Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DA ARMADURA EM CONCRETOS COM CIMENTOS GEOPOLÍMEROS

L. SACARDO
Engenheiro Civil
Unisinos
RS; Brasil
lucas.sacardo@hotmail.com

M. MANCIO
Professor Dr.
Unisinos
RS; Brasil
mancio@gmail.com

RESUMO

O principal objetivo deste estudo é avaliar a resistência à corrosão de armaduras em concretos confeccionados com cimentos geopolímeros. Estes cimentos, também ditos álcali-ativados, são assim conhecidos devido ao processo de álcali-ativação, que transforma estruturas vítreas, amorfas ou parcialmente amorfas em materiais compactos e cimentantes. Em relação à resistência a corrosão, a principal preocupação está relacionada à elevada concentração dos ativadores alcalinos utilizados, levando a valores de pH e força iônica muito superiores àqueles normalmente encontrados em concretos à base de cimento Portland, o que pode influenciar negativamente na formação de um filme de passivação de boa qualidade, reduzindo assim a resistência à corrosão da estrutura. Para alcançar o objetivo, os métodos eletroquímicos utilizados incluem potencial de corrosão, resistência de polarização e resistividade elétrica. Para os ensaios foram feitos quatro traços, um referência (CP V ARI), um traço com substituição parcial do cimento Portland por cinza volante (75% de substituição), um traço de geopolímero à base de metacaulim e por último um traço de geopolímero com cinza volante. Os resultados obtidos foram consistentes, mostrando que a elevada concentração de ativadores alcalinos e o pH excessivamente alto (acima de 14) tiveram influência na formação de um filme de passivação de menor qualidade. Assim, parâmetros como potencial de corrosão e resistência de polarização apontaram que há riscos de corrosão para estes materiais geopolímeros.
Palavras-chave: Cimento. Geopolímeros. Álcali-ativado. Durabilidade. Corrosão.

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the corrosion resistance of reinforcement in concrete made with cements geopolymers. These cements also said alkali-activated, are well known due to the process of alkali-activation, which turns glassy structures, amorphous or partially amorphous materials in compact and cementing. Regarding corrosion resistance, the main concern is related to the high concentration of alkali activators used, leading to pH values and higher ionic strength to those normally found in concrete with cement Portland, which may negatively influence the formation of a good quality passivation film, thus reducing the corrosion resistance of the structure. To achieve the goal, the electrochemical methods used include corrosion potential, polarization resistance and electrical resistivity. For assays were done four traces a reference (CP V ARI), a trace with partial replacement of Portland cement by fly ash (75% replacement), a trace of geopolymer the metakaolin base and finally one geopolymer mark with fly ash. The results were consistent, showing that the high concentration of alkali activators and excessively high pH (above 14) influenced the formation of a lower quality passivation film. Thus, parameters such as corrosion potential and polarization resistance showed that there are risks of corrosion geopolymers for these materials.
Keywords: Cement. Geopolimers. Alkali ativation. Durability. Corrosion.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a Construção Civil teve um crescimento muito grande, e com isso a indústria cimenteira teve um impulso em sua demanda. Atualmente, o concreto é o material no ramo da construção civil mais utilizado no mundo, com produção anual estimada em 23 bilhões de toneladas. No Brasil, foram produzidas no ano de 2013 cerca de 70,2 milhões de toneladas de cimento Portland, uma média de 353 kg/hab/ano [1]. Pesquisas apontam que a fabricação do

cimento Portland é responsável por gerar de 5 a 7% das emissões globais de CO_2, e cerca de 4% das emissões nacionais. Atualmente, em todas as áreas, tanto a indústria cimenteira, quanto outras, visam à diminuição da produção de resíduos, ou a emissão de agentes nocivos ao meio ambiente. Assim, há uma conscientização por parte do ramo industrial, visando uma produção mais limpa e menos agressiva. Na engenharia civil, não tem sido diferente. Tendo em vista mitigar os efeitos ambientais deste produto, a comunidade cientifica vem desenvolvendo alternativas ao longo dos anos [2].

Os cimentos geopolímeros são uma alternativa que vem se mostrando muito interessante. Algumas propriedades desse material têm se tornado muito atrativas, como melhor desempenho em altas temperaturas, ou aumento do ciclo de vida. Porém, um aspecto que tem atraído grande interesse, é o seu potencial para reduzir a emissão de CO_2. [3]. Segundo [4], sabe-se que concretos de cimento geopolímero produzem 72,4% menos gás carbônico quando comparados à concretos de cimento Portland.

Segundo Mancio [5], os cimentos geopolímeros ou álcali-ativados são classificados como eco cimentos, e podem ser constituídos de materiais silico-aluminosos como metacaulim, cinza volante e escória de alto forno. Além disso, alguns materiais pozolânicos podem ser reaproveitados de resíduos industriais, entre outros.

Uma barreira na utilização desses cimentos álcali-ativados tem sido a avaliação de sua durabilidade. Principalmente no que tange à resistência à corrosão da armadura [2], onde não há muitas pesquisas nesse aspecto.

1.1 A química do cimento geopolímero

Os cimentos geopolímeros também são conhecidos como álcali-ativados, ou ainda, polímeros inorgânicos. São caracterizados pela reação silicoaluminato com altas concentrações de hidróxido de sódio, ou outro ativador alcalino, formando assim um material polímero inorgânico [6]. O processo de álcali-ativação, formador do geopolímero, é um processo que transforma estruturas vítreas, amorfas ou parcialmente amorfas em materiais compactos e cimentantes [7]. Assim, ele se enquadra na categoria de eco-cimentos, juntamente com à base de fosfato e à base de carbonatos amorfos [5].

