

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ÁGUA DE AMASSAMENTO CONTAMINADA POR ELEMENTOS QUÍMICOS ORIUNDOS DE MINERAÇÃO DE CARVÃO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Gabriel da Rosa Gonçalves (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2).

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
(1) [gabrielrg@outlook.com](mailto:gabrielrg@outlook.com) (2) [dss@unesc.net](mailto:dss@unesc.net)

## RESUMO

O concreto de cimento Portland é produzido a partir da mistura de cimento, areia, brita e água, podendo ter ou não o acréscimo de aditivos. Tendo em vista a importância da água para o concreto, substâncias prejudiciais presentes na água de amassamento em teores acima do que a NBR 15900:2009 estabelece, podem interferir nas propriedades do concreto. O presente estudo tem como objetivo determinar a influência da água de amassamento contaminada por elementos químicos oriundos de mineração de carvão nas propriedades macro e microestruturais do concreto produzido com cimento Portland CP IV-32. Para isso, foram executadas 48 amostras de concreto com água de amassamento contaminada por resíduos de mineração de carvão e outras 48 amostras para referência utilizando água de amassamento potável. Foi realizada a dosagem dos materiais para a mistura, concretagem dos corpos de prova e posteriormente teste de determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone, ensaios de Resistência à Compressão Axial, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo Elástico de Elasticidade à Compressão e Difração de Raios-X. Em relação aos corpos de prova de referência, o concreto produzido com água contaminada apresentou diferença de 40 mm no teste de Abatimento de Tronco de Cone e nos testes de Resistência nas idades analisadas apresentou diferença máxima de 15,07 %. Quanto à composição química, as amostras apresentaram os mesmos minerais no teste de Difração de Raios-X aos 150 dias.

*Palavras-Chave: Água de amassamento. Ataque por Sulfato. Propriedades do Concreto.*

## 1. INTRODUÇÃO

Ao mesmo tempo em que o setor de minas de carvão gerou muitos empregos e foi o responsável pelo crescimento da economia da região e da cidade, também trouxe impactos negativos para os recursos hídricos da região sul de Santa Catarina, principalmente para a cidade de Criciúma, poluindo o solo, rios e nascentes devido à falta de cuidado no depósito de rejeitos.

Até o final da década de 1990, o estéril ou rejeito era, na maioria dos casos, depositado a céu aberto em áreas próximas aos locais de mineração ou beneficiamento do carvão. Com isso, uma área de aproximadamente 6.400 hectares foi impactada. (Campos et. al., 2010)

A poluição dos recursos hídricos e do solo se dá devido ao fato de o rejeito do carvão ser composto basicamente de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) que, quando em contato com oxigênio e água, libera no meio ambiente um efluente caracterizado por metais pesados e “por baixos valores de pH – que podem ser inferiores a 3,5 –, altas concentrações de sulfato – podendo chegar a 2000 mg L”, (Mello et. al., 2014). O maior problema ocorre quando este material é drenado para o corpo hídrico, sendo este processo chamado de Drenagem Ácida de Mina (DAM).

No ponto de vista da construção civil, a água de amassamento, utilizada para fazer a mistura do cimento com os agregados para formação do concreto, não pode apresentar pH menor que 5,0 (água ácida) e teor de sulfato superior a 2000 mg/L, segundo consta na NBR 15900-1:2009.

Responsável pelas reações de endurecimento do concreto devido à hidratação do mesmo, permitindo a ligação entre os componentes do concreto e fornecendo plasticidade na mistura, a água chega a representar 20 % do volume do concreto. Considerando que a quantidade de água no concreto é significativa, substâncias prejudiciais presentes na água em teores acima do que a norma estabelece, acabam resultando no concreto simples, alteração do tempo de pega, diminuição de resistência, aparecimento de manchas e ocorrência da eflorescência (CIMENTO.ORG, 2010).

A água de amassamento é um fator que interfere diretamente na qualidade do concreto, seja na própria composição ou na relação água/cimento. A relação água/cimento é um fator que influencia na suscetibilidade do concreto ao ingresso de agentes externos, pois interferem na porosidade, permeabilidade e capacidade de absorção. (Helene, 1999)

Entre as substâncias presentes em abundância na água contaminada, tem-se o sulfato, sendo que sua reação no concreto é chamada de “Ataque por Sulfato”. Em resumo ao que foi apresentado por Lapa (2008), ataque por sulfato são reações químicas no interior do concreto que o fazem expandir. Inicialmente essa expansão pode não causar danos ao concreto, porém, o aumento das tensões internas pode gerar fissuras, aumentando sua permeabilidade e fazendo com que diminua a sua resistência.

Segundo a Portland Cement Association (2002), o sulfato pode atacar o concreto ao reagir com compostos hidratados do concreto endurecido. Essas reações podem

gerar uma pressão suficiente para afetar a pasta do cimento, resultando em perda de coesão e resistência. O sulfato de cálcio ( $\text{SO}_4$ ) ataca o aluminato de cálcio hidratado formando a Etringita, já o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) reage com o hidróxido de cálcio e forma Etringita e Gipsita.

