	1,39	1,57	1,56	1,83
Potencial de acidificação do solo e da água (kg SO_2 eq)	1,42	1,56	1,68	1,89	2,18	2,29	2,60
Potencial de eutrofização (kg $(PO_4)^{3-}$ eq)	0,339	0,372	0,402	0,451	0,519	0,548	0,620
Potencial de formação de ozônio troposférico (kg etileno eq)	0,0688	0,0756	0,0818	0,092	0,106	0,112	0,127
Potencial de esgotamento de recursos não fósseis (kg Sb eq·10^{-4})	1,10	1,18	1,25	1,41	1,44	1,49	1,83
Potencial de esgotamento de recursos fósseis (MJ)	3080	3390	3650	4090	4700	4900	5570

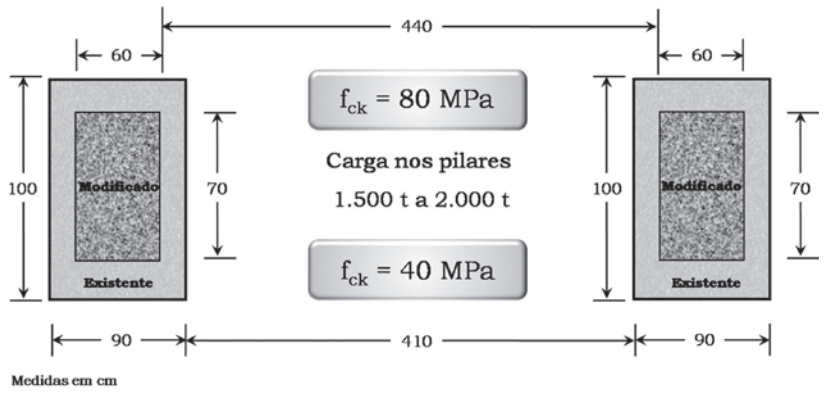


Figura 3.1
Concepção de projeto do *e-Tower*: pilares existentes no projeto original com f_{ck} de 40MPa (90cm x 100cm) e pilares modificados com f_{ck} de 80MPa (60cm x 70cm)

economia de cimento, aço, água e agregados, além de eventual ganho econômico por aumento de áreas úteis para uso, locação e estacionamentos em empreendimentos.

Um exemplo importante da aplicação deste conceito no Brasil é o HPC colorido, com f_{ck} de 80MPa, utilizado no Edifício *e-Tower*, em São Paulo, que permitiu redução significativa da área ocupada por pilares do estacionamento (HELENE & HARTMANN, 2003; HELENE *et al.*, 2016), conforme se observa na fig. 3.1.

Essa modificação (redução da dimensão dos pilares) tornou o projeto compatível com os requisitos da arquitetura e possibilitou atender aos critérios de uma estrutura sustentável. Sob o ponto de vista de vida útil e sustentabilidade, um dos principais mecanismos deletérios de uma estrutura de concreto é a corrosão do aço, fenômeno muito pouco provável em estruturas construídas com concretos de alta resistência. Com o aumento da resistência do concreto, há uma redução importante do risco associado à corrosão de armadura, dado a elevada dificuldade de penetração dos agentes agressivos. Segundo Levy (2005), com poros menores e sem conexão entre si, o concreto de alta resistência está menos sujeito à ação de agentes agressivos presentes na atmosfera e na água, o que faz aumentar sua durabilidade e, consequentemente, a vida útil de projeto da estrutura.

Do ponto de vista do conceito de construção sustentável, alguns parâmetros importantes foram alcançados com essa modificação de projeto: a elevação da vida útil, a redução do uso de recursos naturais, de energia e do volume total de concreto da obra (mesmo com um consumo de cimento por metro cúbico de concreto superior ao concreto do projeto original – com f_{ck} de 40MPa).

Especificamente sobre a elevação da vida útil, foram adotados alguns valores padronizados de bibliografias consagradas[1] para exemplificar a magnitude do crescimento, conforme exposto na Tabela 3.2, onde é possível constatar um crescimento de dez vezes na vida útil de projeto.

Quanto à economia de recursos

Tabela 3.2 – Dados levantados no estudo de caso realizado sobre os pilares de concreto de alta resistência do edifício e-Tower, referentes ao crescimento da vida útil

Elemento	Cobrimento característico[1] de projeto (cm)	Constante de carbonatação adotada[2]: k_{CO_2} (mm/ano$^{1/2}$)	Vida útil de projeto estimada (anos)
Pilar estrutural (90cm x 100cm) com f_{ck} = 40MPa	3,0	2,45	150
Pilar estrutural (60cm x 70cm) com f_{ck} = 80MPa	3,0	0,77	1500

[1] Considerou-se como característico o cobrimento de projeto dentro da tolerância da ABNT NBR 6118:2014, ou seja: o cobrimento mínimo admitido.
[2] Este valor foi adotado em função da Prática Recomendada do IBRACON somente para efeito de demonstrar que a vida útil da estrutura aumenta em dez vezes quando da mudança da resistência do concreto de 40MPa para 80MPa. Destaca-se, no entanto, que estes coeficientes foram estimados.

[1] O valor do coeficiente de carbonatação foi estimado com base na literatura: *Prática recomendada IBRACON – Comentários Técnicos NB-1*, produzida em 2003. O modelo adotado foi simplificado com base no mecanismo de deterioração por carbonatação da estrutura, através da fórmula: $e = k_{co_2} \cdot \sqrt{t}$, sendo e o cobrimento de concreto em cm, K_{CO_2} a constante de carbonatação em cm/ano$^{1/2}$ e t em anos.

Tabela 3.3 – Dados apurados no estudo realizado sobre os pilares de concreto de alta resistência do edifício *e-Tower*, referentes às reduções dos materiais isolados e do concreto global

Material	Redução
Areia	70%
Brita	70%
Cimento	20%
Água	53%
Aço	43%
Fôrma	31%
Concreto	53%

naturais, apurou-se que houve uma redução considerável de todos os materiais utilizados na composição do concreto e na concepção dos pilares com f_{ck} de 80MPa, comparado aos de f_{ck} = 40MPa. O volume dos agregados foi reduzido em 70%, enquanto o do cimento em 20%, conforme Tabela 3.3.

Corroborando este ponto de vista, estudos de Couto (2009) mostram que a concepção de edifícios de 41 pavimentos com concretos de alta resistência é vantajosa, tanto do ponto de vista econômico quanto sustentável, comparados com aqueles concebidos com concretos convencionais. Observou-se que é possível obter uma redução de, aproximadamente, 11% no custo global da estrutura, ao passar de um f_{ck} de 25MPa para um f_{ck} de 50MPa.

Assim, com visão holística e de longo prazo, é preciso que a análise do ciclo de vida do concreto seja realizada levando em conta todo o ciclo de vida desse material e não somente do "berço ao portão".

Bento e Rossignolo (2015) demonstram a importância de uma visão holística, fruto de uma análise *cradle to grave* (do berço ao túmulo) de um edifício residencial hipoteticamente projetado, composto por oito pavimentos-tipo e um pavimento térreo. Foram analisadas nesse estudo as classes de resistência com f_{ck} de 25MPa a 50MPa, como se expõe na Tab. 3.4.

Neste estudo, se considerou a redução de seção em dois momentos, na classe C35 e na classe C45. Concluiu-se que, para este caso, a classe de resistência com menor impacto ambiental seria a C40. A partir dessa classe, o aumento de resistência não resultaria em uma diminuição significativa de seção resistente das peças fletidas e não seria vantajosa para o carregamento determinado inicialmente.

O estudo de Schmidt e Teichmann (2007), visando à construção de uma ponte com estrutura treliçada em concreto protendido (obra de arte), também concluíram que o concreto de

Tabela 3.4 – Balanço geral das categorias de impacto com resultados obtidos para cada resistência da estrutura (BENTO & ROSSIGNOLO, 2015)

Categoria de impacto	C25	C30	C35	C40	C45	C50
Eutrofização (g NO_{3-})	$(2{,}33 \cdot 10^{2})$	Maior $(2{,}43 \cdot 10^{2})$	$(2{,}15 \cdot 10^{2})$	Menor $(2{,}09 \cdot 10^{2})$	$(2{,}10 \cdot 10^{2})$	$(2{,}13 \cdot 10^{2})$
Formação de ozônio fotoquímico (g C_2H_4 eq)	$(4{,}03 \cdot 10^{4})$	Maior $(4{,}10 \cdot 10^{4})$	$(3{,}83 \cdot 10^{4})$	Menor $(3{,}55 \cdot 10^{4})$	$(3{,}61 \cdot 10^{4})$	$(3{,}72 \cdot 10^{4})$
Consumo de recursos materiais (kg)	Maior $(6{,}93 \cdot 10^{2})$	$(6{,}56 \cdot 10^{2})$	$(5{,}43 \cdot 10^{2})$	$(5{,}00 \cdot 10^{2})$	Menor $(4{,}95 \cdot 10^{2})$	$(4{,}90 \cdot 10^{2})$
Consumo de recursos energéticos (kWh)	$(4{,}20 \cdot 10^{1})$	Maior $(4{,}30 \cdot 10^{1})$	$(4{,}01 \cdot 10^{1})$	Menor $(2{,}17 \cdot 10^{1})$	$(2{,}20 \cdot 10^{1})$	$(2{,}26 \cdot 10^{1})$
Ecotoxicidade (m^3 do compartimento)	$(2{,}54 \cdot 10^{2})$	Maior $(2{,}64 \cdot 10^{2})$	$(2{,}20 \cdot 10^{2})$	Menor $(2{,}10 \cdot 10^{2})$	Menor $(2{,}10 \cdot 10^{2})$	Menor $(2{,}10 \cdot 10^{2})$
Aquecimento global (g CO_2 eq)	Maior $(6{,}75 \cdot 10^{3})$	$(6{,}67 \cdot 10^{3})$	$(6{,}12 \cdot 10^{3})$	$(5{,}74 \cdot 10^{3})$	Menor $(5{,}71 \cdot 10^{3})$	Médio $(5{,}67 \cdot 10^{3})$
Toxicidade humana (m^3 do compartimento)	Maior $(1{,}80 \cdot 10^{8})$	$(1{,}78 \cdot 10^{8})$	Menor $(1{,}68 \cdot 10^{8})$	$(1{,}76 \cdot 10^{8})$	$(1{,}76 \cdot 10^{8})$	$(1{,}76 \cdot 10^{8})$
Acidificação (g SO_{2-} eq)	$(9{,}52 \cdot 10^{1})$	Maior $(1{,}00 \cdot 10^{2})$	$(9{,}19 \cdot 10^{1})$	Menor $(8{,}90 \cdot 10^{1})$	$(9{,}03 \cdot 10^{1})$	$(9{,}23 \cdot 10^{1})$
Resíduos (kg)	Maior $(2{,}30 \cdot 10^{-1})$	Maior $(2{,}30 \cdot 10^{-1})$	$(1{,}90 \cdot 10^{-1})$	$(1{,}70 \cdot 10^{-1})$	Menor $(1{,}68 \cdot 10^{-1})$	Menor $(1{,}68 \cdot 10^{-1})$

Tabela 3.5 – Demanda de materiais (em toneladas) e de energia (em MJ) para a construção de ponte com estrutura treliçada de concreto convencional e concreto de alto desempenho (SCHMIDT & TEICHMANN, 2007)

Material	C25/C30	Alto desempenho f_{ck} 200MPa
Cimento	120	98
Agregados	620	170
Água	60	21
Sílica ativa	–	18
Aço (armadura passiva)	70	22
Fibras de aço	–	10
Aço (armadura ativa)	10	12
Energia total (MJ)	2.050.256	1.148.517

ultra-alto desempenho (UHPC), com f_{ck} de 200 MPa, demonstra ser muito mais sustentável que o concreto convencional, resultando em um menor consumo de insumos e de energia, conforme se observa na Tab. 3.5.

Com efeito, percebe-se que a utilização dos concretos de alto desempenho (paradoxalmente, com maiores consumos de cimento por metro cúbico) traz expressivas vantagens, não apenas com relação às propriedades mecânicas, mas também no aspecto ambiental e sustentável. Entretanto, como já exposto, essas vantagens aparecem apenas no longo prazo e ao longo de uma análise da vida útil do material, quando é realizada uma análise completa do tipo *cradle to grave*.