Em geral, os geopolímeros podem ser sintetizados por materiais ricos em SiO_2 e Al_2O_3. A dissolução orientada do Al e Si em um meio fortemente alcalino, ocorre em um curto período e a uma temperatura média de 50ºC a 100ºC. Seguida pela policondensação, forma uma estrutura 3D conectada por sílico-aluminato. Com taxas de Si/Al igual a 1, a condensação ocorre entre o aluminato e o silicato. Caso seja maior que 1, essa proporção resulta em SiO_2, ocorrendo entre silicato e silicato. Assim, esta última taxa é de menor velocidade que a anterior. Para que se consiga boas resistências, as taxas de SiO_2/ Al_2O_3 devem estar na faixa de 3,0 a 3,8, e as de Na_2O/Al_2O_3 na taxa próximo a 1. O metacaulim é conhecido como grande fonte de SiO_2 e Al_2O_3 amorfa, e altamente reativo com ativadores alcalinos [8].

Segundo Glukhovsky [6], o processo reativo da sílica e alumina na álcali-ativação é dividido em três etapas, iniciando na destruição-coagulação, coagulação-condensação e condensação-cristalização. Em pH altos, a dissolução do alumino-silicatos amorfos é rápida, criando uma solução alumino-silicato supersaturada que resulta em um gel. Os oligômeros em fase aquosa formam grandes ligações pela condensação, normalmente consumido durante a dissolução. O resultado é uma estrutura alumino-silicato tridimensional [6]. A solução álcali ativadora, na sua maioria das vezes, é o hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), que tem por função aumentar a velocidade de reação e garantir a resistência mecânica nas primeiras horas. Essa solução também garante o aumento do pH, acima de 12 (alcalino) [5] [9] [10].

1.2 À corrosão

Segundo Helene [11], a corrosão é uma interação entre materiais e o meio ambiente, onde haverá processos de deterioração deste material. Essa interação destrutiva ocorre devido a ações físicas, químicas, eletroquímicas ou a combinação destas. De acordo com Smith [12], a corrosão no aço é inevitável. Devido às condições atmosféricas, o aço possui uma tendência natural a entrar em um estado mais estável, e para isso ocorre à oxidação. Na corrosão eletroquímica há a formação da pilha eletroquímica, que ocorre devido a presença de água, havendo assim a dissolução da barra na zona anódica [11].

1.2.1 Carbonatação

A carbonatação é uma reação entre o dióxido de carbono (CO_2) e a solução alcalina no poro da pasta de cimento. Como resultado desta reação, os íons de hidróxidos do poro são consumidos e o pH diminuí. Assim, não é mais possível

manter a camada de passivação, e o ambiente se torna propício para a penetração da frente carbonatação. A qualidade do cobrimento do concreto é um fator que interfere, facilitando a Carbonatação [12]. A alta alcalinidade da solução ocorre principalmente devido a presença de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Os cristais de $Ca(OH)_2$ acabam precipitando com a matriz do concreto e criam uma espécie de reserva alcalina. A temperatura ambiente desta reserva eleva o pH a faixa de 12,4. A precipitação do $CaCO_3$ causa uma diminuição no pH 8,3 a 9, levando ao rompimento do filme de passivação [11].

1.2.2 Ação de íons de cloretos

Para Carino [12] a presença de íons de cloretos é um dos agentes causadores do rompimento do filme de passivação. Segundo Rosenberg [12] a mínima concentração de íons de cloretos pode iniciar a quebra da camada de passivação. A corrosão por ação de íons de cloreto ocorre de maneira diferente do que por carbonatação. Os íons de cloreto (Cl^-) atacam a camada de passivação, catalisando a corrosão, reagindo com o Fe^{2+} e formando $FeCl_2$. Não havendo uma queda do pH, e não sendo consumido durante o processo, os íons de cloreto absorvem a umidade causando o aumento da concentração de água nos poros. Assim, aumentando a condutividade elétrica e acelerando o processo de corrosão [13].

1.2.3 Passivação

Segundo Helene [11], a passivação é a formação de uma fina película por um óxido estável e aderente, a qual resistirá a corrosão. Para que haja a formação desta película, é necessário que o pH seja altamente alcalino e potencial eletroquímico adequado. Essa película tem como característica elevada resistência ôhmica, o que resulta numa taxa de corrosão desprezível, devido ao impedimento da penetração de umidade, oxigênio e agentes agressivos ao concreto [14].

1.2.4 Influência do pH

O diagrama de Porbaix delineia as áreas de estabilidade eletroquímica em função do potencial eletroquímico e o pH do ambiente [15]. A figura 1 exemplifica as faixas de equilíbrio entre potencial eletroquímico e pH. As reações encontram-se a 25ºC de temperatura, em condições de equilíbrio do ferro em função do pH. O gráfico apresenta o potencial eletrodo padrão (eixo y) e o pH (eixo x) [14].

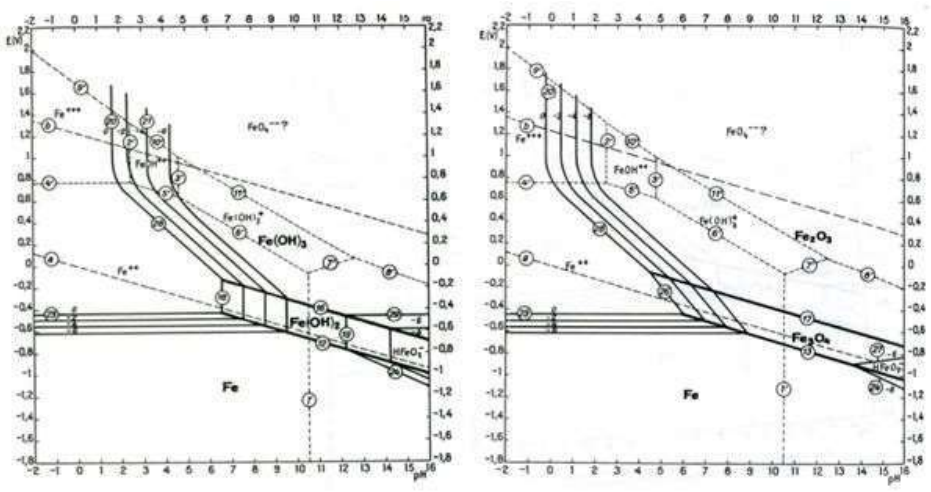


Figura 1: Diagrama de Pourbax
Fonte: Pourbaix [17]

A zona de imunidade (Fe) é a região do diagrama onde o aço não corrói, independente se está meio ácido, neutro ou alcalino. A zona de passivação é a qual possui a formação da película de proteção, e sua qualidade é definida pelo nível de proteção do metal, formada por óxidos (b) e hidróxidos (a) de Fe. E a zona de corrosão se desenvolve onde há condições para a corrosão, formadas por íons solúveis (Fe++, Fe+++, HFeO2-) [14] [16]. O pH tem efeito na solubilidade dos óxidos de ferro e hidróxidos. A solubilidade do Fe(OH)2 minimiza em pH próximos a 10,5. Estudos recentes afirmam que pH próximos a 14 são mais solúveis que a 10 [17].

