

ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE METACAULIM EM CONCRETOS SUBMETIDOS A AMBIENTES DE ALTA AGRESSIVIDADE

Carolini Fernandes Gomes (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2);

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) carolini.gomes@hotmail.com, (2) dss@unesc.net

RESUMO

Os sulfatos são um dos grandes responsáveis pela degradação do concreto. Nas estações de tratamento de esgoto (ETE) encontram-se em presença constante, juntamente com outras substâncias que contribuem para a diminuição da vida útil dessas estruturas. A qualidade do concreto empregado é fator determinante para a durabilidade das estruturas. Quanto menor o índice de vazios do concreto, maior a sua resistência, e maior será a proteção que o mesmo oferecerá a armadura, elevando sua durabilidade. A adição de metacaulim ao concreto vem se mostrando bastante eficaz na diminuição dos vazios e no aumento de resistência. O presente trabalho visa avaliar o benefício dessa adição em concretos submetidos a ambientes de alta agressividade como as estações de tratamento de esgoto e também em uma situação mais extrema em laboratório, com imersão parcial em solução contendo sulfato de sódio (Na_2SO_4), sendo o sulfato um produto utilizado em diversas indústrias sua presença é constante nas ETEs. Desse modo as amostras ficaram parcialmente submersas na ETE por um período de 120 dias, enquanto que no laboratório as mesmas foram expostas por 60 dias com ciclos de secagem e imersão. Os resultados obtidos nas duas situações foram desiguais, onde na ETE o concreto com adição de Metacaulim se mostrou mais eficiente, e durante a exposição do mesmo ao sulfato de sódio (Na_2SO_4) as reações internas com o sulfato ocasionaram uma queda significativa de resistência. Além dos ensaios de Compressão Axial, Tração por Compressão Diametral, Módulo de Elasticidade e Difração de Raios X, foram realizados ensaios de Medida de Potencial e Análise Metalográfica, a fim de averiguar a probabilidade de corrosão das barras de aço, porém devido ao curto tempo de pesquisa os resultados obtidos não demonstraram essa condição.

Palavras-Chave: Sulfato de sódio, Metacaulim, alta agressividade, ETE.

1 INTRODUÇÃO

A utilização do concreto como elemento estrutural é recorrente devido à facilidade de execução do mesmo, baixo custo e grande disponibilidade dos materiais que o compõe. Sendo o concreto um material que resiste pouco aos esforços de tração aos quais as estruturas são solicitadas, torna-se necessária a adição do aço formando o material conhecido como concreto armado. O aço é um material resistente, porém, possui alto índice de corrosão quando em contato com o ar

atmosférico, portanto o mesmo deve ser protegido pelo concreto para que não ocorra sua oxidação. Para tanto a norma NBR 6118:2014 determina os cobrimentos mínimos para a proteção das armaduras de acordo com a classe de agressividade do concreto.

A corrosão em estruturas de concreto armado é fato conhecido na área da engenharia, assim ao utiliza-lo em locais de grande agressividade ambiental, todos os cuidados devem ser tomados durante a sua execução e utilização, visando a maior durabilidade da estrutura. Segundo Vieira (2007, p.13) “As despesas econômicas e os riscos causados pela corrosão em uma visão global tornaram-se fator de grande importância a ser considerado, em grandes obras, já na fase de projeto.”.

Para análise da corrosão do concreto armado deve-se, primeiramente, tomar conhecimento do tipo de ataque que o mesmo está sendo submetido, pois existem diversos ambientes que se apresentam agressivos ao mesmo, desta forma conforme Rheinheimer e Khoe (2013, p.17) “entre as situações agressivas, a estrutura de concreto pode estar submetida ao ataque por sulfatos, que constitui um conjunto complexo de processos químicos e físicos causados por reações dos vários componentes do cimento com o sulfato.” Assim alguns ambientes estão mais suscetíveis aos ataques ácidos tais como: armazéns de fertilizantes, estações de tratamento de esgoto e de água, e indústrias químicas.

Fora o ambiente em que estão expostos, algumas características do concreto são determinantes para degradação das estruturas em concreto armado. Concretos com altos índices de vazios, por exemplo, estão mais predispostos à deterioração, uma vez que os vazios contribuem para a entrada de materiais corrosivos, podendo acarretar em um processo de carbonatação. O efeito da carbonatação é um exemplo de deterioração do concreto através dos poros. Segundo Werle (2012) o dióxido de carbono penetra nos poros do concreto e reage com o hidróxido de cálcio, formando carbonato de cálcio e água, que acompanhado pela redução da alcalinidade do concreto gera o efeito da carbonatação. Quando a carbonatação atravessa o revestimento das armaduras, as mesmas ficam despassivadas dando início ao processo de corrosão, sendo assim é vista a necessidade e importância da adição de materiais que tornem o concreto mais impermeável.

Segundo Santos (2012) através de ensaios em laboratórios, já está comprovado que o Metacaulim evita o surgimento de patologias no concreto, reduz sensivelmente o risco de corrosão de armaduras através do fechamento dos poros do concreto, bem como, é um material sustentável por não emitir gases tóxicos na atmosfera.

As estações de tratamento de esgoto são estruturas em concreto armado, que estão expostas a diversos agentes agressivos, logo, devem ser executadas, com materiais que atendam as suas necessidades e aumentem a durabilidade e a vida útil das mesmas, porém conforme Sena (2016) “o saneamento básico é uma das infraestruturas mais atrasadas no Brasil, apesar dos investimentos nos últimos anos, especialmente por parte do Governo Federal”. As estações de tratamento de esgoto não tem visibilidade quanto à criação de normas e investimento em pesquisas que visem o aumento da durabilidade dessas estruturas, já a sociedade espera que os investimentos em saneamento sejam duradouros. De acordo com Calixto et al (2007) cabe aos setores de engenharia garantir a máxima eficiência utilizando-se das melhores técnicas possíveis para evitar patologias e manutenções decorrentes de projetos falhos e obras mal executadas.

O sulfato de sódio é utilizado na fabricação de detergentes, bem como nas indústrias de vidro, celulose e têxtil, logo este produto é comumente descartado através do esgoto sanitário, sendo assim sua presença é constante nas estações de tratamento de esgoto.

Neste contexto, o objetivo da presente pesquisa é a análise do comportamento da adição de Metacaulim no concreto como agente auxiliar na diminuição da porosidade, e como consequência, na proteção das armaduras de concretos submetidos a ambientes de alta agressividade, como as estações de tratamento de esgoto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Traço do concreto

Visando um maior índice de porosidade, adotou-se uma resistência de 20 MPa para o concreto de referência, pois quanto menor a resistência do concreto (maior quantidade de água) maior será seu índice de vazios. O cimento utilizado foi o Portland CP II F 32, por ser o mais utilizado na região de Criciúma e por não possuir muitas adições. Os agregados foram areia média com diâmetro máximo de 4,75 mm e módulo de finura de 3,08, e brita 1 com diâmetro máximo de 19 mm. Os traços utilizados para a referência, e para o concreto com adição de Metacaulim podem ser observados na tabela 01.