Além da importância das altas resistências na redução da demanda total de insumos, é importante investigar também as emissões pontuais de CO_2 pelas empresas de serviços de concretagem no metro cúbico de produto fornecido. Os concretos apresentam, em geral, emissões de CO_2 em torno de 7% a 15% do valor da massa de concreto produzida (NRMCA, 2012), dependendo do traço concebido.

Esses valores estão muito relacionados à clinquerização do cimento utilizado, à otimização do processo produtivo das usinas e também à quantidade de cimento por metro cúbico calculada para os traços de concreto. Juntamente com a análise da energia total gasta para toda a estrutura, um estudo adequado e a otimização nos insumos do metro cúbico de concreto também pode ajudar a mitigar seu impacto ambiental.

No caso da análise simplista de 1m³ de concreto isoladamente, pode-se avaliar o impacto ambiental através do conceito de rendimento, expresso pela relação resistência à compressão (MPa) / consumo de cimento (C_{cim}). Fica evidente o fato da eficiência de um concreto estar intimamente ligada à quantidade de cimento necessária para se atingir as resistências desejadas. Para Helene e Tutikian (2011), o rendimento tem um ponto ótimo máximo para cada traço e deve ser estudado através do diagrama de dosagem, com o intuito de se obter o concreto mais sustentável, devendo esta também ser uma solução viável economicamente (Fig. 3.2).

Os estudos de Boggio (2000) trazem uma avaliação do fator de eficiência

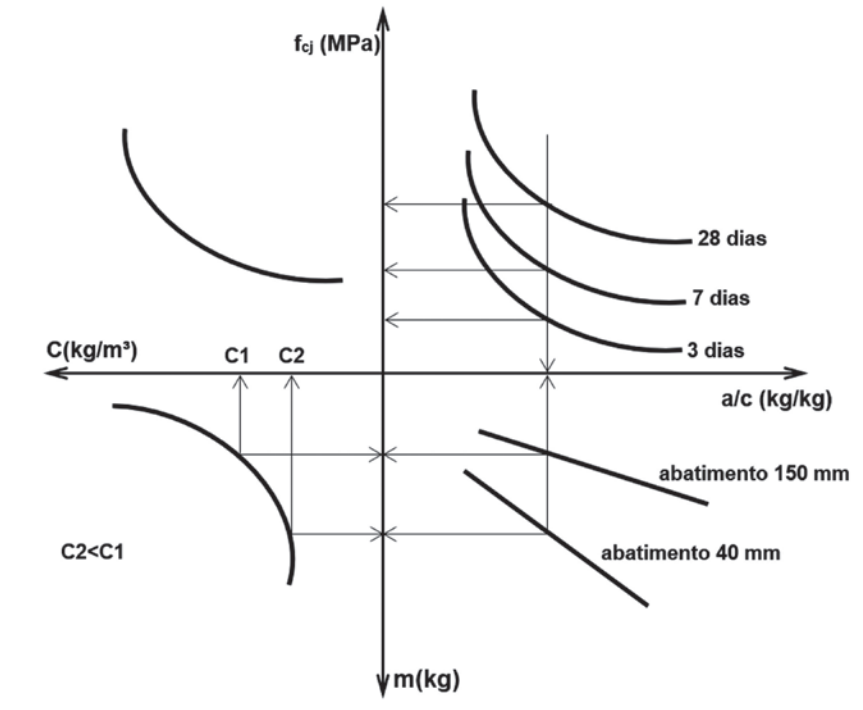


Figura 3.2
Diagrama de dosagem dos concretos de cimento Portland

▶ Tabela 3.6 – Avaliação do fator de eficiência ou rendimento do concreto para diferentes resistências (adaptado de BOGGIO, 2000)

Resistências fc_{28} (MPa)	Fator de eficiência	
	f_{c28}/C_{cim} $\left(\frac{MPa}{kg/m^3}\right)$	C_{cim}/f_{c28} $\left(\frac{kg/m^3}{MPa}\right)$
20	0,082	12,20
25	0,091	10,93
30	0,099	10,10
35	0,109	9,18
40	0,109	9,14
80*	0,174	5,75

* Dados apurados no estudo realizado sobre os pilares de concreto de alta resistência do edifício e-Tower.

ou rendimento do concreto, calculado para concretos com resistências entre 20 MPa e 40 MPa, dosados segundo o método IBRACON (tabela 3.6).

Dada a importância do concreto na cadeia construtiva e no desenvolvimento de uma nação e tendo em vista os benefícios do emprego do concreto de alta resistência, é paradoxal utilizar o consumo de cimento como índice de degradação do meio ambiente, pois o correto seria pensar no ciclo de vida da construção com uma visão global e holística, e não somente no consumo de cimento deste material.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como demonstrado, ainda que apresente um maior consumo de cimento por metro cúbico, a redução no volume de concreto e o aumento considerável de vida útil justificam o uso dos concretos de alta resistência do ponto de vista da sustentabilidade, em muitos casos resultando em uma menor quantidade de emissões de CO_2 ao longo da execução e vida útil da construção. Utilizar materiais com melhores características físicas e mecânicas é um meio realista de alcançar vantagens substanciais do ponto de vista de economia de materiais e energia, permitindo, no caso do concreto, a elaboração de projetos com seções otimizadas, maior durabilidade e resistência e, por fim, a geração de menores impactos ambientais. Neste contexto, sugere-se que a utilização de concretos de alta resistência também componha a pontuação dos selos para construção sustentável existentes, como LEED, Selo Casa Azul, HQE, BREEAM e DGNB, tendo em vista que seu emprego oferece alto desempenho em qualidade ambiental, produtividade, economia global de materiais e recursos.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ALLIED CONCRETE LIMITED. Environmental Product Declaration: Ready Mixed Concrete Using Holcim Manufactured Cement. Registration N. S-P-00555. Invercargill, 2014.

[2] BENTO, R. C.; ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação ambiental comparativa de estruturas de concreto armado com a variação da classe de resistência do concreto. In: CONPAT - XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção - XV Congresso de Controle de Qualidade na Construção - Congresso Luso-Africano da Construção, 2015, Lisboa. Anais. Lisboa: ALCONPAT, 2015.

[3] BOGGIO, Aldo J. Estudo comparativo de métodos de dosagem de concreto de cimento Portland. 2000. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

[4] CEMBUREAU. The European Cement Association (Brussels). Key facts - Main world producers - The G20 Group: Cement production (Million tonnes). 2017. Disponível em: <https://cembureau.eu/cement-101/key-facts-figures/>. Acesso em: 02 ago. 2019

[5] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 15804: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Brussels: CEN, 2012.

[6] COUTO, Douglas de Andreza. Projeto de estruturas de edifícios altos com utilização de concreto de alto desempenho. 2009. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de Piracicaba, Piracicaba, 2009.

[7] HELENE, Paulo; HARTMANN, Carine T. Edifício e-Tower: Record mundial en el uso de hormigón coloreado de altas prestaciones. Ingenieria Estructural. 2003. v.11, p.11 - 18.

[8] HELENE, Paulo; PACHECO, Jéssika; DONIAK, Lígia; CARVALHO, Mariana. The Paradox of High Performance Concrete used for Reducing Environmental Impact and Sustainability Increase. Second International Conference on Concrete Sustainability ICCS16 Madrid, 2016.

[9] LEVY, S. Sustentabilidade na Construção Civil: A Contribuição do Concreto. In: ISAIA, G. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2005. Volume 2, Capítulo 50, p. 1551-1579.

[10] NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. Concrete CO_2 Fact Sheet. Silver Spring, 2012.

[10] ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Coord. Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

[12] SCHMIDT; Michael; TEICHMANN, Thomas. Ultra-high-performance concrete: Basis for sustainable structures. 2007. Trabalho apresentado ao Central Europe towards Sustainable Building Prague, Alemanha, 2007.

Aspectos conceituais de soluções ecoeficientes em concreto com vistas à normalização

INÊS LARANJEIRA DA SILVA BATTAGIN – Engenheira
Superintendente do Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados da ABNT
Assessora da presidência do IBRACON

1. INTRODUÇÃO

A ISO – *International Organization for Standardization* atua no desenvolvimento da base normativa internacional em diversas áreas e reúne atualmente 162 países, que respondem por 97% da população mundial e 98% da economia do planeta.

No âmbito do Comitê Internacional de Concreto e Estruturas de Concreto (ISO/TC 71) foi criado um subcomitê (SC8) com a tarefa de preparar Normas Internacionais de gestão ambiental para concreto e estruturas de concreto, que baseiem sua avaliação em dados reais e considerem estudos e pesquisas para propor melhorias para os cenários atuais.

O grupo responsável por esse trabalho é liderado pelo Japão, com a participação de doze outros países, entre eles o Brasil, e já conseguiu a publicação de quatro normas internacionais. O ISO/TC71/SC8 tem em sua agenda ao menos mais quatro documentos em estudo e segue no estabelecimento das bases para que as melhores técnicas de gestão ambiental das construções de concreto possam ser largamente conhecidas e utilizadas.

Este artigo comenta o conteúdo do trabalho desenvolvido pelo ISO/TC71/SC8 e a linha de ação para as próximas iniciativas nessa área, bem como sua correlação com outras normas e trabalhos internacionais voltados às questões do desenvolvimento sustentável.

2. DIRETRIZES INTERNACIONAIS DE GESTÃO AMBIENTAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A ISO publicou em 1993 um Guia[1] que estabelece a inclusão de aspectos de gestão ambiental em normas de produtos (*ISO Guide 64*), documento que foi revisado em 2003 e novamente em 2008, tendo sido uma das bases para o desenvolvimento das Normas da série ISO 14000 (*Environmental Management*).

Esse documento parte da premissa que todo e qualquer produto tem impacto ambiental durante seu ciclo de vida (extração de recursos naturais, aquisição de matérias-primas, processo produtivo, distribuição, uso, reuso e disposição final). Assim, prescrições nas normas desses produtos influem no impacto ambiental gerado por eles e podem reduzir significativamente esse impacto.

Um exemplo de sucesso de aplicação das premissas do *ISO Guide 64* são as normas brasileiras de cimento Portland, que, seguindo a linha europeia, consideram a possibilidade de incorporação de diversos materiais, descartados de outros segmentos industriais, como matérias-primas para a fabricação do cimento. A redução do consumo energético na fabricação, o aumento da vida útil das jazidas e a mitigação das emissões são os principais ganhos ambientais obtidos com essa medida. Atualmente, com as novas tecnologias de fabricação, tem sido possível também a queima de combustíveis alternativos e resíduos diversos nos fornos rotativos, com a manutenção dos requisitos da qualidade do produto final.

O concreto, por sua vez, é um compósito à base de cimento Portland com

[1] Os Guias ISO são documentos que estabelecem diretrizes gerais e devem ser considerados no desenvolvimento das Normas Técnicas Internacionais e Nacionais dos países membros da ISO.

grande quantidade de agregados, além de outros materiais utilizados em menor escala, como água, aditivos e eventualmente adições, como metacaulim, sílica ativa ou outros materiais pozolânicos. É, portanto, um insumo que utiliza materiais disponíveis em praticamente todo o globo terrestre, de baixo custo/benefício e fácil reciclagem, sendo considerado pouco agressivo ao meio ambiente, especialmente se comparado a outros materiais de construção.

Com o advento da série ISO 14000, que contempla exigências de avaliação do ciclo de vida e rotulagem ambiental dos produtos, além da avaliação ambiental dos processos, o concreto tornou-se ainda mais atrativo do ponto de vista ambiental, considerando sua durabilidade.

Mais recentemente a ISO lançou o *ISO Guide 82 – Guide for addressing sustainability in standards*, que orienta como considerar as questões ligadas à sustentabilidade nas normas internacionais e normas dos países membros da ISO. Com isso, uma nova terminologia começou a fazer parte dos trabalhos de normalização técnica, incluindo termos como resiliência, economia circular, ciclo de vida, responsabilidade social e desenvolvimento sustentável.

Muito embora o conceito básico de desenvolvimento sustentável seja simples e expresso de forma objetiva pela Comissão de Brundtland, em 1987 (definição[2] que é aceita até os dias atuais), não se tem mostrado igualmente simples o estabelecimento de padrões para alcançar patamares de desenvolvimento sustentável que possam ser considerados ideais. Esse é um dos objetivos almejados nos trabalhos de normalização técnica internacional do ISO/TC71/SC8.