1.2.5 Força iônica

Segundo Skoog *et al* .[18],a adição de eletrólitos é independente da sua natureza química, mas sim da sua solubilidade, ou seja, de sua força iônica. A força iônica tem influência sobre o filme de passivação, uma vez que o pH também depende da força iônica, o que pode causar modificações na densidade de corrente [17].

2. METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste trabalho teve como objetivo avaliar a resistência à corrosão em armaduras com cimentos geopolímeros. A sequência dos procedimentos iniciou-se com a caracterização dos materiais, posterior a esta etapa um estudo de dosagem e para finalizar os ensaios eletroquímicos. Foram utilizados quatro traços para os experimentos: traço 1 CPV-ARI, traço 2 CPV-ARI (75% de cinza volante), traço 3 metacaulim e traço 4 cinza volante.

O agregado miúdo para o experimento foi a areia fina, com distribuição granulométrica determinada através da ABNT NM 52:2009 [19] e com módulo de finura de 0,94 e diâmetro máximo do grão de 0,6mm. O agregado graúdo utilizado foi a brita, sua distribuição granulométrica foi determinada pela ABNT NM 248:2009 [20], com módulo de finura de 6,79 mm e diâmetro máximo de 19 mm.

Para a confecção do concreto, foram utilizados diferentes tipos de cimento: o Portland, CPV-ARI; e o geopolímero, cinza volante e metacaulim. Foi utilizado concreto de cimento Portland com as características mínimas permitidas pela norma [21] para confecção de concreto armado, comparando-o com o concreto geopolímero. Assim, analisando os resultados entre esses dois materiais.

O aço utilizado para avaliar o potencial de corrosão em todos os ensaios é proveniente da mesma barra, CA-50 ø12,5 mm. As especificações da barra de aço são conforme a NBR 8965:1985 [22]. Visando diminuir a interferência nos resultados, as barras foram limpas antes de serem concretadas com o corpo de prova. A limpeza foi feita primeiramente com uma escova de aço, e depois utilizou álcool para a remoção de gorduras.

2.1 Definição do traço

A fim de levantar dados para comparação, foram definidos dois traços adicionais à base de cimento de cimento Portland. Assim, para os traços 1 e 2, foram utilizadas as mesmas quantidades e relação água/aglomerante que o trabalho de [16]. O traço 2 teve substituição parcial de cimento Portland por cinza volante. O teor de argamassa foi fixado em 55% para todas as amostras. A escolha dos traços de cimento Portland mostra a pior situação para o uso do concreto armado permitido pela NBR 6118:2014 [21]. A tabela 1, mostra o traço utilizado.

Tabela 1 - Traços unitários utilizados para concreto de cimento Portland

Traço	Proporcionalidade	Quantidade de cimento (kg)	Quantidade em massa		
			Areia	Brita	Água/Aglomerante
CPV - ARI	100%	1	2,08	2,52	0,65
CPV + CV	25% - 75%	1	2,08	2,52	0,65

Para a dosagem do cimento geopolímero, utilizou-se os dados da composição química do metacaulim e da cinza volante, calculando assim as quantidades constituintes, como as taxas molares de sílica e alumina. Essas quantidades foram calculadas conforme o trabalho de Rissardi [23], a partir das relações molares ideais encontradas no estudo de Silva; K. Sagoe-Crenstil; V. Sirivivatnanon [8]. A tabela 2 mostra os traços utilizados.

Tabela 2 - Traços unitários para concreto geopolímero

Traço	Proporcionalidade	Quantidade de cimento (kg)	Quantidade em massa		
			Areia	Brita	Água/Aglomerante
MET	'100%	1	1,2	1,8	0,69
CV	100%	1	1,2	1,8	0,32

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

É importante ressaltar que para a correção das taxas molares foi utilizado hidróxido de sódio, com uma pureza de 95%. A partir dos traços de argamassa utilizados em estudos anteriores e em ensaios piloto (traço 1:3 conforme NBR 7215), transformou-se essa dosagem para concreto utilizando um teor de argamassa de 55%, resultando em um traço 1:1,2:1,8. Cabe ressaltar ainda que para o traço 4, com cinza volante, foi necessário adicionar água no momento da moldagem devido à baixa trabalhabilidade, alterando a relação água/aglomerante, que passou de 0,32 para 0,46.

2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Utilizou-se dois tipos de corpos de prova para os ensaios. Para determinar a resistência à compressão e resistividade, fez-se necessário o uso de corpos de provas cilíndricos que fossem adequados ao equipamento, possuindo dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A quantidade foi definida em três CPs para cada idade de rompimento: 7, 14 e 28 dias. Nos ensaios que determinaram os valores de potencial de corrosão e resistência de polarização, os corpos de provas foram diferentes. As dimensões foram definidas para que possibilitassem a leitura dos dados pelo equipamento. Sendo assim, as dimensões foram definidas em 260 mm por 260 mm de base e uma altura de 100 mm. Para cada traço foram moldados dois corpos de prova.

Como os corpos de prova prismáticos foram utilizados para os ensaios eletroquímicos, uma barra de aço CA 50 foi adicionada no centro do CP. As dimensões dessa barra são de 320 mm de comprimento, desse total 90 mm ficaram fora do concreto. O cobrimento utilizado foi de 25 mm, para isso foram usados espaçadores de 60 mm tipo mesa.