Tabela 01: Composição das misturas

Nomenclatura	Traço (cimento:areia:brita:a/c:metacaulim:aditivo)
Referência	1:3,4:3,6:0,60:0,0:0,0
Com adição (10 % Metacaulim)	1:3,4:3,6:0,60:0,10:0,2

Fonte: do autor, 2016.

Foi realizada a adição de um aditivo hiperplastificante ao traço do concreto com adição de Metacaulim para que fosse mantida a relação a/c, e para que o material apresentasse trabalhabilidade adequada.

2.1.2 Metacaulim

O metacaulim é um produto derivado da calcinação de argilas cauliniticas. É constituído por compostos a base de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) em sua fase amorfa, sendo ele uma pozolana de alta reatividade, classificado segundo a ABNT NBR 12653:2014 como uma pozolana tipo N.

Este material vem sendo constantemente pesquisado no Brasil para utilização em concretos de cimento Portland, por conta de suas características físicas e químicas que auxiliam na melhora das propriedades mecânicas do concreto. Segundo a ABNT NBR 15894-1:2010 a interação física e química com o cimento modifica a reologia dos compósitos do concreto no estado fresco, e confere propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido.

A adição de metacaulim na matriz cimentícia faz com que o mesmo ocupe o lugar dos vazios, promovendo um refinamento dos poros.

Segundo ABNT NBR 15894-1 (2010, p. 10)

O Metacaulim também acelera o processo de hidratação do cimento Portland, atua como filler e reage com o Ca(OH)_2 proveniente da hidratação do cimento Portland, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Essas contribuições conferem aos compósitos concreto, argamassa e pasta propriedades especiais relacionadas a durabilidade e ao desempenho mecânico, quando comparadas as propriedades desses compósitos sem sua presença, tais como:

- Aumento da resistência à compressão e à flexão;
- Redução da porosidade e permeabilidade;
- Aumento da resistência a sulfatos;
- Resistência à difusibilidade de íons cloreto;
- Mitigação da reação álcali-agregado;
- Redução da ocorrência de eflorescência;
- Aumento da resistividade elétrica.

Segundo Rocha (2005) a produção de Metacaulim causa baixo impacto ambiental, pois, o beneficiamento do caulim gera areia quartzosa, que pode ser aproveitada e o processo de calcinação gera apenas vapor de água.

O material utilizado para a presente pesquisa foi o Metacaulim HP Ultra, produto comercial, dentro dos padrões exigidos pela ABNT NBR 15894-1:2010, fabricado pela empresa Metacaulim do Brasil. As características do material fornecidas pelo fabricante constam nas tabelas 02 e 03.

Tabela 02: Caracterização Química

Caracterização Química			
Propriedades Químicas	Valor	Propriedades Químicas	Valor
Dióxido de silício - SiO_2	50,0 % a 56,0 %	Alcalis Totais	< 1,5 %
Óxido de alumínio - Al_2O_3	35,0 % a 44,5 %	Óxido de Magnésio - MgO	< 0,1 %
Óxido de Ferro - Fe_2O_3	< 5,0 %	Sulfato - SO_3	< 0,1 %
Óxido de Cálcio - CaO	< 0,5 %	P.F.:	< 4,0 %

Fonte: Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ. Metacaulim do Brasil, 2011.

Tabela 03: Caracterização Física

Caracterização Física	
Propriedades	Fino
Massa específica	2,60g/cm ³
Massa unitária	600kg/m ³
Ph	5,0 a 6,5
Forma	Pó seco

Fonte: Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ. Metacaulim do Brasil, 2011.

De acordo com os resultados obtidos nas pesquisas realizadas por Mota et al.(2011) e Silva (2014) onde foram realizadas substituições de cimento por Metacaulim, até um determinado percentual de substituição o Metacaulim é vantajoso, cerca de 10% a 12 %. Em substituições superiores a 10 % o produto não se mostrou tão eficiente.

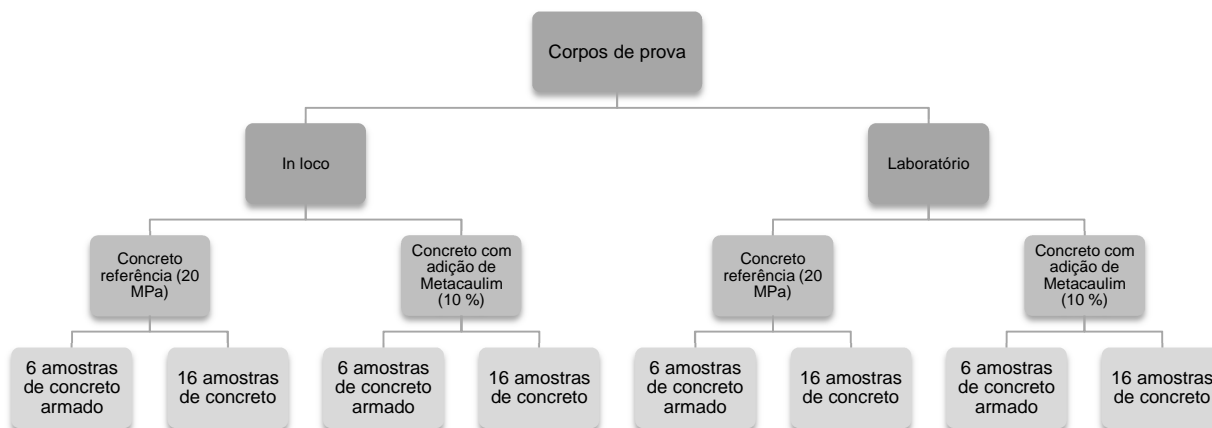
Para tanto como ainda não existem normas que definam o percentual adequado de adição de Metacaulim ao concreto, adotou-se um teor de 10 % de adição de metacaulim ao traço do concreto para efeito desta pesquisa.

2.2 METODOLOGIA

Foram moldados 64 corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm de concreto (diâmetro x altura), conforme preconiza a norma brasileira NBR 5738:2015. Também foram moldados 24 corpos de prova de concreto armado. As amostras foram submetidas a dois tipos de ambientes altamente agressivos, um em laboratório e outro *in situ* (figura 02 e 03). Sendo o ambiente de laboratório com um ciclo acelerado de secagem e imersão em solução contendo 200 mg/l de sulfato de sódio (Na_2SO_4) e em ambiente natural sendo escolhida a ETE – Estação de tratamento de Esgoto do Município de Criciúma localizada no bairro Santa Luzia, onde o concreto da estrutura está exposto a diversos agentes agressivos, sendo um deles o sulfato. A disposição das amostras pode ser observada na figura 01.

Assim sendo, para determinar as características físicas e mecânicas do concreto produzido com adição do metacaulim e submetidos a ambientes altamente agressivos, foram realizados ensaios de Resistência à Compressão Axial, Tração por Compressão Diametral, Difração de Raios X (DRX), ensaio de Medida de Potencial e verificação do Módulo de Elasticidade.