3. ISO/TC71/SC8 *ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES*[3]

O Subcomitê Internacional ISO/TC71/SC8 foi criado no âmbito do Comitê Internacional de Concreto, Concreto Armado e Concreto Protendido (ISO/TC71), de forma a se estabelecer a correta conceituação pretendida, atentando para as singularidades do concreto quanto ao tema da gestão ambiental.

De maneira geral, a participação mais efetiva nos trabalhos de normalização internacional na área da construção civil, incluindo produtos e procedimentos, é certamente de representantes dos países desenvolvidos, que lideram os subcomitês e grupos de trabalho, apesar de todo o esforço empreendido pela entidade para incentivar a presença mais efetiva de novos membros.

Frente a esse chamamento, países do Oriente, como China, Coréia do Sul e Japão tem paulatinamente avançado na apresentação de propostas e na colaboração técnica para a elaboração de normas internacionais.

O ISO/TC71/SC8 foi criado em 2008 sob a liderança do Japão e, até o momento, foram publicadas quatro Normas Internacionais da série ISO 13315, de um escopo previsto de oito documentos, como se relaciona a seguir.

ISO 13315-1, *Environmental management for concrete and concrete structures*:

- *Part 1: General principles* (publicada em 2012, e com revisão prevista para o próximo ano);
- *Part 2: System boundary and inventory data* (publicada em 2014, a ser revisada);
- *Part 3: Constituents and concrete production* (trabalho não iniciado);
- *Part 4: Environmental design of concrete structures* (publicada em 2017);
- *Part 5: Execution of concrete structures* (trabalho não iniciado);
- *Part 6: Use of concrete structures* (em fase final de aprovação);
- *Part 7: End of life phase including recycling of concrete structures* (trabalho não iniciado);
- *Part 8: Labels and declaration* (publicada em 2019).

NOTA: Estão pendentes de elaboração as Partes 3, 5 e 7, previstas para tratar, respectivamente, dos constituintes do concreto, do processo de execução das estruturas e da fase final, incluindo questões de reuso e reciclagem. Alguns desses temas estão já abordados pela ISO com outro enfoque, mas de forma alinhada às diretrizes de gestão ambiental, em normas relativas à qualidade dos materiais, aos processos de execução e à manutenção das estruturas, bem como na ISO 16204 (*Durability – Service Life Design of Concrete Structures*).

Na introdução da Parte 1 da ISO 13315, que trata dos princípios gerais para a gestão ambiental de estruturas de concreto, se tem a seguinte mensagem:

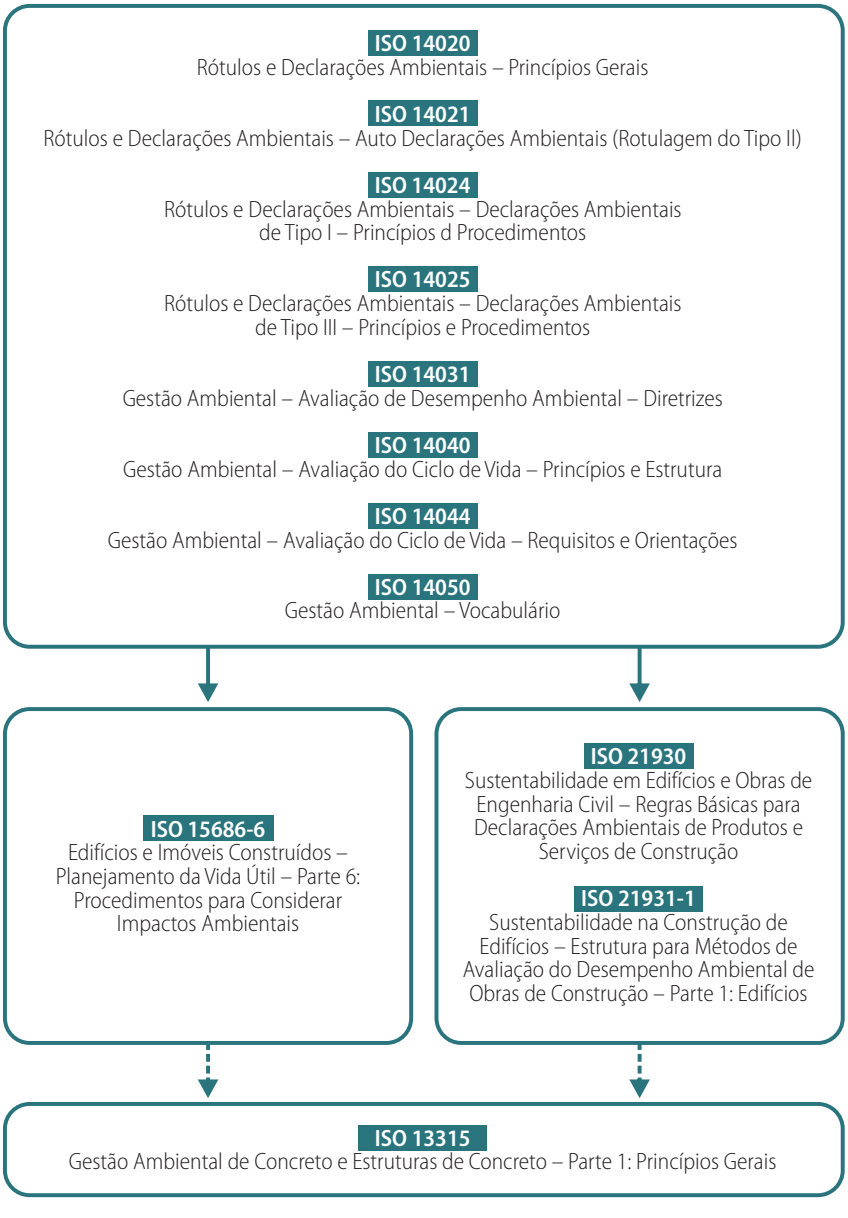
> *"Estruturas de concreto são construídas em ampla variedade de formas, com requisitos específicos, sendo usadas em diversos ambientes por longos períodos de tempo, após o que são*

[2] Desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades, do "Relatório Brundtland, Nosso Futuro Comum, 1987", da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, da Organização das Nações Unidas.

[3] ISO/TC71/SC8 Gestão Ambiental de Concreto e Estruturas de Concreto.

demolidas, recicladas ou parcialmente descartadas. A série de normas ISO 13315 destina-se a fornecer as regras básicas de gestão ambiental para o concreto e as estruturas de concreto, de forma a contribuir para a melhoria contínua dos impactos ambientais decorrentes das atividades relacionadas a este tipo de construção. A ISO 13315 garante a consistência com a série ambiental existente ISO 14000, assim como com a ISO 15686-6 e a ISO 21930."

A Figura 1 mostra a relação entre a ISO 13315 (todas as suas partes, inclusive algumas ainda não publicadas) e outras normas ISO existentes. A Figura 2 mostra a estrutura básica da série ISO 13315.



Fonte: ISO 13315-1

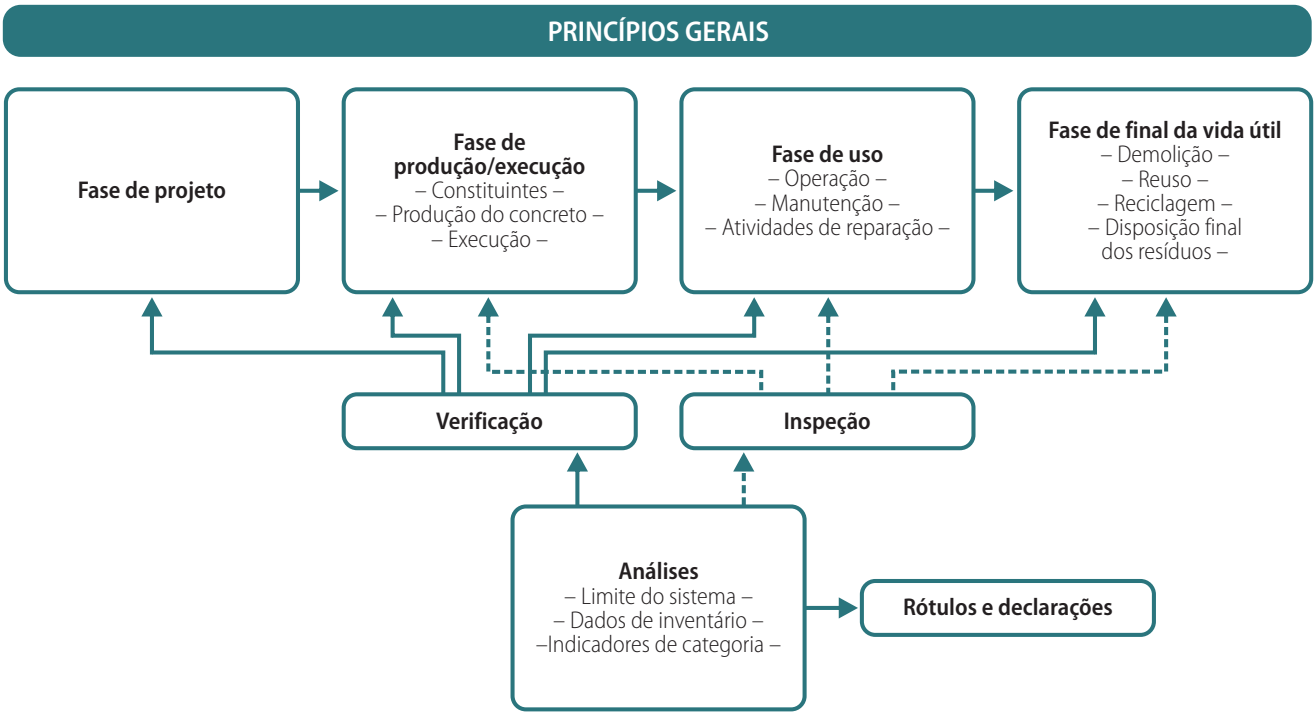
Figura 1
Relação entre as Normas da série ISO 13315 e outras Normas ISO de gestão ambiental e aspectos voltados à sustentabilidade

A ISO 13315 abrange todas as pessoas envolvidas com o concreto e com as estruturas de concreto: proprietários, projetistas, prestadores serviços de concretagem, construtores, usuários, organismos de certificação e também pessoas ligadas ao desenvolvimento das especificações ambientais.

A relação de impactos ambientais recomendados para serem verificados em cada fase (projeto, execução, uso, manutenção e fim do ciclo de vida) acompanha o previsto nas Normas ISO 14040 e ISO 14044 e abrange os itens a seguir:

- mudanças climáticas globais;
- uso de recursos naturais;
- nível de ozônio na estratosfera;
- uso da terra/alterações no habitat;
- eutrofização (ou eutroficação);
- acidificação;
- poluição do ar;
- poluição da água;
- contaminação do solo;
- poluição devido a substâncias radioativas;
- impactos devido à geração de resíduos;
- barulho/vibração;
- melhoria do impacto ambiental.