Tendo em vista a obtenção das propriedades esperadas para os ensaios de resistência mecânica e os eletroquímicos, foram adotadas duas condições de curas. Para o traço de referência e o com adição de cinza volante a cura foi feita na câmara úmida, espaço com temperatura e umidade controladas em média a 20ºC. Porém, anterior a cura realizada na câmara úmida, os corpos de prova permaneceram na sala onde foram moldados por 24 horas, até sua desmoldagem. Após esse período os CPs foram transferidos para a câmara úmida. Os traços com metacaulim e cinza volante foram submetidos a uma estufa com temperatura constante de 80ºC, por um período de 7 dias. Nas primeiras 24 horas permaneceram nas fôrmas, onde foram moldados, com uma placa de vidro em cima e dentro da estufa. Após o período de 7 dias os CPs cilíndricos foram transferidos para uma sala climatizada. Essa temperatura foi definida a partir de ensaios pilotos com argamassa e CPs cilíndricos de 5x10 cm, onde se chegou a uma temperatura ideal devido às maiores resistências mecânicas pelo metacaulim. Já a cinza volante seguiu a temperatura de 80ºC, dos ensaios realizados na tese de Vargas [24]. A fim de evitar a perda de água da mistura, por meio da evaporação os corpos de prova foram cobertos com placas de vidro, por um período de 24 horas. É importante ressaltar que os corpos de prova que foram submetidos aos ensaios eletroquímicos só foram desmoldados quando levados para o laboratório onde realizariam os ensaios, no caso dos concretos geopolímeros. Isso devido ao espaço reduzido na estufa, que obrigou a estocar os CPs num espaço reduzido.

2.3 Ensaios Eletroquímicos

A realização dos ensaios não destrutivos para monitoramento de corrosão, utilizou os equipamentos GECOR 8, produzido pela NDT James Instrument Ltda o qual se encontrava no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), da UFRGS. Também foi utilizado o equipamento Resipod, fabricado pela Proceq, pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção (LMC), na UNISINOS. Em todos ensaios eletroquímicos, em cada idade foram realizadas cinco medições em cada bloco, totalizando dez medições para cada traço testado.

2.3.1 Potencial de Corrosão e Resistência de Polarização

Tem por finalidade medir os parâmetros de Potencial de Corrosão (Ecor) e Densidade de corrente (Icor). Para isso, utilizou-se o equipamento GECOR 8. Como no próprio GECOR indica, o instrumento foi desenvolvido para medir a taxa de corrosão em estruturas de concreto armado. O instrumento utiliza uma técnica galvanostática, em que realiza as medições através da aplicação de uma pequena corrente na armadura, e a partir disso, verifica diferenças no potencial elétrico [16].

Com o GECOR 8 é possível realizar diferentes métodos de ensaios. Para este estudo foi utilizado o método “aerial structures”, levando em considerações que as peças não foram armazenadas em ambientes com contato de água. O uso do sensor A resultou nos valores de densidade de corrente e potencial de corrosão. Todos os ensaios seguiram as recomendações estabelecidas pela TC 154-EMC da RILEM [25] [26]. Para o funcionamento do GECOR 8, é preciso ajustar algumas configurações do equipamento. O tempo de polarização escolhido foi 100 s, que é o padrão do equipamento. A constante de Stern Geary no instrumento possui um valor de 26 mV, segundo o manual.

2.3.2 Resistividade Elétrica

A resistividade foi medida através do instrumento Resipod, seguindo recomendações da ASTM G57 [27]. O princípio seguido é o dos quatro eletrodos, ou princípio de Wenner. Neste princípio consiste em quatro sondas espaçadas igualmente em linha reta, que aos serem pressionadas contra o concreto informam o valor da resistividade. O espaçamento entre as sondas é de 50 mm, onde os pontos externos induzem uma corrente alternada de frequência 40 Hz e tensão 38 V. A medição do é feita pelos eletrodos internos.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

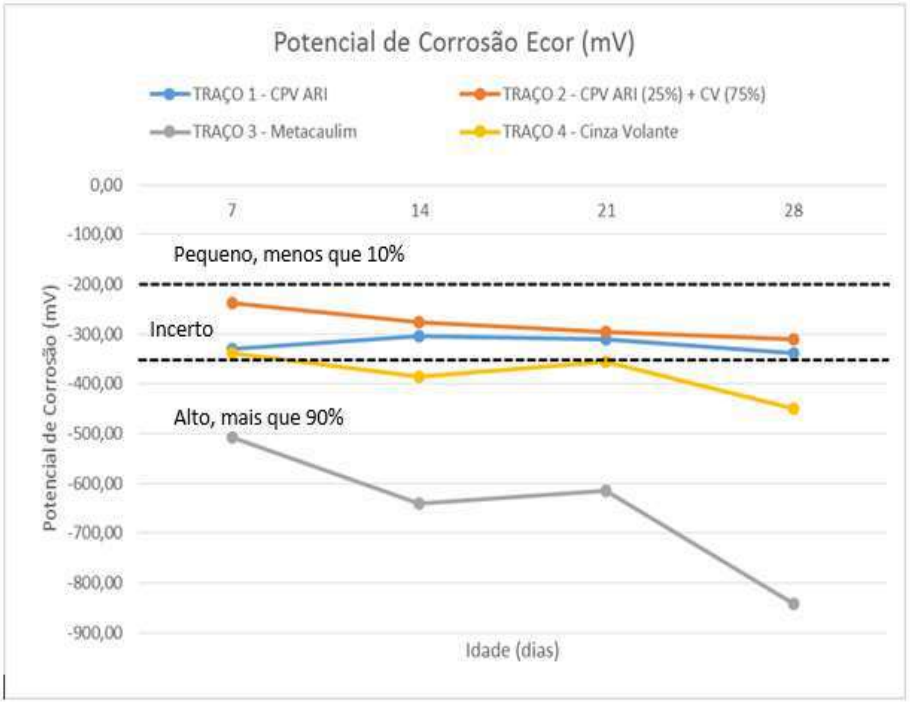
3.1 Potencial de Corrosão

A média dos resultados de potencial de corrosão (Ecor) obtidos das duas amostras para cada traço, está representada na tabela 3. As evoluções dos valores estão representadas no gráfico do gráfico 1. Esses valores estão correlacionados com os limites estabelecidos na ASTM C876 [28]. Os valores apresentados foram obtidos através de uma média aritmética, em que foram obtidas 5 leituras em cada corpo de prova. Para cada traço foram dois corpos de provas, gerando um total de 10 medições por traço. A exceção foi o traço 3, onde um dos corpos de prova não pode ser obtido leitura, nesse caso foram feitas somente 5.