Figura 01- Organograma de disposição das amostras



Fonte: do autor, 2016.

Figura 02 e 03 – Ambiente de ataque.



Fonte: do autor, 2016.

2.2.1 Ensaio de Medida de potencial

A medida consiste na determinação da diferença de potencial elétrico entre a barra de aço e o eletrodo de referência, que se coloca em contato com a superfície do concreto, onde se consegue obter com aproximação a condição de um estado ativo de corrosão ou passivação da armadura. Entretanto com os valores obtidos através do ensaio não é possível obter a taxa de corrosão real da armadura, pois os resultados obtidos são qualitativos e não quantitativos, sendo utilizado então, com o intuito de avaliar a diferença entre um material de referência e um com adição de Metacaulim.

O equipamento utilizado é constituído de uma meia-célula de referência de cobre-sulfato de cobre, um voltímetro de alta impedância e cabos conectores, como pode ser observado na Figura 04.

Figura 02 - Equipamento de medida de potencial

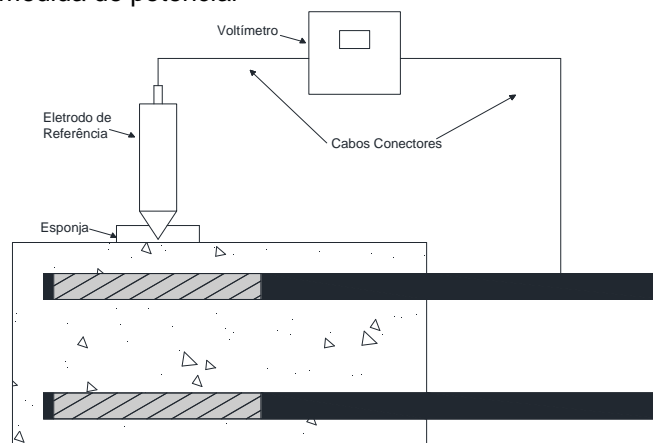


Fonte: do autor, 2016.

O ensaio consiste em conectar o voltímetro no eletrodo de referência sobrepondo-o sobre uma esponja umedecida posicionada na área de exposição da barra de aço dentro do corpo de prova de concreto, coloca-se também conectado ao voltímetro um cabo conector que liga o mesmo na barra de aço externa conforme é demonstrado na figura 05.

A magnitude dos potenciais, que são as medidas que estarão sendo apresentadas no leitor do voltímetro, são os valores que dão indício do risco de corrosão, sendo assim a norma ASTM 876C-15 determina as probabilidades de corrosão de acordo com os valores encontrados nos ensaios em campo, sendo os critérios de acordo com a tabela 04.

Figura 03 - Ensaio de medida de potencial



Fonte: do autor, 2016.

Tabela 04: Probabilidade de corrosão em função do potencial de corrosão segundo a ASTM 876C-15 2009

Ecorr (mV)	Probabilidade de corrosão
> -200	Menor que 10 %
entre -200 e -350	Incerta
< -350	Maior que 95 %

Fonte: ASTM 876C,2015.

2.2.1.1 Amostras para Medida de Potencial

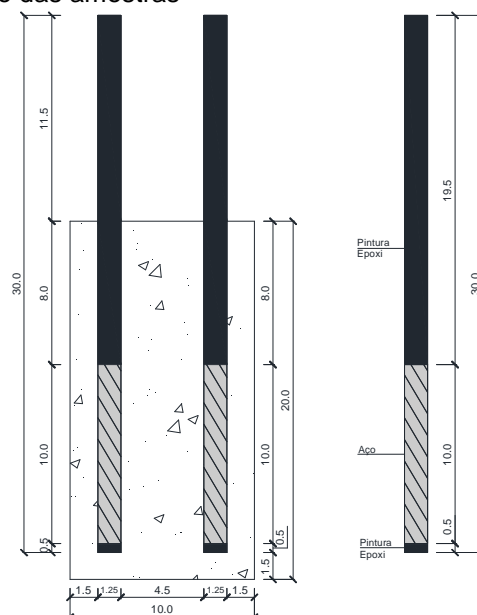
A geometria dos corpos de prova foi adotada visando obter resultados significativos durante as medições. Segundo Vieira (2010, p.56) “Não existem ainda normas que estabeleçam o formato de corpos de prova de concreto armado para ensaios de corrosão através de medidas de potencial”.

Os corpos de prova confeccionados para os ensaios possuem 10,0 cm de diâmetro e 20,0 cm de altura. O aço adotado foi de 12,5 mm de diâmetro e 30,0 cm de comprimento, porém foi deixado em exposição apenas 10,0 cm da barra de aço para que as medições fossem concentradas em um ponto específico, o restante da armadura foi protegido com duas camadas de tinta epóxi a base de alcatrão de hulha, conforme demonstrado na figura 06.

A NBR 6118:2014 determina que para ambientes de alta agressividade (agressividade IV), a relação água/cimento não deve ser superior a 0,45, o cobrimento mínimo das armaduras deve ser de 45,0 mm, e a classe de resistência mínima do concreto de 40 MPa.

Como esta pesquisa visa analisar a influência do Metacaulim na proteção de estruturas de concreto armado submetidas a ambientes de alta agressividade, foram adotadas medidas fora dos padrões definidos pela norma ABNT NBR 6118:2014, devido ao curto prazo para obtenção dos resultados desejados, e também adotando-se que se o material se mostrar eficiente para um cobrimento e uma resistência inferiores ao determinado em norma, quando na execução de uma estrutura os resultados deverão ser ainda melhores, sendo assim foi adotado um cobrimento de 1,50 cm de espessura e uma classe de resistência de 20 Mpa com o intuito de acelerar o processo corrosivo das amostras.

Figura 04 - Detalhe construtivo das amostras



Fonte: do autor, 2016.

2.2.1.2 Preparação das barras

As barras foram cortadas nas medidas especificadas e deu-se início ao processo de limpeza das mesmas visando à retirada de quaisquer materiais ou impurezas que pudessem de alguma forma interferir nos resultados da pesquisa.

O procedimento de limpeza foi realizado conforme prescreve a norma ASTM G1:1999, pois não existem normas brasileiras que definam os procedimentos necessários para a limpeza de barras. Os procedimentos de limpeza foram de imersão das barras em solução de ácido clorídrico e hexametilenotetramina por 10 minutos, lavagem em água corrente e escovação das barras para retirada das impurezas restantes, banho das barras em acetona e secagem final das barras com ar quente, respectivamente. Após a limpeza as barras foram pintadas com tinta epóxi a base de alcatrão de hulha.

2.2.2 Ensaios acelerados com sulfatos

Em vista do curto prazo para finalização da pesquisa, utilizou-se um ciclo acelerado de corrosão em laboratório, e como atualmente não existem normas que determinem o procedimento de ensaios acelerados com sulfatos em concreto armado, optou-se por se basear em pesquisas realizadas com ensaios acelerados com cloretos juntamente com a análise da norma brasileira NBR 13583:2014 que determina a variação dimensional das barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4).