O ciclo de vida das construções é fator preponderante na avaliação prevista pela série ISO 13315 e os conceitos podem ser aplicados a estruturas novas ou a estruturas existentes a partir de processos de manutenção. A ISO13315-2 estabelece as bases para a obtenção de bancos de dados e informa que as melhores técnicas de mitigação de impactos ambientais e o uso consciente de produtos podem ser obtidos por comparações entre diferentes

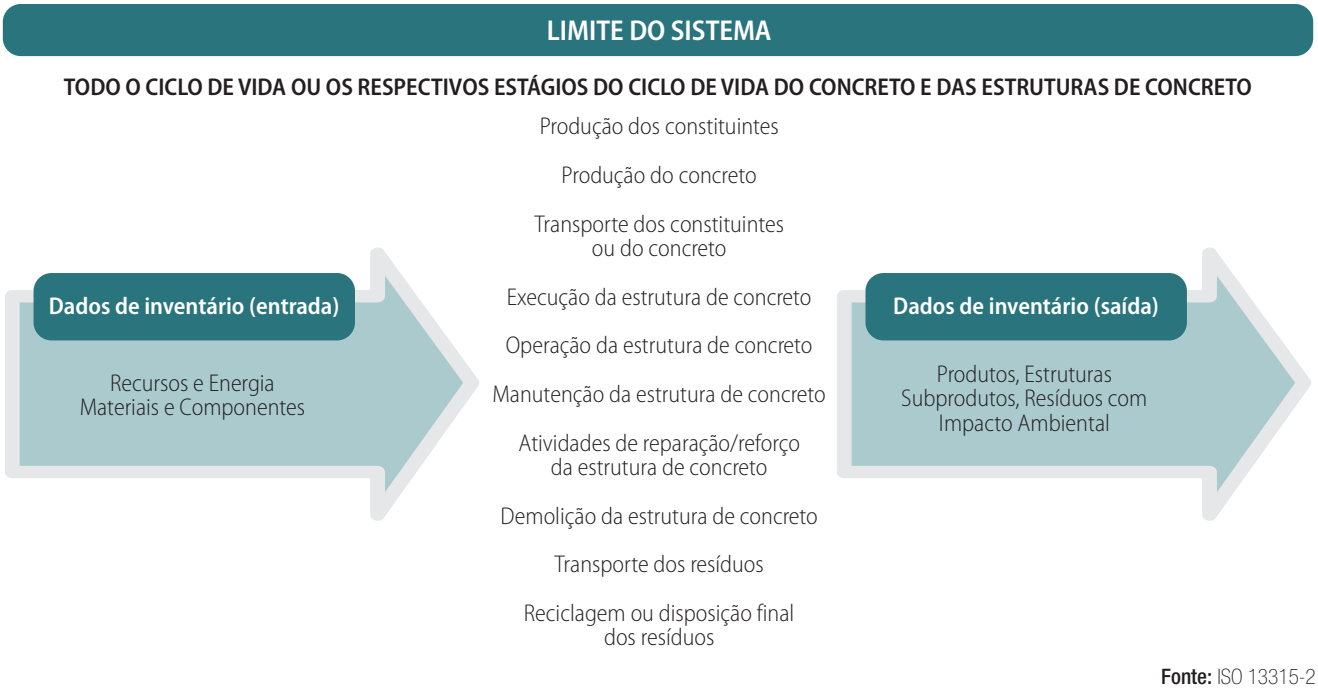


Fonte: ISO 13315-1

Figura 2
Estrutura das Normas da série ISO 13315

soluções para uma mesma construção (considerando materiais e estruturas de concreto), com base na análise de inventário (LCI) e na avaliação do ciclo de vida (LCA). Os LCI e LCA devem ser conduzidos sob critérios previamente estabelecidos, que considerem inclusive o intervalo de tempo para essa avaliação. A Figura 3 ilustra o processo.

As bases para o desenvolvimento do projeto ambiental de uma



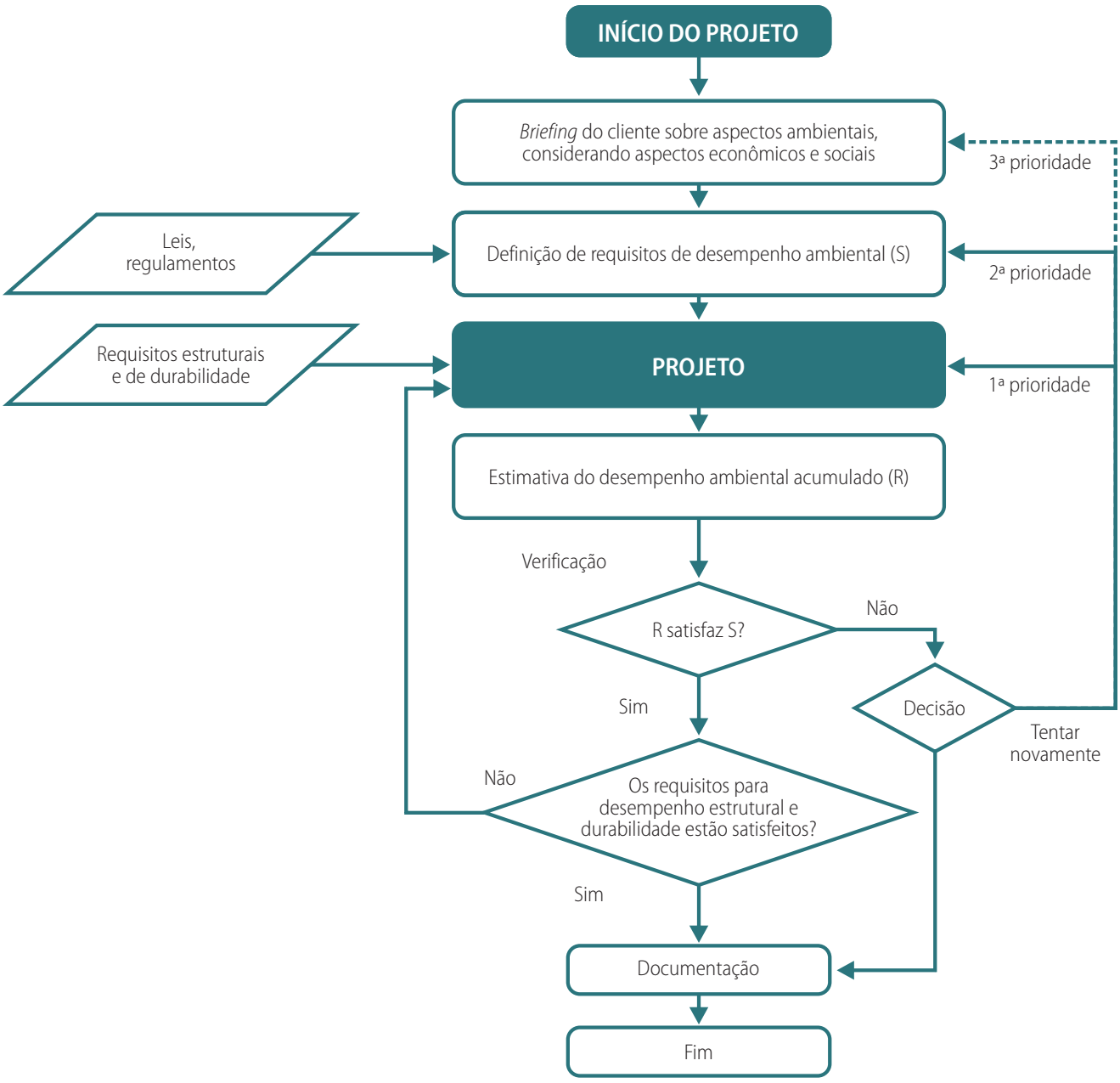
Fonte: ISO 13315-2

Figura 3
Limites do sistema e dados de inventário

estrutura de concreto (simples ou complexa) são dadas na Parte 4 da ISO 13315 e seguem o fluxograma da Figura 4.

Essa configuração é bastante próxima à apresentada na Parte 6 da Norma, que trata do uso das estruturas de concreto, quando se aborda os processos de manutenção, que devem atentar para os mesmos requisitos ambientais de projeto, comprovados em processos de inspeção documentados. Estão previstas, na Parte 6 da Norma, ações tanto para estruturas novas como para as existentes, mesmo aquelas que tenham sido construídas sem a preocupação de um projeto ambiental, a partir de um projeto com essa visão para um processo de manutenção.

Embora a série ISO 13315 não cubra diretamente a eficiência energética de equipamentos de ar condicionado e iluminação, abrange o caso em que a redução dos impactos ambientais, como a redução de consumo de



Fonte: ISO13315-4

Figura 4
Bases para o projeto ambiental de estruturas de concreto

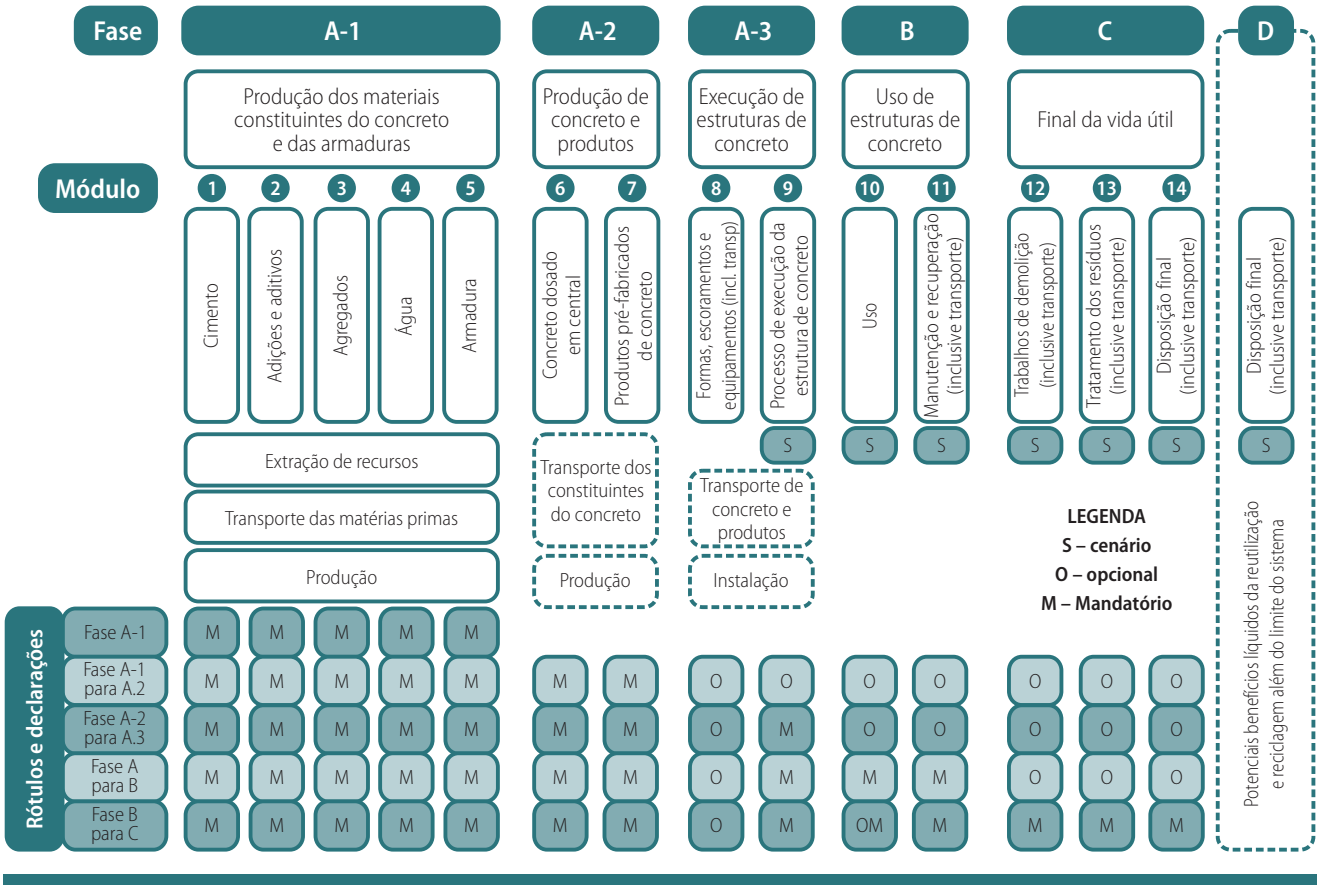


Figura 5
Elementos obrigatórios e opcionais para gestão ambiental de concreto e estruturas de concreto

energia, pode ser alcançada devido às propriedades do concreto. Isso inclui, por exemplo, a mitigação de mudanças de temperatura ambiente pelas propriedades de massa térmica do concreto e o uso de concreto permeável em algumas áreas para diminuir o fenômeno de ilhas de calor.

Fechando a série de documentos normativos sobre a gestão ambiental de concreto e estruturas, tem-se a Parte 8 da ISO 13315, que trata dos rótulos e declarações ambientais, tendo como base todo o trabalho apresentado nas Partes anteriores, em especial na Parte 2 (limites do sistema a dados de inventário) e considerando cada fase da construção de um empreendimento.

A Figura 5 mostra o complexo quadro que resume as fases da construção, as ações a serem realizadas para sua avaliação e a documentação a ser gerada pelo processo, com vistas a minorar os impactos ambientais.

Não cabe aqui detalhar em profundidade cada um dos documentos aprovados pelo ISO/TC71/SC8, mas sim mostrar a linha adotada pela comunidade técnica internacional em sua elaboração.

Nesse trabalho de normalização, parte-se do princípio que estão sendo atendidas às normas que estabelecem a qualidade do concreto, bem como dos insumos que entram em sua preparação, e também às normas que regem os procedimentos de projeto, execução e manutenção. Aponta-se como determinante a adoção de soluções que premiem os bons resultados (qualidade, adequabilidade ao uso pretendido, durabilidade, baixo custo), com os menores descartes/perdas de materiais.