Tabela 3 – Resultados de potencial de corrosão

Traço	Tempo (dias)	Ecor (Mv)
TRAÇO 1 – CPV ARI	7	-330,18
	14	-303,96
	21	-311,54
	28	-339,36
TRAÇO 2 – CPV ARI (25%) + CV (75%)	7	-238,28
	14	-276,23
	21	-295,87
	28	-311,11
TRAÇO 3 – Metacaulim	7	-506,85
	14	-641,25
	21	-614,65
	28	-841,44
TRAÇO 4 – Cinza Volante	7	-338,42
	14	-386,37
	21	-355,91
	28	-448,79

Gráfico 2 – Evolução do potencial de corrosão



As medições iniciaram aos 7 dias, e se desenvolveu num intervalo igual de uma semana, até finalizar aos 28 dias. Os traços 1, 2 e 4 apresentam comportamento parecidos aos 7 dias, com potencial de corrosão incerto. O comportamento do traço 3, com metacaulim, é distinto pois apresenta desde os 7 dias um potencial alto, que remete a uma propensão alta com mais de 90% de chances de corrosão. As amostras referentes ao CPV e a 75% de CV mantiveram-se na zona de incerteza. O traço 2, manteve um crescimento gradual do potencial de corrosão até os 28 dias. Já o traço 1 aos 14 e 21 dias teve um pequeno decréscimo no potencial e aos 28 dias houve um aumento, retomando a valores próximos aos iniciais.

Os traços de concreto com cimento geopolímeros mantiveram uma constante no crescimento dos potenciais. Os valores menores foram encontrados aos 7 dias, aumentaram os resultados até os 14 dias, com uma pequena diminuição aos 21 dias e com os maiores valores aos 28 dias. As amostras com cinza volante iniciaram com uma incerteza no potencial de corrosão e com o aumento das idades foi se confirmando o crescimento no potencial de corrosão, que permaneceu em alto. O traço com metacaulim manteve-se com o potencial alto desde as idades iniciais.

Fica evidente que os melhores desempenhos foram obtidos para o traço de referência e o traço com 75% de CV. Percebe-se ainda que a média dos valores do traço 2 foram melhores que a do referência. Comparando as amostras de referência com concretos geopoliméricos é possível perceber uma clara diferença entre os potenciais de corrosão. À medida em que o ambiente se torna mais alcalino do que o ideal a formação do filme de passivação apresenta uma maior fragilidade, reduzindo a resistência à corrosão. Visto que o pH médio de concretos de cimento Portland está na faixa de 13 [2], ideal para o desenvolvimento do filme de passivação. Para esses traços desenvolvidos de concreto de cimento geopolímeros o valor do pH calculado[1] foi de 14,67 para o traço de cinza volante (4,63 M de NaOH) e 14,93 o com metacaulim (8,59 M de NaOH). Assim o ambiente extremamente alcalino pode ter contribuído para a formação de um filme de passivação de qualidade inferior, como esperado com base nos estudos anteriores.

3.2 Resistividade elétrica

Os resultados da resistividade elétrica estão representados na tabela 15 e a sua evolução no gráfico 2. No gráfico representa também o grau de risco de corrosão, seguindo os limites previstos na norma RILEM TC 154-EMC [29].

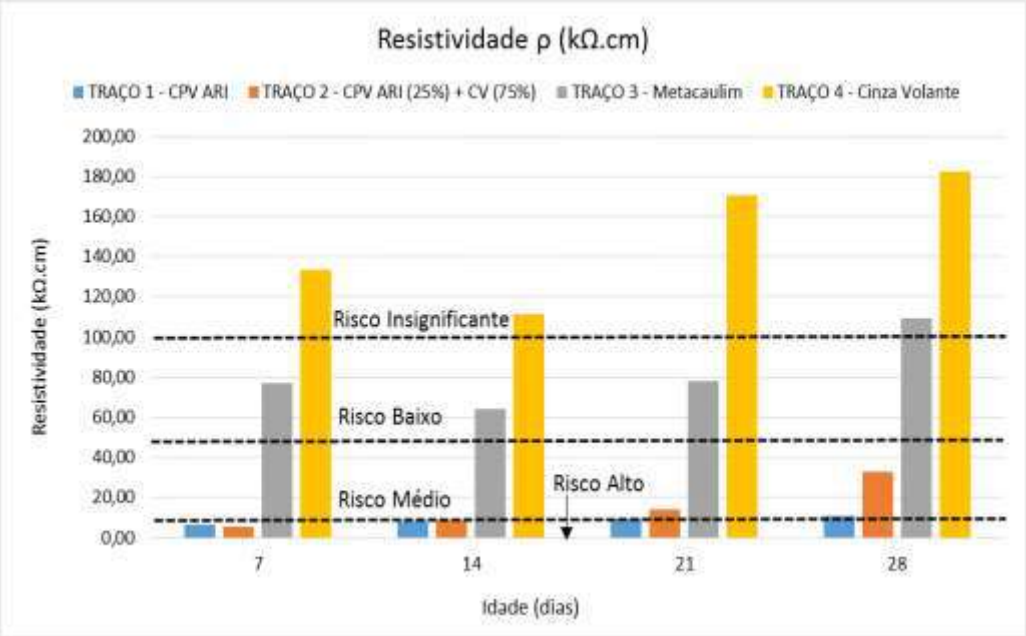
[1] O pH foi calculado a partir de cálculos estequimétricos da concentração de NaOH e H_2O da solução. Assim descobrindo o número de moles de NaOH, a partir desse valor calculou-se o pH a partir das relações pOH = -log[OH^-] e pH + pOH = 14.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Tabela 4 - Resultado de resistividade