Sendo assim o ciclo de secagem e imersão dos corpos de prova mantidos em laboratório deu-se com 7 dias de imersão em solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4), 4 dias de secagem em estufa a uma temperatura média de 100°C , 4 dias de imersão em solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4), leitura da medida de potencial no último dia de imersão, conforme demonstra a figura 07.

Figura 05 – Ciclo de ensaios acelerados de corrosão.



Fonte: do autor, 2016.

2.2.3 Ensaio em in situ

Os ensaios realizados na ETE foram feitos com intervalo análogo ao realizado em laboratório, seguiram a mesma linha descrita com célula de cobre-sulfato de cobre e a quantidade de amostras ensaiadas também foi a mesma.

Optou-se por esse ambiente, por ser de alta agressividade, e por não existirem pesquisas que visem uma solução para os problemas patológicos encontrados nas ETEs devido aos agentes causadores de deterioração. Segundo Calixto et al (2007, p.34) “A presença de agentes químicos agressivos em contato direto com o concreto e os ciclos de molhagem e secagem são exemplos de condições mais severas de exposição”.

Deve se considerar também que em campo existem diversos fatores capazes de retardar ou acelerar o processo corrosivo, pois as condições ambientais se modificam todos os dias.

2.2.4 Ensaio de Compressão Axial

Foram ensaiados três corpos de prova dentro dos parâmetros determinados pela norma brasileira ABNT NBR 12655:2015. Os ensaios foram realizados nas idades de 60 dias para as amostras do laboratório e 90 e 120 dias para as amostras dispostas na ETE.

2.2.5 Ensaio de Tração por Compressão Diametral

Os ensaios de tração por compressão diametral foram realizados com três amostras conforme determina à norma brasileira ABNT NBR 7222:2011. Os ensaios foram realizados nas idades de 60 dias para as amostras do laboratório e 90 e 120 dias para as amostras situadas na ETE. Os cálculos para obtenção da resistência a tração foram realizados conforme a norma já citada.

2.2.6 Ensaios de Módulo de Elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade visa relacionar a tensão aplicada a deformação instantânea obtida no corpo de prova. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 8522:2008.

2.2.7 Ensaios de Difração de Raios X

O ensaio de difração de raios X permite identificar sólidos cristalinos através dos picos gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral. Para os ensaios as amostras foram moídas e prensadas, e utilizou-se o equipamento LabX, modelo XRD 6100 para obtenção dos dados. O banco de dados utilizado foi o ICDD (Centro Internacional de Dados de Difração).

2.2.8 Ensaios de Metalografia

O ensaio de metalografia foi realizado em quatro amostras que estavam nos ambientes agressivos, onde as mesmas foram preparadas conforme preconiza a norma brasileira NBR 13284:1995 que determina o procedimento para preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. Para a obtenção das imagens foi utilizado o microscópio Olympus BX 41 led, e o software Olympus analySIS GetIT para captação de dados.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL

Embora o planejamento inicial previsse ensaiar os corpos de prova dispostos no laboratório nas idades de 90 e 120 dias, conforme realizado com as amostras dispostas na ETE, não foi possível a realização dos ensaios nas idades previstas, uma vez que as amostras expostas na solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) em laboratório se mostraram com alto nível de degradação e expansão conforme demonstra a figura 08. Em função desta situação foram realizados ensaios na idade de 60 dias de exposição.

Com o intuito de verificar a diferença entre as resistências das amostras com e sem adição de Metacaulim, foram fabricadas amostras para verificação da resistência inicial aos 28 dias, sem qualquer tipo de ataque. As amostras com adição de Metacaulim apresentaram resistência média de 33,60 Mpa, já as amostras de referência apresentaram resistência média de 27,10 MPa (figura 09), o que demonstra um aumento de resistência de 24 % das amostras de Metacaulim quando comparadas as amostras de referência, com análise de variância apresentando 95 % de intervalo de confiança de que as amostras são realmente diferentes.

Figura 06 – Corpos de prova expostos em solução de sulfato de sódio em laboratório na idade de 60 dias de exposição.

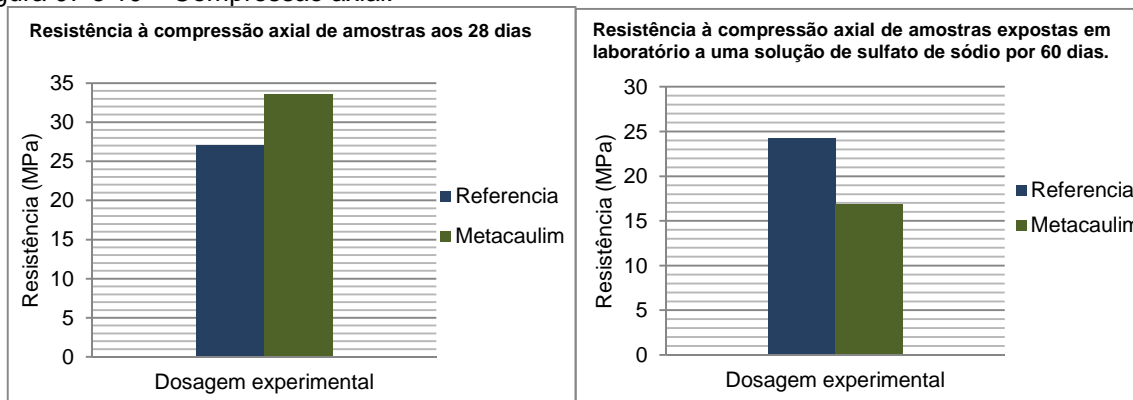


Fonte: do autor, 2016.

Nas amostras sob ataque em laboratório a média de resistência obtida no concreto referência foi de 24,25 MPa, enquanto o concreto com adição de Metacaulim apresentou uma resistência média de 16,78 MPa, conforme demonstra a figura 10. Assim os resultados obtidos demonstram que o concreto com adição de metacaulim apresentou uma perda de resistência de 45 % em comparação ao concreto referência quando exposto a solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4), para tanto foram

realizados ensaios de difração de Raios X a fim de verificar quais elementos foram formados nas reações químicas ocorridas entre o Metacaulim e o sulfato de sódio (Na_2SO_4). Averiguou-se através de análise estatística de variância (ANOVA) que o concreto com adição de metacaulim teve sua resistência diminuída de forma significativa com 95 % de intervalo de confiança.

Figura 07 e 10 – Compressão axial.