Alguns exemplos ressaltados nos documentos elaborados pelo ISO/TC71/SC8 apontam para o uso de elementos pré-fabricados de concreto como solução ecologicamente adequada. Incentiva-se também o uso do concreto autoadensável e o aproveitamento de agregados reciclados.

4. ATUAÇÃO BRASILEIRA NO ISO/TC71/SC8

Com poucos recursos destinados à normalização técnica, o Brasil, como muitos países em desenvolvimento, se limita a acompanhar o desenvolvimento dos trabalhos internacionais em diversas áreas. A participação é sempre

realizada por meio do respectivo Comitê Brasileiro de Normalização da ABNT e, via de regra, compreende a avaliação dos documentos recebidos da ISO e da emissão de voto (obrigatório para países que participam como membro P), sempre que possível com sugestões aos projetos em desenvolvimento.

Em trabalhos específicos, em que se identifica a disponibilidade de atuação efetiva de profissionais de reconhecida competência e experiência no tema, profissionais brasileiros são indicados a tomar parte em Grupos de Trabalho da ISO (ISO/WGs), de forma a participarem desde o início da preparação dos textos-base internacionais e se tornar possível a inclusão de dados nacionais nesse contexto, aproximando a norma internacional da nossa realidade.

A presença de profissionais em reuniões internacionais dos Comitês Técnicos da ISO requer sua indicação pela entidade nacional, no caso brasileiro, da ABNT. Apesar de incentivada, nem sempre se mostra possível a participação nesses eventos, devido aos elevados custos envolvidos (passagens, estadas, alimentação e outros).

Com isso, a implementação no Brasil de padrões internacionalmente aceitos, muitas vezes chega como forma de aculturamento da sociedade, copiando ou adaptando as novas tendências, com pouco protagonismo nacional.

No caso específico das normas de gestão ambiental de concreto e estruturas de concreto, apesar dos dez anos de trabalho desde sua criação, verifica-se ainda pouca adesão dos países membros aos documentos produzidos no âmbito do ISO/TC71/SC8. Os países europeus seguem as rígidas normas da Comunidade Europeia e não podem se afastar das Diretrizes estabelecidas na forma da lei. Alguns países de economia pujante não se sentem atraídos pelas alterações propostas, provavelmente pelo temor de possíveis perdas de mercados por falta de um completo entendimento dos processos; enquanto que os países em desenvolvimento não contam com a necessária infraestrutura para a mais completa implantação dos conceitos.

Constata-se, no entanto, crescimento no interesse das nações em conhecer, acompanhar e opinar para a consolidação e o aprimoramento dos documentos relacionados e comentados neste artigo, o que indica fortes possibilidades de sua futura adoção.

5. CONCLUSÕES

As construções em concreto têm mostrado sua versatilidade, baixo custo e aptidão aos processos de reciclagem, indo ao encontro dos requisitos de desenvolvimento sustentável, como solução durável e amplamente difundida.

As iniciativas internacionais de normalização do ISO/TC71/SC8 organizam conceitos e descrevem as etapas necessárias para mudanças estruturadas, visando o uso consciente dos recursos, trazendo mais vantagens competitivas para as construções em concreto.

Como desenvolvimento sustentável não abrange apenas a gestão ambiental, para que objetivos maiores sejam alcançados, devem ser respeitadas as três grandes dimensões do conceito da sustentabilidade: crescimento econômico, respeito ao meio ambiente e responsabilidade social. No contexto deste artigo, cumpre buscar, a partir da gestão ambiental do concreto e das estruturas de concreto, atrativos econômicos que tragam consigo o fortalecimento da terceira e mais complexa dimensão da sustentabilidade, que é a responsabilidade social, em sintonia com o entendimento dos preceitos do Guia 82 da ISO.

No campo da produção de materiais para a construção civil, os avanços são mais concentrados e mais facilmente percebidos, mostrando os benefícios da industrialização, cujos conceitos devem ser disseminados e adotados na construção civil de forma generalizada, para que se torne mais simples e palpável a consecução das expectativas tão desejadas de mudança de patamar do setor da construção civil.

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNTNBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNTNBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014.

[3] _____. ABNT NBR ISO 26000: Diretrizes sobre responsabilidade social. Rio de Janeiro, 2010.

[4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21930: Sustainability in buildings and civil engineering works – Core rules for environmental products declarations of constructions products and services.

Pesquisa e desenvolvimento geram soluções para minimizar impacto ambiental na produção e uso do cimento

I. INTRODUÇÃO

A InterCement, empresa brasileira que faz parte da MOVER Participações S.A, investe em diferentes linhas de pesquisa científica para a mitigação do impacto ambiental, em especial a redução das emissões de CO_2, para a melhoria de qualidade dos produtos e o aumento da competitividade.

No momento, a InterCement tem parcerias com instituições de pesquisa renomadas, como Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, entre outras, para atuação mais focada em desenvolvimento de soluções inovadoras em processos ou produtos. Graças a esse esforço dedicado à pesquisa e desenvolvimento do setor, a companhia obteve 22 pedidos de patentes e 4 patentes concedidas nos últimos seis anos.

Os recursos de pesquisa são destinados para desenvolvimento das tecnologias e realização de pilotos, incluindo compras de equipamentos para laboratórios, financiamento de bolsa de estudos, pagamento dos pesquisadores envolvidos e estrutura para execução de pilotos. Essas etapas são essenciais para trazer soluções diferenciadas ao mercado e para a própria companhia.

O baru, sua semente e casca – esta última é usada no coprocessamento da planta de cimento em Cezarina (GO)

Dentre as diversas iniciativas de pesquisa e desenvolvimento da InterCement, destacam-se alguns projetos novos, como sensoriamento de concreto, escalonamento da tecnologia concreto LEAP e três projetos com resultados interessantes até o presente: a utilização de resíduos de biomassa como combustível alternativo, o cimento com nanotubos de carbono e o cimento a partir de resíduos de construção e demolição.

2. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BIOMASSA COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO

O programa de biomassa foca em suprir cada vez mais a demanda térmica das unidades de produção de cimento a partir de combustíveis derivados de biomassa, com potencial de redução de 40% das emissões de CO_2 na produção de cimento. O conceito é utilizar resíduos de biomassa produzidos no entorno das fábricas da InterCement nas atividades de coprocessamento dessas unidades. O coprocessamento de resíduos no processo produtivo do cimento (como combustível ou matéria-prima) é uma alternativa de destinação final de resíduos, conduzida de forma segura, monitorada e ambientalmente correta, com garantia da qualidade final do cimento produzido. Este processo permite economizar recursos naturais não renováveis, com vantagens ambientais e econômicas, gerar empregos e ampliar toda uma nova cadeia produtiva de gerenciamento de resíduos.

O mapeamento de extrativismo vegetal foi o ponto zero desse trabalho, iniciado em 2017. O passo seguinte foi realizar análises físico-químicas para avaliar o desempenho e capacidade térmica dos resíduos que poderiam ser utilizados como biocombustível para abastecer os fornos em substituição aos combustíveis fósseis, segundo a consultora de

Pesquisa e Desenvolvimento da InterCement, Mariana Menezes.

Dois projetos, em Cezarina - GO e em Campo Formoso - BA, foram implementados ao longo de 2018 no âmbito do programa. Em comum, as iniciativas envolvem famílias catadoras de um fruto com amêndoa e polpa comestíveis originais de árvores nativas: o baru (Cezarina) e o licuri (Campo Formoso). Para se obter um quilo da amêndoa, utilizada *in natura* ou transformada em óleo para fins cosméticos ou culinários, são gerados aproximadamente 7 quilos de cascas, que eram descartadas, passivo frequentemente associado a problemas ambientais e de saúde.

O fornecimento foi sendo ampliado de forma gradual, atingindo 740 toneladas recebidas no último ano, e a expectativa é dobrar o volume de compra até o fim de 2019. Até o momento, as iniciativas já reduziram a emissão de mais de 1.000 toneladas de gases de efeito estufa com a substituição do coque de petróleo pelos resíduos de biomassa. Como a biomassa absorve o gás carbônico durante seu crescimento através da fotossíntese, esse combustível é considerado neutro, e as emissões proveniente da queima do coque, um combustível fóssil, nos fornos de clínquer são evitadas.

Neste estágio, o projeto vai beneficiar diretamente mais de 1.500 famílias. É importante ressaltar que a transformação desses passivos ambientais em ativos eleva a geração de renda nessas comunidades e, por outro lado, amplia a proteção ambiental, a partir de um manejo que respeita a capacidade natural de produção da vegetação nativa, além de dar uma destinação ambientalmente correta a esses resíduos.

O Instituto InterCement alavancou o projeto desde o início e atua capacitando e instrumentalizando as famílias. Grande parte da ação do instituto em 2018 esteve centrada na segurança dos trabalhadores, com palestras sobre ergonomia e formas mais adequadas para coleta e separação dos frutos, e gestão do negócio, além da doação de EPIs (equipamentos de segurança individual). Tudo voltado a garantir práticas justas e ergonômicas de trabalho e de respeito aos Direitos Humanos. Também houve investimento em máquinas e equipamentos para garantir melhor beneficiamento dos frutos e, dessa forma, liberar os trabalhadores (principalmente as mulheres) das atividades de limpeza e quebra que, quando realizadas manualmente, envolvem o uso de instrumentos rudimentares, inclusive com grande risco de acidentes e maior esforço físico.

Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno (CTNano – UFMG), no Parque Tecnológico de Belo Horizonte

A atuação conjunta da InterCement e do Instituto InterCement permitiu sistematizar uma cadeia de fornecimento para que essas cascas – biomassa – possam ser utilizadas no coprocessamento.

3. CIMENTO COM NANOTUBOS DE CARBONO

A InterCement vem pesquisando a síntese de nanotubos de carbono em materiais cimentícios em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais desde 2009. Desde o início da parceria entre a empresa e a universidade essa pesquisa gerou dois pedidos de patente, um referente ao reator de síntese de nanotubos em materiais cimentícios e outro referente ao crescimento destes nanotubos em escória de alto-forno, e tem potencial de reduzir em 10% as emissões de CO_2 do cimento. Em abril de 2019, dentro desta parceria com a universidade e com investimentos de outras empresas, foi inaugurado o primeiro centro de tecnologia em nanomateriais da América Latina, o Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno (CTNano/UFMG) no Parque Tecnológico de Belo Horizonte.

O objetivo do CTNano é desenvolver pesquisa aplicada no campo da Nanotecnologia, com demandas alinhadas às necessidades específicas da indústria. Particularmente com relação aos materiais cimentícios, as pesquisas estão relacionadas ao desenvolvimento e disseminação de tecnologias que promovam a síntese de cimento nanoestruturado e avaliar aspectos relativos à saúde ocupacional. A utilização de nanomateriais em materiais

compósitos (como polímeros e cerâmicos) resulta em melhor desempenho mecânico e maior durabilidade (vida útil). "Essa empreitada representa que a iniciativa privada, o poder público e as instituições de ensino podem e devem caminhar juntos, cada um com suas competências e expertises, focadas no desenvolvimento nacional", diz Carlos Massucato, diretor de Desenvolvimento Técnico e Relações Institucionais da Intercement.

A pesquisa surgiu de um novo conceito proposto pelos pesquisadores da UFMG, em 2008, e que possui patentes já concedidas no Brasil, nos Estados Unidos e na China. Sabe-se que a inserção de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias melhora suas propriedades mecânicas, em especial a resistência à tração, mas também a resistência à compressão. Porém, a simples mistura de nanotubos de carbono com o cimento se mostra inviável economicamente, uma vez que os nanotubos de carbono prontos têm um valor alto, que não consegue ser compensado pelos ganhos de qualidade do cimento. Assim, a ideia dos pesquisadores foi sintetizar esses nanotubos diretamente sobre o próprio clínquer ou sobre a escória de alto-forno. Além disso, a síntese de nanotubos sobre o clínquer permite melhor dispersão do material nanoestruturado na matriz de cimento, resultando em um compósito (pasta, argamassa ou concreto) com melhor comportamento mecânico e apresentando modificações benéficas em sua microestrutura.