Traço	Tempo (dias)	ρ (kΩ.cm)
TRAÇO 1 - CPV ARI	7	6,34
	14	8,33
	21	9,20
	28	11,02
TRAÇO 2 - CPV ARI (25%) + CV (75%)	7	5,59
	14	8,77
	21	14,28
	28	32,88
TRAÇO 3 - Metacaulim	7	76,72
	14	64,07
	21	78,06
	28	109,38
TRAÇO 4 - Cinza Volante	7	133,61
	14	111,12
	21	170,43
	28	182,19

Gráfico 3 - Evolução da resistividade elétrica



Como nos outros ensaios foram levantados os dados de 7 até os 28 dias. Um ponto em comum entre todas as amostras foi o crescimento da resistividade ao longo do tempo. Isso fica bem evidente no gráfico, onde há crescimentos na resistividade de até 588%. Segundo Ortolan [16] com o aumento da hidratação do concreto há um crescimento na resistividade. O traço referência (1) e o com 75% de CV iniciaram com um risco de corrosão alto. E com a evolução da idade passaram para risco de corrosão médio. Apresentando um aumento de resistividade elétrica de 74% para o traço 1 e 488% para o 2.

As amostras dos traços 3 e 4 iniciaram com uma resistividade mais elevada que as outras amostras. O traço com metacaulim iniciou na faixa de risco baixo e evoluiu para insignificante. Assim obteve um crescimento de 43%. A com cinza volante começou na faixa insignificante e permaneceu nela, porém também obteve um crescimento na resistividade de 36%. Como indicado por Ortolan [16] os altos teores de substituição do cimento por cinza volante levaram a uma melhora significativa em relação a resistividade. Segundo Oliveira [30] a substituição do cimento Portland por cinza obteve resultados positivos.

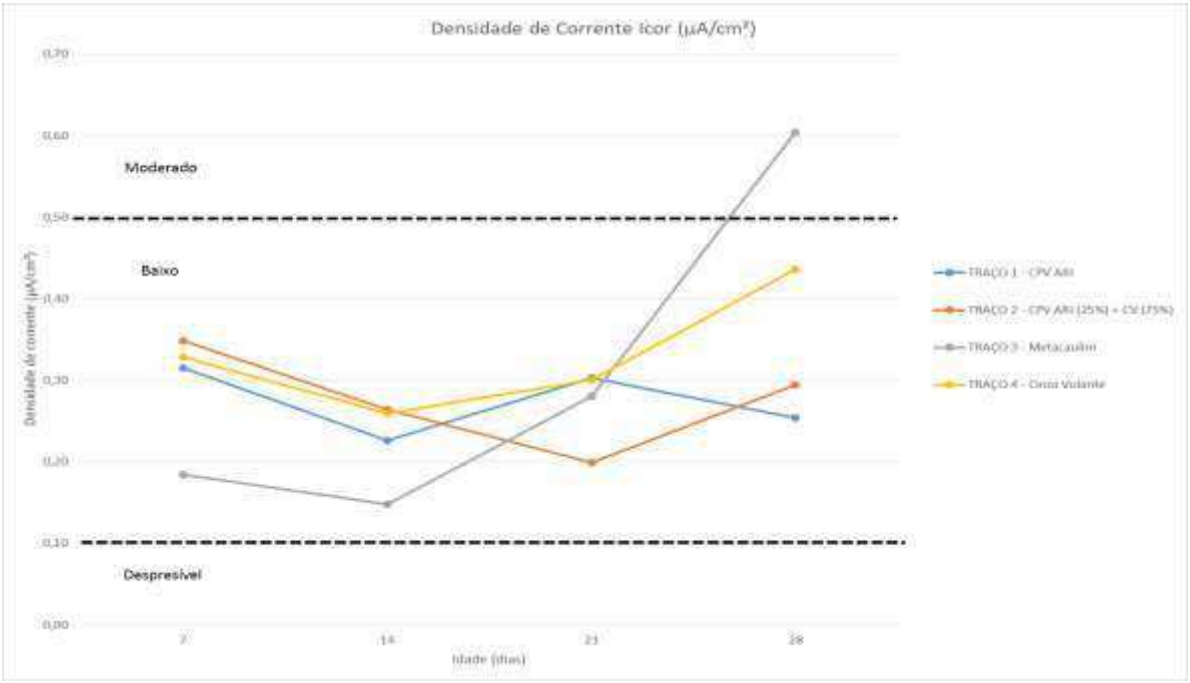
3.3 Resistência de polarização

As médias das densidades de corrente e resistência de polarização encontram-se na tabela 5. Os gráficos 3 e 4 apresentam a evolução da densidade de corrente (Icor) e resistência de polarização (Rp), os dados foram comparados com os parâmetros estabelecido na norma RILEM TC 154-EMC [26].
O GECOR 8 informa o valor de Icor, onde a partir deste calcula-se o Rp. A resistência de polarização é calculada a partir da ASTM G59 [31]. Para o cálculo a constante de Stern Geary é 26 mV, que é a padrão do equipamento. As leituras foram realizadas aos 7, 14, 21 e 28 dias. Para o cálculo da resistência de polarização foram utilizadas as médias finais do Icor.