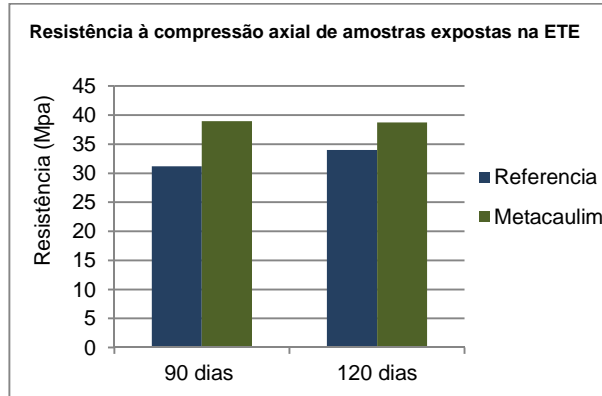


Fonte: do autor, 2016.

O comportamento do concreto exposto na ETE foi diferente ao exposto em laboratório. Em uma situação real, onde as concentrações médias de sulfatos totais foram de 32,11 mg/l, o concreto com adição de metacaulim se mostrou 25 % mais resistente conforme apresenta a figura 11.

Nos ensaios de compressão axial realizados aos 90 dias de exposição o concreto com adição de metacaulim apresentou resistência média de 38,97 MPa, já o concreto referência apresentou resistência média de 31,20 MPa, o que transpareceu aos 120 dias foi uma variação muito pequena nas resistências, onde o concreto com adição de metacaulim se manteve 14 % mais eficiente que o concreto referência. Verificando por análise estatística (ANOVA), em ambas as idades o concreto com adição de metacaulim se mostrou mais eficiente, de forma a apresentar 95 % de intervalo de confiança entre as amostras, demonstrando que as mesmas apresentam diferença significativa entre seus resultados.

Figura 8 – Compressão axial

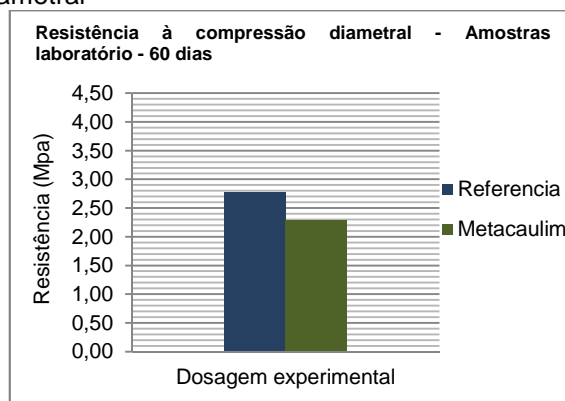


Fonte: do autor, 2016.

3.2 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Assim como na compressão axial o concreto com adição de metacaulim se mostrou 21 % menos eficiente (conforme exposto na figura 12) durante o período de exposição em laboratório, demonstrando a fragilidade no contato entre o Metacaulim e uma alta concentração de sulfato de sódio (Na_2SO_4). Analisando estatisticamente (através do método ANOVA) pode-se averiguar que com 95 % de intervalo de confiança, as amostras do concreto de referência se mostraram mais eficientes comparadas as com adição de metacaulim.

Figura 9 – Compressão diametral



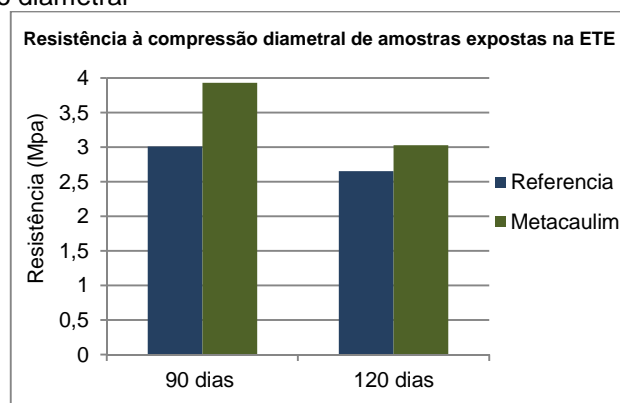
Fonte: do autor, 2016.

Na ETE na idade de 90 dias, conforme os dados apresentados na figura 13, a adição de metacaulim mostrou resultados mais satisfatórios que foram comprovados

na análise estatística de variância (ANOVA) que demonstrou 95 % de intervalo de confiança.

Na idade de 120 dias, a diferença que antes era de 30,6 % em ganho de resistência se comparado ao concreto de referência passou para 14,3 %. Sendo que a análise estatística de variância (ANOVA) demonstrou que as amostras são iguais, o que confirma que os resultados apresentados não apresentam diferença significativa entre os mesmos.

Figura 10 – Compressão diametral

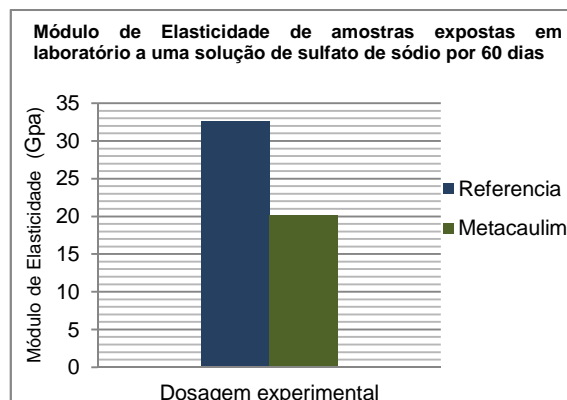


Fonte: do autor, 2016.

3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados obtidos para o Módulo de Elasticidade das amostras expostas na solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) em laboratório no período de 60 dias estão apresentados na figura 14. O comportamento das amostras de metacaulim foi mantido se relacionado aos ensaios de compressão axial e diametral, sendo seu módulo diminuído em cerca de 61,31 % em comparação ao concreto de referência e com base na análise estatística comprovou-se que com 95 % de significância as amostras são diferentes, o que demonstra a veracidade dos dados apresentados.

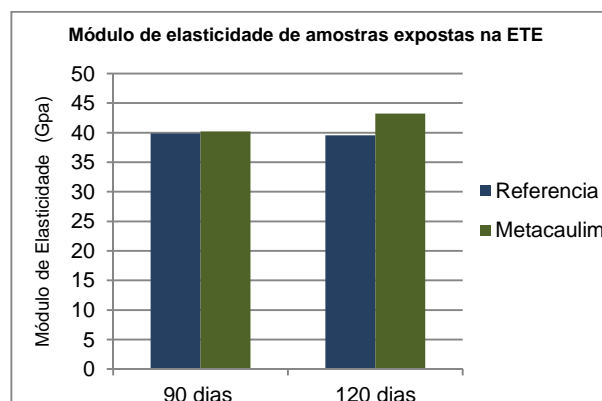
Figura 11 – Módulo de elasticidade



Fonte: do autor, 2016.

As amostras expostas na ETE mantiveram seu desempenho conforme os outros ensaios, onde o concreto com adição de metacaulim se mostrou mais eficiente, porém na idade de 90 dias essa diferença foi quase que imperceptível sendo o aumento em torno de 0,75 % em relação ao referênci. Aos 120 dias de exposição, se percebe um pequeno aumento no módulo de elasticidade do concreto com adição de metacaulim, cerca de 9,36 % quando comparado ao concreto referênci.