Ao longo desta jornada, o reator desenvolvido, objeto de uma patente, aumentou sua produção em 27 vezes e seu rendimento cresceu em 65%. O aumento da produção permitiu sair de testes de bancada para testes sistemáticos em argamassa e concreto, que não eram possíveis anteriormente. Nos compósitos cimentícios, já foram observados ganhos de resistência à tração de 30 a 40% e de resistência à compressão de 10 a 15%. Com relação à carbonatação, foi observada uma redução de aproximadamente 10% no coeficiente de carbonatação.

Também foram realizados estudos sobre o impacto dos nanotubos no comportamento reológico. Muitos estudos com a utilização direta de nanotubos de carbono por mistura física indicam que os nanotubos atuam como "microfibras" e, por isso, trazem um impacto negativo à fluidez. Entretanto, o cimento nanoestruturado não afetou o comportamento reológico de pastas cimentícias, tampouco de concretos.

A pesquisa está em andamento e a tecnologia está em validação laboratorial. Com os estudos realizados até o momento já se tem um indicativo do potencial do projeto. Com os resultados positivos, o plano é realizar uma instalação piloto de maior escala e iniciar concretagens de demonstração com o cimento nanoestruturado.

Brita Graduada Tratada com Cimento usada na pavimentação-piloto de uma via pública urbana, no município de Guarulhos – SP

4. CIMENTO A PARTIR DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A InterCement desenvolveu, em parceria com o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e alguns pesquisadores colaboradores da USP, um cimento fabricado a partir de resíduos da construção e demolição (RCD), com menor quantidade de emissões de gases de efeito estufa do que um cimento convencional. O projeto para desenvolvimento desta tecnologia iniciou-se em 2012 e teve duração de sete anos. Esta pesquisa foi inovadora e gerou um pedido de patente internacional deste produto e do seu processo de produção.

Seiiti Suzuki, gerente de Pesquisa e Desenvolvimento da InterCement, comenta que "dar um destino adequado ao volume crescente de resíduos é um grande desafio. Estima-se que no Brasil cerca de 500 kg de RCD são gerados por habitante por ano. Este projeto pode ser uma solução para este desafio, por meio da adoção do conceito de economia circular. O RCD, em vez de ser enviado ao aterro, é reutilizado para produção deste tipo de cimento ecológico. Estamos satisfeitos com o resultado do projeto e vamos trabalhar para buscar oportunidades de implementação".

Usualmente, os resíduos da construção e demolição são enviados para

aterros e, se reaproveitados, são beneficiados para gerar agregados reciclados, porém, o grupo almejou agregar mais valor a este produto e desenvolveu uma tecnologia para fabricar cimento a partir desses resíduos. O processo desenvolvido consiste em selecionar a fração fina de resíduos de obras civis e demolições (RCD), como concreto e cerâmica vermelha, realizar moagem e calcinação a baixas temperaturas. O processo permite a remoção da molécula de água do C-S-H e da portlandita da pasta endurecida, além da ativação de pozolanas contidas no material. Estes cimentos atingiram características favoráveis para usos não estruturais, como em obras de pavimentação (BGTC), concretos secos e/ou valas de apoio de tubulações de água ou esgoto.

A partir dos resultados obtidos no trabalho, permitiu-se, em 2017, realizar a pavimentação piloto de uma via pública urbana no município de Guarulhos – SP, exposta a condições reais de tráfego de veículos. O material foi utilizado na base de pavimentação (BGTC – Brita Graduada Tratada com Cimento) de, aproximadamente, 200 m de via, sendo a BGTC produzida com cimento de RCD e a referência com cimento convencional. Para este piloto, a análise de ciclo de vida foi realizada do "berço" ao pavimento, constatando-se que o uso de base de BGTC utilizando o cimento de RCD foi capaz de reduzir as emissões de CO_2 do pavimento em 50%, comparado com a referência. Está sendo feito um monitoramento deste trecho do pavimento e os resultados têm indicado que o desempenho do cimento de RCD se equipara ao do cimento Portland.

5. CONCLUSÃO

O desafio de realizar parcerias de P&D entre empresas e institutos de pesquisa é grande, pois é necessário conciliar a visão acadêmica com a empresarial. Entretanto as pesquisas em conjunto têm gerado às universidades modernização dos laboratórios, formação de talentos e maior conhecimento da realidade industrial; à InterCement, tem resultado em soluções inovadoras e robustas. Assim, o conjunto de projetos têm contribuído para mitigar as emissões de dióxido de carbono, mantendo a InterCement com uma das menores emissões específicas do setor (580 kg de CO_2 por tonelada de cimento).

A Supermix é a primeira empresa a receber o certificado ABNT do Programa de Qualidade de Empresas de Concretagem: um atestado de excelência no cumprimento das normas técnicas vigentes e outras exigências que garantem a qualidade dos nossos serviços.

Esse reconhecimento nos orgulha e demonstra que estamos no caminho certo, constantemente aprimorando processos, investindo em pessoas, qualidade e tecnologia.

SUPERMIX
facilitando a construção civil
supermix.com.br

Sustentabilidade nas estruturas pré-fabricadas de concreto

ÍRIA LÍCIA OLIVA DONIAK – Presidente Executiva da Abcic e autora do *fib* Boletim 88
Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto

DAVID FERNÁNDEZ-ORDÓNEZ – Secretário geral da *fib* , editor e autor do *fib* Boletim 88
Federação Internacional do Concreto

I. INTRODUÇÃO

A Federação Internacional do Concreto (*fib*), em parceria com o Instituto Americano de Concreto Protendido e Concreto Pré-moldado (PCI), lançou no final do ano passado o Boletim *fib* 88 sobre sustentabilidade das estruturas pré-fabricadas de concreto. Trata-se de um documento compartilhado entre ambas as entidades.

Com 153 páginas, o boletim descreve a importância dos conceitos e desenvolvimentos ambientais no mundo atual e a razão pela qual a sustentabilidade é um conceito crucial, que será ainda mais importante no futuro; foca nos diferentes avanços de normas que foram desenvolvidos ou estão em processo de desenvolvimento e implementação, como a ISO, regulamentos das entidades que já avançaram em questões ambientais ou governamentais, implementação de regras e a relação de todos esses com o desenvolvimento dos Códigos Modelos da *fib*.

O boletim (Figura 1) ainda examina os aspectos do ciclo de vida das estruturas pré-fabricadas; traz um estudo aprofundado dos aspectos específicos de sustentabilidade; apresenta metodologias e ferramentas especiais, que estão disponíveis no mercado para lidar com a sustentabilidade das estruturas de uma forma geral e com estruturas pré-fabricadas em particular; além de compilar vários estudos de caso ou exemplos de aplicações de sustentabilidade nas estruturas pré-fabricadas em edifícios, infraestrutura e obras especiais.

Figura 1
Capa boletim da *fib* 88
Sustentabilidade das Estruturas Pré-moldadas

A iniciativa da *fib* em elaborar esse boletim foi inspirada na importância do tema para o setor do concreto. Seu início se deu com a criação do Grupo de Atividades Especiais, sob a coordenação do professor japonês Koji Sakai, que incentivou e ajudou todas as comissões da entidade a criar seus próprios grupos de trabalho. A Comissão 6 de Pré-Fabricação desenvolveu um grupo, o TG 6.3, chamado "Sustentabilidade de Estruturas com Elementos Pré-moldados", em 2012, em conjunto com o PCI.

Para a elaboração do boletim 88, participaram especialistas de diversas partes do mundo, incluindo o Brasil, representado pelo prof. Paulo Helene e pela Engª Íria Doniak, a fim de fornecer uma visão ampla das sensibilidades relativas à sustentabilidade em diferentes continentes. O objetivo principal da publicação, como outras da federação, é disseminar a experiência dos distintos países que a compõe, servindo como uma referência internacional, levando informação a todo o mundo. O acesso a um boletim dessa natureza implica, muitas vezes, ganho de tempo no desenvolvimento de pesquisas, elaboração de normas e aplicação prática na indústria.

O Brasil tem influenciado e usufruído do desenvolvimento da pré-fabricação no âmbito da Comissão 6 da fib, sendo pioneiro na inclusão da sustentabilidade como requisito fundamental da norma

de avaliação das plantas de produção, uma vez que, através da Abcic, mantém representantes nos distintos trabalhos, por exemplo, sobre Lajes Alveolares, Pontes Pré-Moldadas, Controle de Qualidade, entre outros.

Vale ainda destacar a forma soberana do trabalho realizado no âmbito da Comissão 1, que desenvolve o *fib Model Code 2020*, com o grupo nacional brasileiro, representado pelo Professor Fernando Stucchi (Poli-USP), designado como coordenador técnico da delegação nacional pelas entidades ABCIC, ABECE e IBRACON. Trata-se do código-modelo geral das estruturas de concreto, que tem influenciado debates e decisões no mundo inteiro e recebe, como via de mão dupla, a influência dos 46 países que compões a federação. Deste documento saem as diretrizes gerais para as estruturas de concreto, inclusive no que tange à sustentabilidade. O código de 2010, publicado em 2013, incorporou pela primeira vez na história a sustentabilidade como critério de projeto para as estruturas de concreto, considerando a segurança como elemento-chave do componente social, um dos três elementos pilares do desenvolvimento sustentável, ao lado da viabilidade econômica e ambiental A partir daí uma nova proposta feita pelo Prof. Koji Sakai está sendo avaliada, incluindo todos os aspectos com vistas ao projeto sustentável de uma forma mais abrangente.

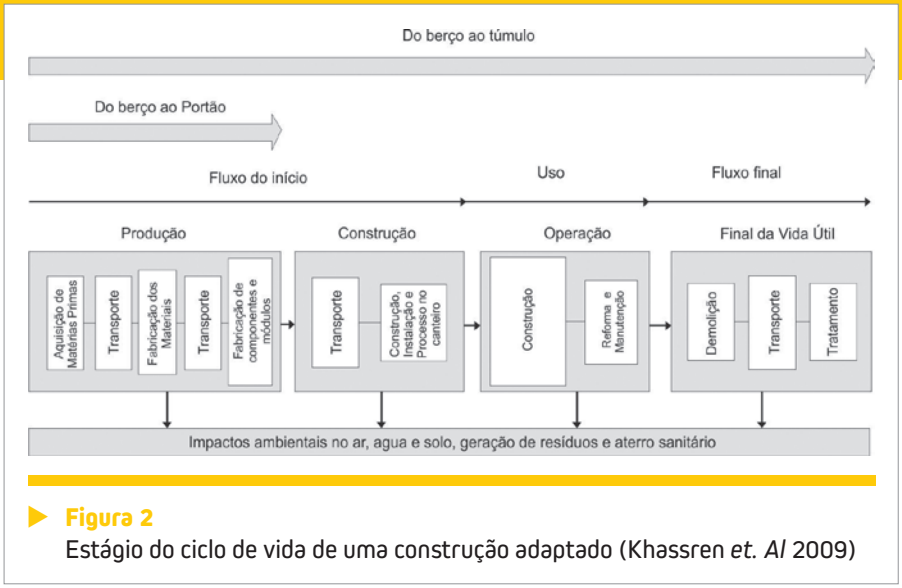


Figura 2
Estágio do ciclo de vida de uma construção adaptado (Khassren *et. Al* 2009)

2. CONCRETO, PRÉ-FABRICADOS E SUSTENTABILIDADE

A colaboração brasileira no boletim 88 levou em conta a experiência na implementação do sistema de qualidade, segurança e gestão ambiental, aplicado à pré-fabricação de estruturas, fachadas e elementos de fundação, o Selo de Excelência Abcic. Ele inclui em seu nível 3, pois, trata-se de um programa evolutivo, aspectos relacionados à sustentabilidade. Outra contribuição brasileira foi o exemplo de aplicação da sustentabilidade na avaliação de soluções de pilares com concreto de diferentes resistências em edificações, trabalho realizado pelo Prof. Paulo Helene, que demonstrou que o concreto de elevada resistência é mais sustentável. Esse exemplo, com base em um caso real, indica a importância de avaliar os dados de maneira abrangente, levando em consideração as características do projeto. Embora este estudo tenha tomado como referência um edifício com estrutura construída "in loco", é uma importante referência, uma vez que o uso de concretos com resistências superiores a 30 MPa é bastante comum na indústria de pré-fabricados, que tem seus estudos de dosagem desenvolvidos a partir das resistências iniciais, o que, dependendo do ciclo de determinada indústria, pode ocorrer em baixíssimas idades, às vezes inferiores a 24 horas. A norma ABNT NBR 9062 Projeto e Execução de Estruturas Pré-Moldadas de Concreto fixa que a resistência mínima para liberação da protensão, por exemplo, não pode ser inferior a 21 Mpa. Esses concretos atingem facilmente 50 MPa aos 28 dias.