Tabela 5 - Resultados de Icor e Rp

Traço	Tempo (dias)	Icor(µA/cm²)	Rp (fkΩ.cm²)
TRAÇO 1 - CPV ARI	7	0,32	97,39
	14	0,23	115,49
	21	0,30	91,41
	28	0,25	104,01
TRAÇO 2 - CPV ARI (25%) + CV (75%)	7	0,35	75,35
	14	0,26	98,85
	21	0,20	131,61
	28	0,29	121,88
TRAÇO 3 - Metacaulim	7	0,18	141,30
	14	0,15	175,68
	21	0,28	92,86
	28	0,60	43,05
TRAÇO 4 - Cinza Volante	7	0,33	80,86
	14	0,26	113,83
	21	0,30	89,57
	28	0,44	61,60

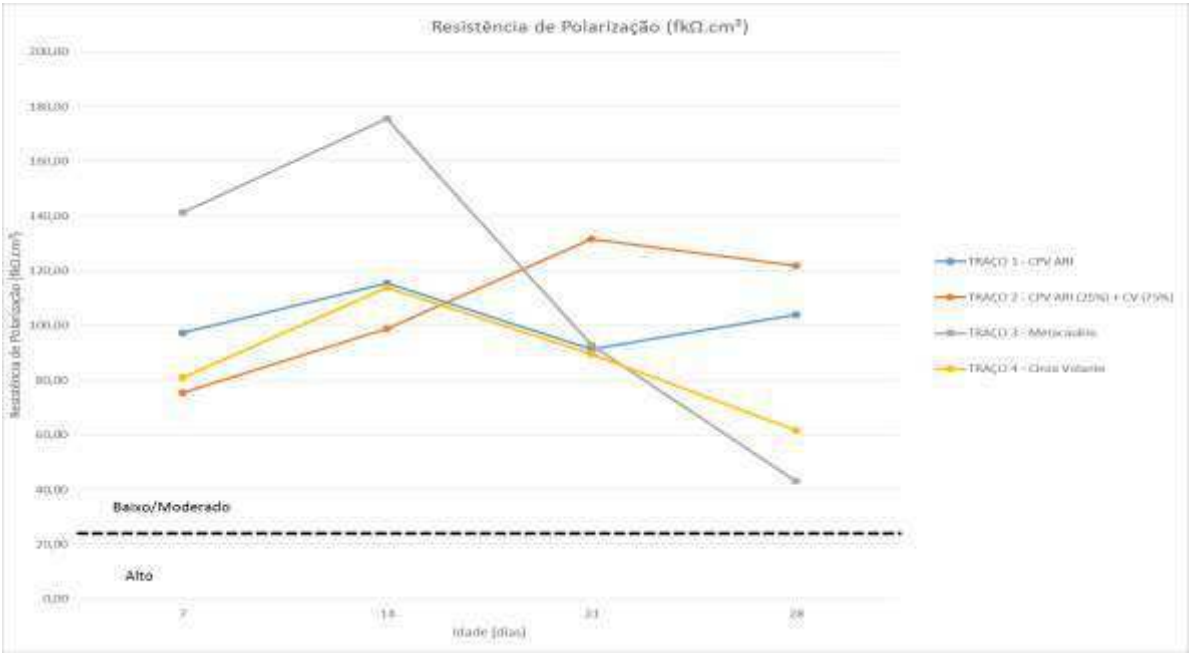
Gráfico 4 - Evolução da densidade de corrente



A medição da densidade de corrente é instantânea, ou seja, o resultado é o indicado no momento. Para determinar a densidade de corrente única da estrutura é necessária que a análise seja feita através da média dos valores e ao longo de um período. O gráfico acima (gráfico 3) demonstra que a densidade se manteve em níveis de corrosão baixos (entre 0,1 e 0,5 µA/cm²), com exceção do metacaulim aos 28 dias, onde apresentou valores moderados, superiores a 0,5 µA/cm².

Com os valores de Icor, foram calculadas as Rp, que estão representadas no gráfico abaixo (gráfico 4).

Gráfico 5 - Evolução da resistência de polarização



Como pode ser observado os valores de resistências de polarização ficaram na faixa de baixo/moderado. Isso significa que o aço está em estado ativo de corrosão. As taxas de corrosão baixa/moderada estão na faixa de 25 a 250 fkΩ.cm².
O traço referência (1) e o traço 2 por CV obtiveram os melhores resultados. Onde o traço 2, obteve o maior crescimento de resistência de polarização aos 28 dias, cerca de 62%. Com um pico de crescimento aos 21 dias. O traço 1 teve uma variação entre aumento e diminuição dos valores, e ao final obteve um crescimento de 7%. As amostras do traço com metacaulim iniciaram aos 7 dias com os melhores valores de resistência de polarização, aos 14 dias chegaram a um pico de 175,68 fkΩ.cm². Após esta data os valores começaram a decair, chegando aos 28 dias com os menores resultados de Rp (43,05 fkΩ.cm²). O traço com cinza volante, obteve a mesma configuração gráfica que o metacaulim. Com resultados crescentes até os 14 dias, onde foi o máximo alcançado, e os menores valores aos 28 (Rp = 61,60 fkΩ.cm²).
Os resultados dos traços 1 e 2 foram os esperados, mantendo o mesmo padrão encontrado por Ortolan [16]. onde a substituição por CV teve um desempenho superior ao referência. Já os traços com cimento geopolímeros tiveram resultados inferiores. Como citado anteriormente a influência do pH na formação do filme de passivação reflete nos resultados obtidos. Estudos, como apontado no capítulo 1.2.4 apontam que o pH tem efeito na solubilidade de óxidos de ferro e hidróxidos. Os cimentos geopolímeros que possuíam valores muito superiores ao ideal para a formação do filme. Assim, obtiveram desempenhos inferiores ao traço referência e ao com substituição.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a resistência à corrosão em concretos com cimentos geopolímeros. Assim, fez-se necessário análises através de ensaios de potencial de corrosão, resistividade e resistência de polarização. As considerações finais foram baseadas nos ensaios realizados no programa experimental e nas análises de resultados.

Em relação aos ensaios eletroquímicos percebe-se duas situações bem distintas. Primeira, como substituição do cimento Portland por cinza volante, é nítida a melhora no potencial de corrosão e resistência de polarização. Apesar dos traços referência e o com 75% de CV se manterem na zona de incerteza, os resultados da cinza volante como substituição parcial foram sempre melhores.