Figura 12 – Módulo de elasticidade



Fonte: do autor, 2016.

A análise de variância (ANOVA) das amostras de ambas as idades, identificou que não existe significância nas amostras, ou seja as mesmas são iguais, o que comprova que os resultados não possuem diferença significativa.

3.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Segundo Soares quando os sulfatos reagem com a matriz do cimento geram produtos expansivos, e podem gerar ainda compostos químicos prejudiciais ao concreto como Etringita, Gipsita e Taumasita sendo que a ultima ocorre apenas com certas condições de temperatura.

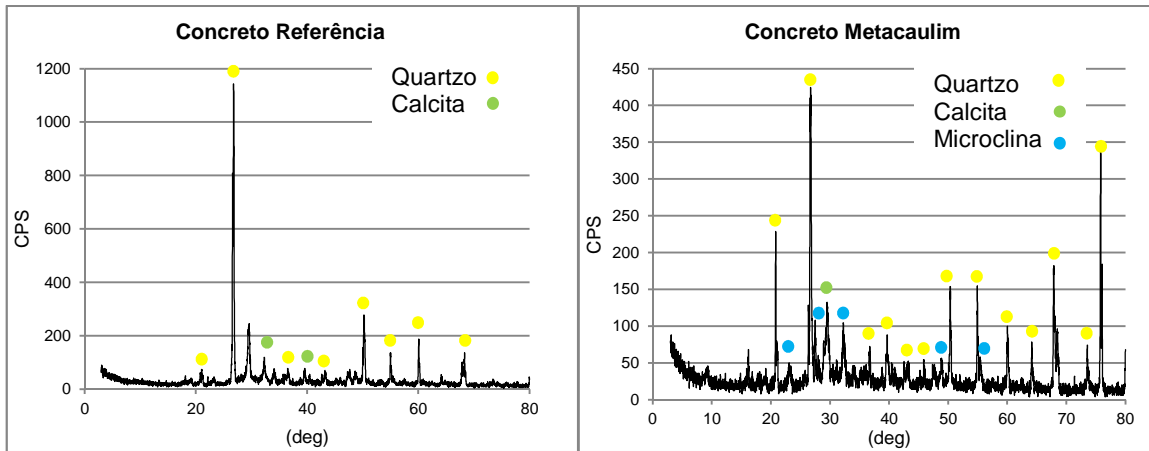
Nos ensaios de difração de Raios X foram identificadas nas amostras do concreto de referência exposto em laboratório (figura 16), e nos concretos expostos na ETE (figuras 18, 19, 20 e 21) a presença de quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], sendo estes elementos comuns ao concreto e que não representam dano ao mesmo.

Na amostra com adição de Metacaulim exposta em laboratório (figura 17) foi identificada a presença de feldspatos alcalinos (microclina - KAlSi_3O_8), que demonstra apenas a presença do metacaulim na amostra.

O que se pode observar é que mesmo com o alto grau de expansão apresentados nas amostras, não ocorreu a formação das fases causadoras de expansão, o que se pode explicar pelo fato do próprio sulfato de sódio (Na_2SO_4) ser o agente causador de expansão no corpo de prova. Segundo Souza (2006), os sais de sulfato em meio aquoso penetram no interior da estrutura por capilaridade, essa concentração pode ficar elevada com a evaporação da água, ocasionando a cristalização e conseqüentemente os sais passam a ocupar um maior volume causando expansão. Explicando-se assim o alto índice de expansão devido aos ciclos de molhagem e secagem utilizados para acelerar o processo corrosivo.

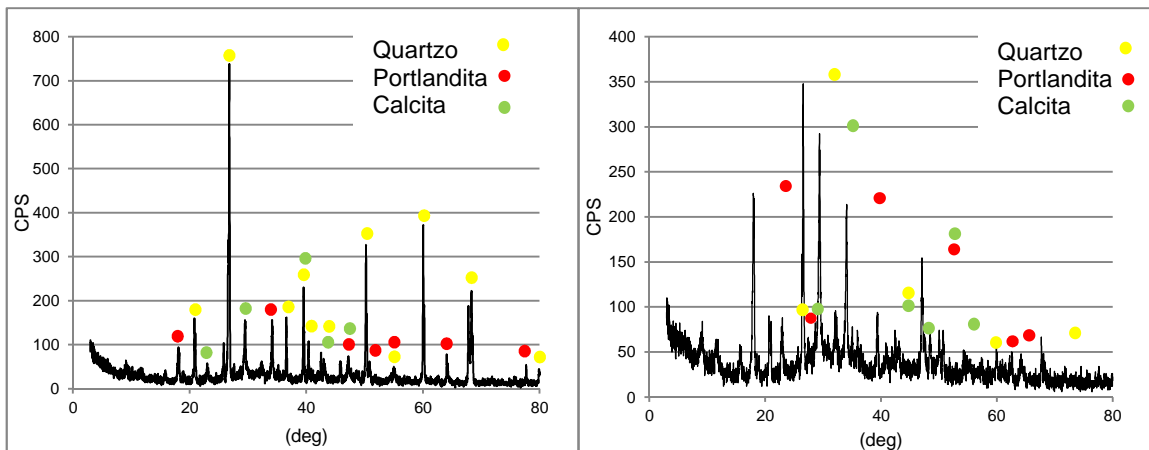
Segundo Souza (2013), os altos índices de alumina (Al_2O_3) presentes no metacaulim associados aos íons de sulfato em meio aquoso juntamente com a produção de CH oriunda da hidratação do cimento podem levar a um elevado grau de expansão, explicando a elevada deterioração dos corpos de prova com adição de metacaulim. Como ainda não existem pesquisas que correlacionem a adição de metacaulim ao concreto exposto a ambientes altamente agressivos (com altas concentrações de sulfato de sódio (Na_2SO_4)), não se tem dados para comparação dos resultados obtidos.

Figura 13 e 17– DRX Laboratório – 60 dias.



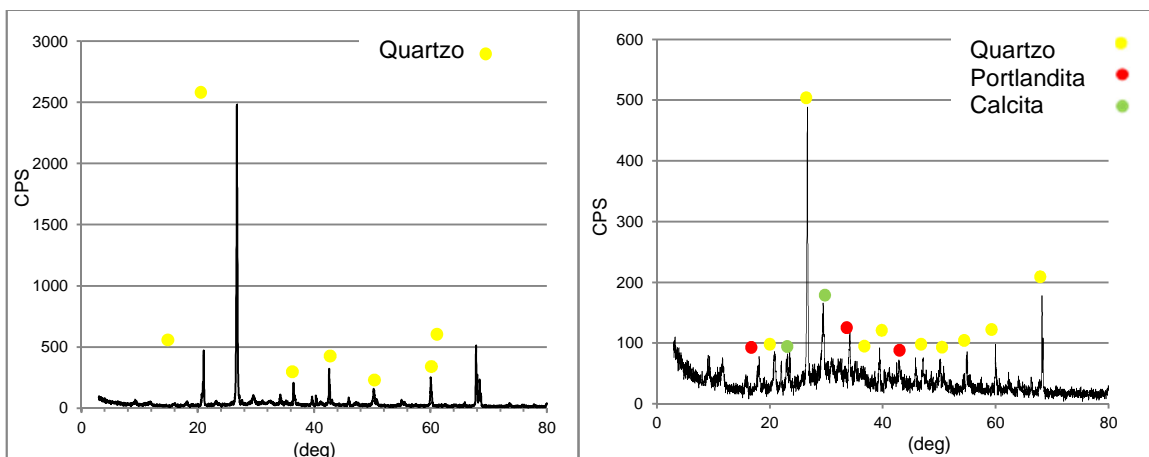
Fonte: do autor, 2016.