Os elementos pré-fabricados encontram relevantes contribuições da engenharia de concreto decorrente de suas vantagens quanto ao parâmetro da sustentabilidade, pois são produzidos industrialmente, o que permite, além de um maior controle de qualidade, que impacta de forma significativamente positiva o uso racional de recursos, a facilidade de implementar novas tecnologias, como ocorreu com o concreto autoadensável e caminha com a implementação do concreto de ultra-alto desempenho (CUAD), sem falar no uso da protensão, em especial a pré-tração, que permite eliminar os dispositivos de ancoragem adotados na pós-tração, e outras tecnologias. Aspectos como redução de resíduos, do barulho no local da construção, entre outros, também devem ser levados em consideração.

O impacto ambiental das estruturas pré-fabricadas de concreto é principalmente oriundo dos materiais componentes do concreto, do cimento e do aço, de forma similar às demais estruturas de concreto. De acordo com as declarações ambientais de produto (EPD, do inglês *Environmental Product Declarations*), encontradas no anexo do boletim 88, procedentes de países que já vêm estudando o tema há alguns anos, como Noruega, Inglaterra e Estados Unidos, o impacto causado pelas matérias-primas é aproximadamente três vezes o impacto do processo de produção. Portanto, o que efetivamente contribui para que, em um modelo do nascimento ao portão (Figura 2), ou seja, da aquisição de matérias-

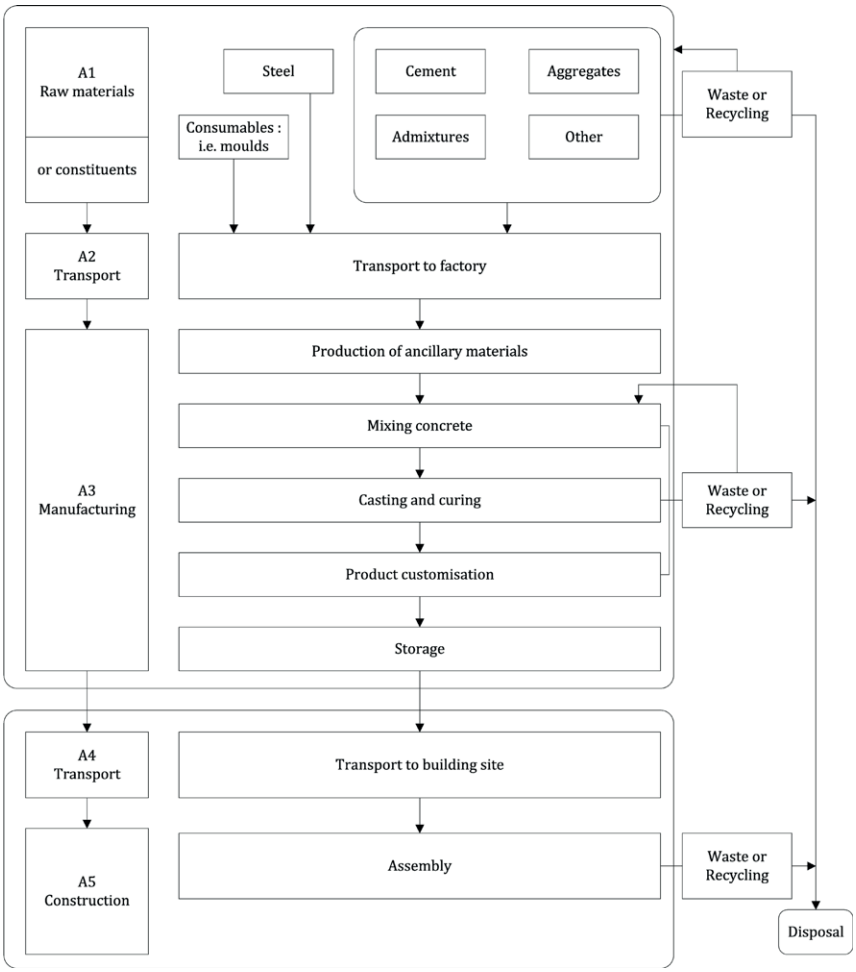


Figura 3
Ciclo de Vida para um elemento pré-fabricado e estrutural indicando os limites do Sistema (reproduzida do *fib Bulletim 88: Sustainability of precast concrete structures* 2018 – página 26, com a permissão da Federação Internacional do Concreto, *www.fib-international.org*)

-primas até a expedição, é efetivamente o uso racional do concreto, quando comparado com outros métodos e sistemas construtivos. Posteriormente à produção e expedição, muitos estudos estão sendo conduzidos, em especial os que levam em consideração o concreto como o material de maior condutividade térmica e seu uso como estocagem de energia para unidades autônomas na produção de energia, devido à inércia térmica de materiais pesados, que leva ao maior conforto térmico, especialmente em países com climas muito quentes ou frios.

3. CAMINHANDO PARA EMISSÃO DE EPDS

De todo o material compilado na publicação da *fib*, classificada como um relatório do estado da arte no mundo, o aspecto fundamental e objeto de reflexão deste artigo é que todas as ações precisam desembocar num documento final, passível de ser avaliado preferencialmente por um organismo de terceira parte, denominado EPD (em português, Declaração Ambiental de Produto). Esta declaração, em síntese, atesta os dados ambientais sobre o ciclo de vida dos produtos de acordo com a norma internacional NBR ISO 14025 Rótulos e declarações ambientais – Declarações ambientais de Tipo III – Princípios e procedimentos.

É, portanto, necessário estabelecer o ciclo de vida do produto, considerando as fases estabelecidas na Figura 2 e meios confiáveis de, nas etapas estabelecidas, avaliar os indicadores que devem ser coletados, tomando-se por referência três grupos principais:

1 – Indicadores de impactos ambientais

- Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential*);
- Potencial de destruição da Camada de Ozônio;
- Potencial de Acidificação (de provocar chuvas ácidas);
- Eutrofização da água;
- Formação de Oxidantes fotoquímicos (Ozônio Troposférico);
- Depredação de recursos naturais renováveis e não renováveis.

2 – Indicadores da Utilização de Recursos

- Uso de energia renovável primária, excluindo o uso como matéria-prima;
- Uso de energia renovável primária, incluindo o uso como matéria-prima;
- Uso de Energia não renovável (com e sem uso como matéria prima);
- Combustível de fonte renovável e não renovável;
- Água potável.

3 – Destinação de Resíduos

- Resíduos;
- Resíduos Perigosos;
- Lixo radioativo.

No Brasil, a indústria da pré-fabricação em concreto, por meio da ABCIC, tem no Selo de Excelência ABCIC, que, a partir do nível III, é um importante ponto de partida para o desenvolvimento das EPDs, posto que antes de se ter as informações para compor os indicadores, é preciso ter nas empresas uma cultura estabelecida para a coleta de dados e informação, com confiabilidade, bem como analisá-los de forma adequada. Também a cultura da auditoria e avaliação por órgão de 3ª parte, que, no caso do selo de Excelência Abcic, vem sendo realizadas pelo IFBQ (Instituto Falcão Bauer da Qualidade).

A.1-1 Description of product: Structural

Programme operator	ASTM International
PCR	ASTM PCR for Precast Concrete[2]
Declaration date	2015-11-11
Standard	ISO 14025[3] and ISO 21930[4]
Scope (information modules)	A1 to A3 (cradle to gate)
Declared unit	1 metric ton of structural precast concrete

Table A-1 Results of LCA for 1 metric ton of structural precast concrete

Environmental Impacts	**Unit**	**A1 to A3**
Global warming potential	kg CO_2 eq.	298.8
Acidification potential	kg SO_2 eq.	5.0
Eutrophication potential	kg N eq.	0.3
Smog creation potential	kg O_3 eq.	58.6
Ozone depletion potential	kg CFC-11 eq.	1.9E-03
Resource Use	**Unit**	**A1 to A3**
Total Primary Energy	MJ, HHV	2620.2
Non-renewable (fossil, nuclear)	MJ, HHV	2574.1
Renewable (solar, wind, biomass, hydroelectric, geothermal)	MJ, HHV	46.1
Total Material Resource Consumption	kg	1066.7
Non-renewable materials	kg	1065.8
Renewable materials	kg	0.9
Fresh water	L	1597.3
Waste	**Unit**	**A1 to A3**
Non-hazardous	kg	65.2
Hazardous	kg	10.0

Table A-2 Results of LCA for 1 ton of structural precast concrete

Environmental Impacts	**Unit**	**A1 to A3**
Global warming potential	lb CO_2 eq.	597.6
Acidification potential	lb SO_2 eq.	10.0
Eutrophication potential	lb N eq.	0.6
Smog creation potential	lb O_3 eq.	117.2
Ozone depletion potential	lb CFC-11 eq.	0.0038
Resource Use	**Unit**	**A1 to A3**
Total Primary Energy	10^6 BTU	1.72
Non-renewable (fossil, nuclear)	10^6 BTU	1.69
Renewable (solar, wind, biomass, hydroelectric, geothermal)	10^3 BTU	30.3
Total Material Resource Consumption	lb	2133
Non-renewable materials	lb	2132
Renewable materials	lb	1.8
Fresh water	gal.	384
Waste	**Unit**	**A1 to A3**
Non-hazardous	lb	130.4
Hazardous	lb	22.0

Figura 4
Declaração Ambiental de Produto (EPD) de elemento pré-fabricado estrutural (referência do *PCI/ American Precast/Prestressed Institute*) – reproduzida do *fib Bulletin 88: Sustainability of Precast Concrete Structures* – página 124, com a permissão da Federação Internacional do Concreto, *www.fib-international.org*

O CBCS (Centro Brasileiro da Construção Sustentável) estabeleceu para a indústria de blocos de concreto o ciclo de vida modular (ACV-m). Ele está baseado em requisitos mínimos, como consumo de energia, consumo de água, consumo racional de matérias-primas e emissão de CO2. Esses requisitos, acrescidos da geração e destinação de resíduos sólidos e líquidos, controle de ruídos e os impactos do transporte da planta de produção à obra, estão propostos no nível III do Selo de Excelência, não apenas como controle de impactos ambientais, mas incluindo o controle, treinamento do pessoal e a formação de indicadores. À época, em 2001, quando foi iniciado a estruturação do programa, o referencial foi a ABNT NBR ISO 14001 Sistema de Gestão Ambiental, com o intuito de trazer aspectos básicos e introduzir nas empresas aspectos de gestão ambiental. Portanto, os registros existentes devem ser analisados e considerados no desenvolvimento de elaboração das EPDs.

Também é importante que a indústria de base, principalmente cimento e aço, disponham de dados de entrada para essa formatação, o que já começa a ser uma realidade no Brasil, especialmente após o lançamento pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), do *"RoadMap"* da indústria cimenteira. Historicamente, com os programas de gestão da qualidade e ambiental, a indústria de materiais lidera esse processo.

Sendo assim, o próximo passo será o consenso da indústria nacional de estruturas, fachadas e fundações pré-fabricadas em concreto estabelecer, com auxílio de consultoria especializada e referências normativas apropriadas, o ciclo de vida de produtos específicos, como lajes, painéis, vigas e outros, a fim de apresentar as declarações ambientais de produto para o mercado. As EPDs emitidas no contexto internacional, como demonstram as Figuras 3 e 4, com base no modelo norte-americano para 1 tonelada métrica (1.1 ton) de pré-fabricado estrutural, cuja avaliação é realizada pela ASTM, servirão como importantes referências para o modelo nacional. O modelo norte-americano está de acordo com as normas ISO 14025 – Rótulos e Declarações Ambientais do tipo III Princípios e Procedimentos e ISO 21930 – Sustentabilidade na Construção Civil. O trabalho envolveu esforços conjuntos de três entidades representativas da pré-fabricação em concreto no Canadá e nos Estados Unidos: *Canadian Precast/ Presstressed Association (CPCI)*, *National Precast Concrete Association (NPCA)* e *Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI)*.Os produtos prémoldados foram subdividdos nas seguintes categorias, cada um gerando uma EPD: Elementos Estruturais, Painéis Arquitetônicos, Painéis Isotérmicos e Elementos Subterrâneos. Estas EPDS, cuja referência é

demonstrada pela Figura 4 deste artigo podem ser acessadas na íntegra no site do PCI e já devidamente avaliadas e atestadas pelo programa da ASTM.