Os cimentos geopolímeros possuem um comportamento esperado, onde obtiveram resultados em relação a resistência de polarização e potencial de corrosão inferiores aos outros. Entre os dois concretos de cimento geopolímeros também existe uma diferença notável do comportamento. O traço com cinza volante obteve melhores resultados do que o com metacaulim, em todos os ensaios eletroquímicos.

No que tange a resistividade elétrica é interessante ressaltar que os melhores resultados obtidos foram pela cinza volante e depois pelo metacaulim. Isso nos leva a crer que a resistividade não foi um fator determinante para a avaliação da corrosão. Baseando-se apenas nos valores de resistividade, ambos cimentos geopolímeros seriam classificados risco de

corrosão insignificante, algo que os outros ensaios provam que não é real. Os resultados de potencial de corrosão e resistência de polarização indicam que a elevada concentração de ativadores alcalinos e o aumento excessivo do pH (acima de 14) levam de fato à formação de um filme de passivação de baixa qualidade (como pode ser observado nos gráficos de Pourbaix, no item 1.2.4), causando uma redução na resistência à corrosão dos concretos geopoliméricos. Observa-se que a densidade de corrente se mostrou mais elevada para os concretos de cimentos geopolímeros, e o potencial mais eletronegativo, o qual indica maiores chances de corrosão, em torno de 90%. Os efeitos da concentração elevada de NaOH (de 4,63 M para a CV e 8,59 M para o metacaulim foi 8,59 M) tornam-se evidentes nos resultados dos ensaios eletroquímicos, onde os piores resultados foram obtidos para o traço com metacaulim.

5. REFERÊNCIAS

[1] SNIC. **Sindicato Nacional das Indústrias Cimenteiras,** 2013. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>. Acesso em: 24 de maio de 2015.
[2] MANCIO, Maurício. Avaliação da Resistência e Durabilidade de Cimentos Especiais com Reduzido Impacto Ambiental. Projeto de Pesquisa, Edital Pesquisador Gaúcho – PPG – 2014.
[3] BORGES, P. H. R. et al. Estudo comparativo da análise do ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, 2014.
[4] PROVIS, John L. Geopolymers and other álcali activated materials: why, how, and what? Materials and structures. Scheffield, 2013.
[5] MANCIO. M. Impactos Ambientais da Indústria Cimenteira e o Desenvolvimento de novos Eco-Cimentos. Seminário de Sustentabilidade da Cadeia Produtiva do Concreto. In: 53° IBRACON - Congresso Brasileiro do Concreto, 2011.
[6] DUXON, P et al. Geopolymer technology: the current state of the art. Advanced in geopolymer science and technology. Parkville, 2007.
[7] PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-acivated Fly Ashes. A Cement for Future. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1323-1329, 1999.
[8] SILVA, P. DE; K. SAGOE-CRENSTIL; V. SIRIVIVATNANON. Kinetics of geopolymerization: Role of Al2O3 and SiO2. Cement and Concrete Research, North Ryde, v. 37, p. 512-518, 2007.
[9] MELO, L. G. De A. Síntese e caracterização de geopolímeros contendo Filitos. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Ciências dos Materias, IME, Rio de Janeiro, RJ, 2011.
[10] PINTO, A. T. Introdução ao estudo de Geopolímeros. Vila Real, 2006.
[11] HELENE, P. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese (Doutorado), USP, São Paulo, SP, 1993.
[12] CARINO, N. J. Nondestructive Techniques to Investigate Corrosion Status in Concrete Structures. Journal of Performance of Constructed Facilities. v. 13, n. 3, p. 96-106, 1999.
[13] MANCIO, M. et al. Electrochemical and in-situ SERS study of passive film characteristics and corrosion performance of microcomposite steel in simulated concrete pore solutions. Berkeley: University of California, 2008.
[14] FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R. Corrosão das armaduras de concreto. [S.l.]: ALCONPAT Internacional, 2013.
[15] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 222R. Protection of metals in concrete against corrosion. ACI Committee Reports, 2001.
[16] ORTOLAN, V. de K. Avaliação da influência do pH e da força iônica da solução dos poros do concreto na corrosão da armadura. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), UNISINOS, São Leopoldo, 2015.
[17] MANCIO, M. Electrochemical and in-situ Surface-Enhanced Raman Spectroscopic (SERS) study of passive films formed on low-carbon steel in highly alkaline environments. Tese (Doutorado), Berkeley, University of California, 2008.
[18] SKOOG, D. A. et al. Fundamentos de química analítica. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.
[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NM NBR 52: Agregado miúdo: determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NM NBR 248: Agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 89: Barras de aço CA 42 S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro, 1985.

[23] RISSARDI, C. Z. Método de Dosagem para Cimentos Álcali-ativados In: MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 22, 2015. São Leopoldo-RS. Resumos... São Leopoldo-RS: Casa Leiria, 2015. p. 1678.
[24] VARGAS, A. S. de. Cinzas volantes álcali-ativadas para a obtenção de Aglomerantes especiais. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), UFRGS, Porto Alegre, 2006.
[25] RILEM TC 154-EMC. Recommendations: Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforced concrete structures. Materials and Structures, 2003. v. 36, p. 461–471.
[26] RILEM TC 154-EMC. Recommendations: Test methods for on-site corrosion rate measurement of polarization resistance method. Materials and Structures, 2004. v. 37, p. 623–643.
[27] ASTM INTERNATIONAL. ASTM C150ASTM G57: Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. EUA, 2012.
[28] ASTM INTERNATIONAL. ASTM G59: Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. EUA, 2014.
[29] RILEM TC 154-EMC. Recommendations: Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. Materials and Structures, 2000. v. 33, p. 603–611.
[30] OLIVEIRA, A. M. Avaliação do desempenho de concreto com adições minerais quanto à corrosão das armaduras induzida por cloretos. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Goiás, Goiânia, 2007.
[31] ASTM INTERNATIONAL. ASTM G59: Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. EUA, 2014.