Figura 14 e 19– DRX Referência - ETE – 90 dias 120 dias.



Fonte: do autor, 2016.

Figura 15 e 21 – DRX Metacaulim - ETE – 90 dias e 120 dias.

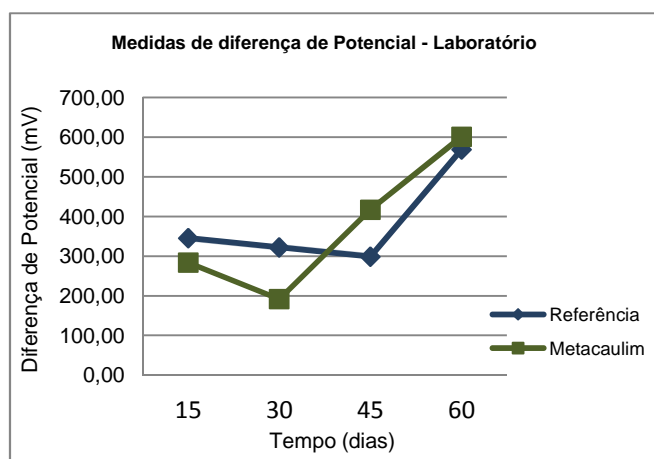


Fonte: do autor, 2016.

3.5 MEDIDA DE POTENCIAL

Os ensaios de medida de potencial realizados nas amostras expostas ao sulfato de sódio (Na_2SO_4) em laboratório estão apresentados na figura 22. Observa-se que no período de 30 dias de exposição onde o concreto permanecia em sua fase de hidratação, as amostras de referência apresentaram medidas 40,5 % superiores as elaboradas com adição de metacaulim. Contudo as amostras sofreram grande expansão e degradação a partir dos 45 dias de exposição, logo não se pode afirmar que as medidas de potencial encontradas após esse período sejam consideradas, pois podem ser provenientes das reações que ocorreram nos corpos de prova.

Figura 16 – Medida de Potencial



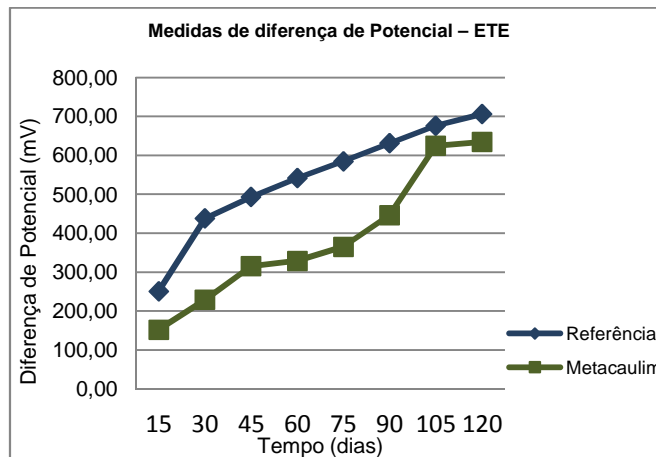
Fonte: do autor, 2016.

Cabe ressaltar que as medidas encontradas não demonstram a ocorrência de corrosão nas amostras durante os ensaios (de acordo com a tabela 04). Este efeito pode ser explicado pelo curto tempo de ensaio e pelo fato do sulfato de sódio (Na_2SO_4) ter gerado grande ataque a matriz cimentícia dos corpos de prova, não permitindo que o aço fosse atacado. Torna-se importante destacar que os ensaios foram adiantados devido ao nível de deterioração das amostras, conforme já explanado nesta pesquisa. Os resultados obtidos por Vieira (2007) demonstram que o ataque por cloretos é menos prejudicial à matriz cimentícia, porém favorece a corrosão das armaduras, já os resultados obtidos nessa pesquisa demonstram que os sulfatos geram maior agressividade na pasta de cimento do concreto.

Os potenciais de corrosão extraídos na ETE estão apresentados na figura 23 e puderam ser seguidos conforme o planejado.

Pode-se perceber que as amostras com adição de metacaulim se mantiveram durante todo o ensaio com medidas inferiores as amostras de referência, porém por ser um concreto consideravelmente novo, as medidas obtidas podem ser originárias das reações internas de cura que ainda estão ocorrendo em ambas às amostras, pois as mesmas não demonstram a ocorrência de corrosão durante os ensaios (de acordo com a tabela 04).

Figura 17 – Medida de Potencial



Fonte: do autor, 2016.

De acordo com a análise de variância (ANOVA), as amostras não apresentam diferença significativa, logo pode se afirmar com 95 % de precisão que as amostras são consideradas iguais estatisticamente.

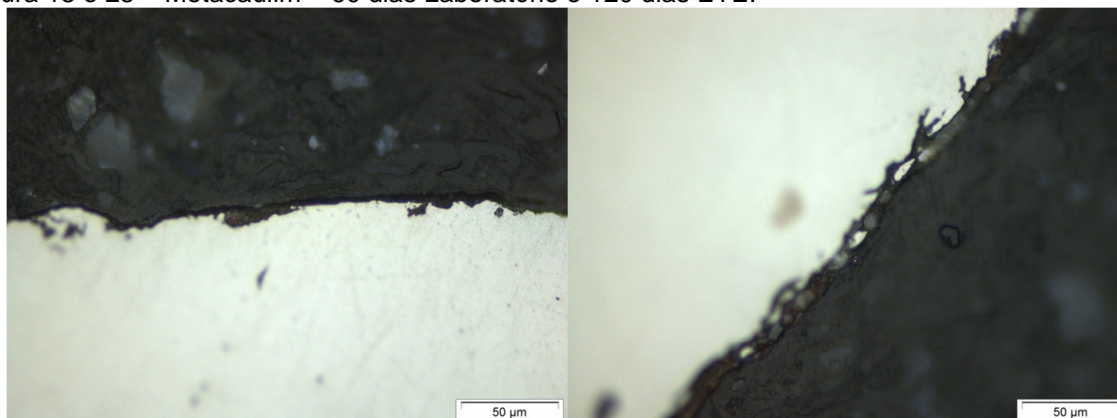
Salienta-se também que na ETE o lodo presente no efluente, pode influenciar na proteção dos poros, pois cria uma película grossa e densa, porém essa proteção não ocorre em toda a estrutura visto que o lodo permanece em contato parcial com a mesma, ou seja, em algumas áreas as estruturas podem estar mais comprometidas que outras.