4. CONCLUSÃO

Apesar de ser um tema recente na pré-fabricação em concreto no mundo, diversos países já se organizam em torno das declarações ambientais de produto, com alguns já apresentando os primeiros registros. Tais informações, em alguns países, já estão inclusive sendo integradas à plataforma *BIM (Building Information Modeling)*, a fim de possibilitar a avaliação de soluções com produtos ecoeficientes para os projetos. Há de certa forma um desafio que passa necessariamente pela competividade, a exemplo de outros programas como gestão da qualidade, gestão ambiental, entre outros. No entanto, as consequências da adoção de tais práticas se refletirão necessariamente em benefícios para o planeta e para as futuras gerações. Para um maior aprofundamento neste tema, é recomendável a consulta ao boletim 88 da *fib*, no qual as metodologias e ferramentas para auxiliar o desenvolvimento da indústria neste processo estão integralmente abordadas, no que se pode assegurar, como o estado da arte. O Brasil dá os primeiros passos na indústria da pré-fabricação, mas ainda há muito o que fazer. Sem dúvida, o Selo de Excelência ABCIC é uma base sólida que tem possibilitado à indústria não somente a adoção de novas tecnologias, considerando materiais e processos, mas também possibilita as empresas integrantes deste programa adentrar com segurança nesta próxima etapa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Bulletin 88 – Sustainability of Precast Structures – Stat of the art Report 2018 International Federation for Structural Concrete and PCI Precast/ Prestressed Institute.

[2] Selo de Excelência ABCIC – Normas e Regulamentos do Programa http://www.abcic.org.br/Artigos/o-selo-de-excelencia-abcic.

[3] Farshid Shaddram, Marcus Sandberg, Jutta Schade and Thomas Oloffsson, BIM based environmental assessment in the building design process, Lulea University of Technology – Sweeden.

Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais

→ **Autores** P. Kumar Mehta e Paulo J. M. Monteiro (Universidade da Califórnia em Berkeley)

→ **Coordenadora da edição em português** Nicole Pagan Hasparyk (Eletrobras Furnas)

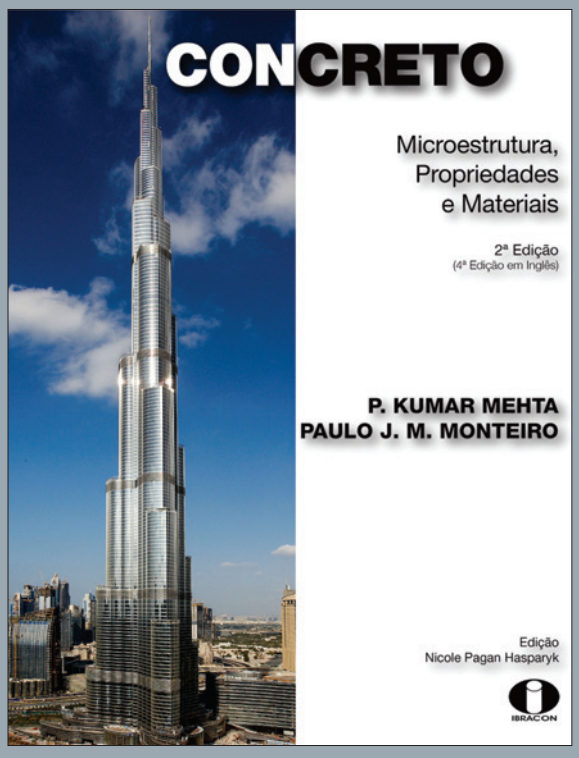
→ **Editora** IBRACON • 4ª edição (inglês) •2ª edição (português)

Guia atualizado e didático sobre as propriedades, comportamento e tecnologia do concreto, a quarta edição do livro "Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais" foi amplamente revisada para trazer os últimos avanços sobre a tecnologia do concreto e para proporcionar em profundidade detalhes científicos sobre este material estrutural mais amplamente utilizado. Cada capítulo é iniciado com uma apresentação geral de seu tema e é finalizado com um teste de conhecimento e um guia para leituras suplementares.

DADOS TÉCNICOS

ISBN: 978-85-98576-21-3
Edição: 2ª edição
Formato: 18,6 x 23,3cm
Páginas: 782
Acabamento: Capa dura
Ano da publicação: 2014

→ **Informações:** www.ibracon.org.br



Patrocínio

CIMENTO NACIONAL · Holcim · LEONARDI · IBRACON

Diretor regional de Uberlândia ministra minicurso sobre patologias e suas soluções

O diretor regional do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Prof. Turíbio José da Silva, foi o instrutor do minicurso "Patologias das construções e suas soluções", durante a XII Semana de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, no campus Santa Mônica, realizado no período de 4 a 6 de junho.

Regional de São Carlos apoia 5º Encontro ABECE-USFCar

Foi realizado em São Carlos, na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), o 5º Encontro ABECE-UFSCar em Engenharia de Estruturas, no último dia 8 de agosto.

Com o tema "Projeto e Execução de Estruturas Mistas", o evento contou com a participação de 300 profissionais. A abertura coube ao presidente da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE), Eng. João Alberto Vendramini,

que ressaltou a importância de parcerias entre universidades e o meio técnico-produtivo.

O apoio do IBRACON ocorreu por meio da participação de seu diretor regional na região, Prof. Guilherme Parsekian, na organização do evento, e da realização da palestra "Monitoramento de Estruturas de Pontes Mistas Ferroviárias", ministrada pelo Diretor de Relações Institucionais, Prof. Túlio Nogueira Bittencourt (foto).

Palestras no Clube de Engenharia do Rio de Janeiro

Com o apoio das regionais do IBRACON e da ABECE no Rio de Janeiro foram realizadas duas palestras técnicas no mês de julho no Clube de Engenharia. A palestra "Corrosão e proteção catódica em estruturas de concreto", ministrada pelo diretor da IEC (Instalações e Engenharia de Corrosão), Eng. Luiz Paulo Gomes, e pelo diretor técnico da José Luiz Cardoso Engenharia de Projetos e Consultoria, Eng. Luiz Eduardo Barata Cardoso, aconteceu em 10 de julho.

Já, a palestra "Cargas para o cálculo de estruturas de edificações: a evolução da revisão da norma", ministrada pelo presidente da ABECE, Eng. João Alberto de Abreu Vendramini, aconteceu no dia 24 de julho.

IBRACON participa de Semana Integrada em Campinas

O IBRACON apoiou a 21ª Semana Integrada do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia (CEATEC) na PUC-Campinas, de 2 a 6 de setembro. Durante o evento foi realizado o concurso Aparato de Proteção ao Ovo (APO) e uma palestra de apresentação do IBRACON e do Congresso Brasileiro do Concreto pelos diretores regional, Profª Ana Elisabete Jacintho, e de pesquisa e desenvolvimento, Prof. Leandro Trautwein.

IBRACON na Estrada Gaúcha

A Regional do IBRACON no Rio Grande do Sul oferece série de seminários de atualização tecnológica em várias cidades do estado. O objetivo é divulgar as pesquisas científicas voltadas para o mercado da construção civil. Abertos ao público, os próximos seminários ocorrerão em Lajeado, em 25 de setembro, e São Leopoldo, em outubro.

O *best seller* da engenharia de materiais de construção não pode faltar na sua biblioteca!

IBRACON

Ficha Técnica
ISBN / ISSN: 978-85-98576-27-5
Edição: 3ª edição
Páginas: 1760
Formato: 18,6 x 23,3 cm
Acabamento: Capa Dura
Ano de Publicação: 2017
Peso: 6,5 Kg

O livro "Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais" é a mais completa fonte de consulta para estudantes, professores e profissionais da engenharia.

Dividido em dois volumes, o livro é composto por 52 capítulos escritos por 86 reconhecidos especialistas brasileiros, totalmente referenciado nas normas brasileiras vigentes e de acordo com as práticas nacionais da mais alta qualidade da engenharia civil em vigor.

Garanta seus exemplares!
Acesse a Loja Virtual do IBRACON
www.ibracon.org.br

Instituto Brasileiro do Concreto

Organização técnico-científica nacional de defesa
e valorização da engenharia civil

Fundado em 1972, seu objetivo é **promover e divulgar conhecimento sobre a tecnologia do concreto e de seus sistemas construtivos para a cadeia produtiva do concreto**, por meio de publicações técnicas, eventos técnico-científicos, cursos de atualização profissional, certificação de pessoal, reuniões técnicas e premiações.

Associe-se ao IBRACON! Mantenha-se atualizado!

→ Receba gratuitamente as quatro edições anuais da **revista CONCRETO & Construções**

→ Tenha descontos de até **50%** nas **publicações técnicas do IBRACON** e de até **20%** nas **publicações do *American Concrete Institute (ACI)***

→ Descontos nos eventos promovidos e apoiados pelo **IBRACON**, inclusive o **Congresso Brasileiro do Concreto**

→ Oportunidade de participar de **Comitês Técnicos**, intercambiando conhecimentos e fazendo valer suas **opiniões técnicas**

Fique bem informado!

www.ibracon.org.br facebook.com/ibraconOffice twitter.com/ibraconOffice

61º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO IBRACON 2019

DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
AVANÇOS TECNOLÓGICOS

15 A 18 OUT – FORTALEZA – CEARÁ

FEIBRACON 2019
XV Feira Brasileira das Construções em Concreto

ESPAÇO DO CONHECIMENTO
Palestras técnico-científicas dos patrocinadores

CONFERÊNCIAS PLENÁRIAS

- **Paulo Monteiro (Berkeley University, EUA)**
  Multiscale X-ray Tomography of Concrete
- **José Antonio Campos e Matos (Universidade do Minho, Portugal)**
  A Experiência Europeia no Controlo de Qualidade de Pontes Rodoviárias. Resultados da Ação COST TU 1406
- **Pedro Castro (Cinvestav, México)**
  Sistematização das Normas Mexicanas de Durabilidade das Estruturas

EVENTOS PARALELOS

- V Simpósio de Infraestrutura Metroviária, Ferroviária, Rodoviária e Hidroviária
- III Seminário de Ensino de Engenharia Civil
- I Seminário Brasileiro de Edifícios Altos em Concreto
- Seminário de Inovações Tecnológicas
- Seminário de Estanqueidade das Estruturas de Concreto
- Seminário de Excelência na Contrução

PAINÉIS TÉCNICOS

- Projeto de Infraestrututura para o Ceará em 2050
- O Papel do Sinduscon Jovem no Setor da Construção Civil e o Profissional do Futuro
- Projeto de Infraestrutura Para Utilização de Energias Alternativas – Eólica e Solar
- Situação Atual do Pré-moldado no Brasil
- Produtividade na Construção Civil Usando Sistemas Protendidos
- Os Avanços da Tecnologia do Concreto no Estado do Ceará
- Espaço Senai/CE – Novas Tecnologias

CURSOS DO PROGRAMA MASTERPEC

- Minicurso sobre Controle de Qualidade de Pontes segundo a COST ACTION – TU 1406
- Segurança contra Incêndio: com Foco em Projetos de Retrofit
- Análise da Estabilidade em Estruturas Pré-moldadas de Concreto segundo a NBR9062:2017
- O Fenômeno Térmico do Concreto Massa
- Curso Básico de Projeto, Dimensionamento e Reabilitação de Pavimentos de Concreto
- Desempenho aplicado às Estruturas de Concreto Armado
- Concreto Protendido
- Reforço de Vigas de Concreto Armado: Flexão
- Atualização de Norma para Projeto e Execução de Alvenaria Estrutural

CONCURSOS ESTUDANTIS

- APO – Aparato de Proteção ao Ovo
- Concrebol
- Cocar – Concreto Colorido de Alta Resistência
- Ousadia
- Concreto: Quem Sabe Faz ao Vivo

SESSÃO CORUJÃO

- Tudo o Que Você Queria Saber Sobre Módulo de Elasticidade e Tinha Vergonha de Perguntar

CONCURSO O ARTIGO DO ANO

TEMAS CONTROVERSOS: ACIDENTES NA CONSTRUÇÃO

PREMIAÇÕES

Mais informações:

www.ibracon.org.br | ibraconOffice | office@ibracon.org.br | ibraconOffice

IBRACON