3.6 ENSAIOS DE METALOGRAFIA

A microscopia foi realizada com aumento de 500x que demonstrou que não ocorreu corrosão nas barras de aço, conforme apresentam às figuras 24, 25, 26 e 27 as

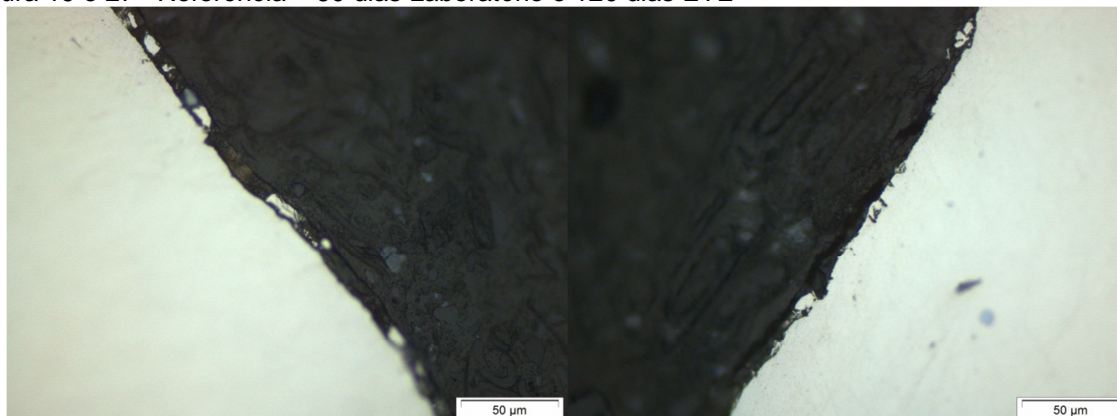
barras sofreram uma corrosão insignificante que não pode ser associada às situações de agressividade visto que podem ter ocorrido pelo simples contato das barras com o ar atmosférico.

Figura 18 e 25 – Metacaulim – 60 dias Laboratório e 120 dias ETE.



Fonte: do autor, 2016.

Figura 19 e 27– Referência – 60 dias Laboratório e 120 dias ETE



Fonte: do autor, 2016.

4. CONCLUSÕES

O intuito da pesquisa foi o de avaliar a influência da adição da pozolana Metacaulim em concretos submetidos a ambientes com altos índices de agressividade, utilizando uma situação real (ETE) e uma situação extrema (laboratório), onde os ensaios foram acelerados com ciclos de molhagem e secagem. Dessa forma foi possível evidenciar o comportamento dos corpos de prova diante de ambas as situações. Visto isso evidenciou-se que:

- A metodologia utilizada para acelerar o processo de ataque aos corpos de prova com uma concentração de sulfato de sódio (Na_2SO_4) elevada não foi eficiente para esta pesquisa, pois, não foi possível avaliar a probabilidade de corrosão das armaduras através da análise de medida de potencial, pois o mesmo atacou fortemente a matriz cimentícia deteriorando o concreto de tal forma que as barras de aço não puderam ser atingidas, e assim as medidas obtidas não se tornaram significativas à pesquisa;
- Verificou-se que a adição de metacaulim ao concreto, é capaz de melhorar suas características mecânicas, mesmo em situações de alta agressividade, porém, deve-se analisar a alta expansão do material, pois o metacaulim em contato com o sulfato de sódio (Na_2SO_4) em alta concentração gerou grande expansão dos corpos de prova o que demonstra que esse material não é adequado para ambientes com altos índices de sulfatos, e deve-se ser repensada a ideia de que o mesmo é resistente a sulfatos.

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar o comportamento do metacaulim em idades maiores que 120 dias;
- Utilizar diferentes concentrações de sulfato de sódio (Na_2SO_4) em laboratório, com diferentes percentuais de Metacaulim adicionado ao concreto;
- Adições com materiais menos reativos com sulfatos podem ser mais interessantes como, por exemplo, adição de sílica ativa ao traço do concreto.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), **S Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete1: C876-15**. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), **Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens: G1/1999**. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13284**: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica - Procedimento. Rio de Janeiro, 1995. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13583**: Cimento Portland — Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014. 14 p.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 256 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2014. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.

CALIXTO, José et al. **Estruturas de concreto para obras de saneamento: a necessidade de normalização específica**. Obras de concreto para o saneamento ambiental: cuidando do meio ambiente e da saúde pública, ano XXXIV, nº 47, 32-34, jul./ago./set. 2007.

MOTA, João et al. **Concretos Adicionados com Metacaulim como agente de mitigação da RAA**. In Congresso brasileiro do concreto, 53, 2011, Florianópolis. **Anais do 53º congresso brasileiro do concreto**. IBRACON. Nov. 2011.

RHEINHEIMER, Bianca; KHOE, Sarah. **Ataque por sulfatos em estações de tratamento de efluentes**. 2013. 110f. Tese (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/Paraná. 2013.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Belo Horizonte, 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

SANTOS, Altair. Aliado do cimento Metacaulim expande mercado no Brasil. 05 de Setembro de 2012. <<http://www.cimentoitambe.com.br/aliado-do-cimento-metacaulim-expande-mercado-no-brasil/>> Acesso em 12 abr. 2016.

SENA, Jéssyca. **Déficit em saneamento básico no Brasil**. 2016. Instituto trata brasil. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/deficit-em-saneamento-basico-no-brasil>>. Acesso em: 17 agost. 2016.

SILVA, Emasiel. **Adição da pozolana metacaulim ao concreto na região de Caruaru – PE**. 2014. 32f. Tese (Graduação) - Centro universitário do vale do Ipojuca, Caruaru/Pernambuco. 2014.

SOARES, Mario. **As formas de degradação direta nas estruturas de Concreto Armado**. Disponível em: <<http://www.secovi-ce.com.br/index.php/noticias/1843-as-formas-de-degradacao-direta-nas-estruturas-de-concreto-armado-.html>>. Acesso em: 14 out. 2016.

SOUZA, Diego. **Capacidade de adições minerais em mitigar o grau de deterioração de estruturas de concreto frente ao ataque por sulfatos**. 2013. 130f. Tese (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/Paraná. 2013.

SOUZA, Rui. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado**. 2006. 131f. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo/São Paulo. 2006.

VIEIRA, Daniel. **Análise do desempenho de aditivos inibidores de corrosão em concreto armado**. 2007. 119f. Tese (Graduação) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma/Santa Catarina. 2007.

WERLE, Aldo. **Carbonatação do Concreto - Fenolftaleína** . 2012. Disponível em:<<http://aldowerle.blogspot.com.br/2012/09/carbonatacao-do-concreto-fenolftaleina.html>> Acesso em 07 out. 2016.