A partir do exposto, o presente trabalho visa analisar a influência da utilização da água contaminada pelo rejeito de carvão como água de amassamento para concreto produzido com cimento CP IV-32, analisando as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do concreto em idades de até 150 dias, tendo como referência as recomendações da NBR 15900:2009.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 MATERIAIS**

Os materiais utilizados para concretagem dos corpos de prova, exceto a água contaminada, foram fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil do Iparque, sendo utilizado o cimento Portland tipo CP IV-32, marca Votoran da linha “Todas as obras”. Como agregado graúdo foi utilizado a brita nº 1 de malha 24 mm e, como agregado miúdo, a areia média lavada sem umidade.

#### **2.1.1 ÁGUA DE AMASSAMENTO**

Como o estudo busca comparar um mesmo traço de concreto com duas amostras de água, não houve alteração na composição do mesmo, utilizando-se 15,23 litros de água para cada mistura, sendo que a primeira mistura foi composta por água potável proveniente de abastecimento público e a segunda mistura composta por água contaminada por pirita, retirada da bacia de decantação de uma mineradora de carvão de Forquilha/SC, conforme mostra a Figura 1 (a).

Realizando a análise preliminar como cita a NBR 15900-3:2009, a diferença entre as amostras de água se evidencia na coloração e no odor, onde a água contaminada por pirita possui coloração amarelada devido à existência de resíduos de minério, vide Figura 1 (b), possuindo um forte odor.

Figura 1: Ponto de coleta da água contaminada (a) e diferença de coloração entre as amostras de água (b).



Fonte: do autor.

Para caracterização das amostras de água, os testes foram realizados no LAQUA – Laboratório de Análises Químicas e Ambientais, localizado no Centro Tecnológico SATC, tendo como foco da caracterização os componentes químicos estabelecidos pela NBR 15900-1:2009, que trata de água para amassamento do concreto. A referida norma estabelece requisitos para utilização da água na composição do concreto, tais como teores máximos para componentes químicos, exibidos na Tabela 1, e determina também que o pH seja igual ou superior a 5,0.

Tabela 1: Caracterização das amostras de água.

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ÁGUA				
ANÁLISE	NORMA	POTÁVEL	CONTAMINADA	UNIDADE
Alcalinidade Total	1500,00	5,10	0,00	mg/L
Chumbo Dissolvido	100,00	0,00	0,01	mg/L
Cloretos	4500,00	8,40	10,00	mg/L
Nitrato	500,00	4,10	45,50	mg/L
pH	5,00	6,30	<b>2,90</b>	--
Sulfatos	2000,00	0,00	<b>6120,00</b>	mg/L
Zinco Dissolvido	100,00	0,02	19,75	mg/L

Fonte: do autor.

Em análise à caracterização das amostras, observa-se que dois parâmetros ultrapassaram os limites estabelecidos por norma, sendo eles o teor de sulfatos e o pH, como pode ser visto na Tabela 2. A NBR 12655:2006 cita no item 5.2.2.3 que concretos expostos a soluções contendo sulfatos devem ser preparados com cimento resistente a sulfatos para atender o que estabelece a Tabela 2.

Tabela 2: Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) presente no solo % em massa	Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) presente na água ppm	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal*	Mínimo fck (para concreto com agregado normal e leve) Mpa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	-	-
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,5	35
Severa***	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

\* Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessários para obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão de armadura ou proteção à processos de congelamento ou degelo

\*\* Água do mar

\*\*\* Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: ABNT NBR 12655:2006

Os corpos de prova de concreto do presente trabalho não ficaram expostos a uma solução presente em ambiente externo como a NBR 12655:2006 se refere na Tabela 2, porém, a quantidade de sulfato é superior a 1500 mg/L e assim pode-se considerar que a amostra se encontra em condição de exposição severa. A norma indica que para esta condição seja utilizado um fck mínimo de 40 MPa e relação a/c máxima de 0,45.

### 2.1.2 CIMENTO E AGREGADOS

Conforme pode ser visto na Tabela 3, para que houvesse maior quantidade de água e conseqüentemente uma alta concentração de sulfato no interior da amostra de concreto, optou-se por utilizar um traço para fck de aproximadamente 25 MPa aos 28 dias e relação a/c de 0,56, ou seja, exceder a máxima relação a/c de 0,45 e o fck mínimo de 40 MPa que foram estipulados pela NBR 12655:2006.

Tabela 3: Composição do concreto.

TRAÇO EM MASSA (1:m)	TIPO DE MISTURA	TRAÇO UNITÁRIO (c:a:b)	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	BRITA (kg)	(a/c)
1:6,5	REFERÊNCIA	1:3,12:3,38	27	84,24	91,26	0,56
	CONTAMINADO		27	84,24	91,26	0,56

Fonte: do autor.

Para que a quantidade de materiais fosse exatamente a quantificada na Tabela 3, realizou-se a pesagem com a balança de precisão do Laboratório de Materiais de Construção Civil do Iparque, sendo realizada a tara dos recipientes antes da

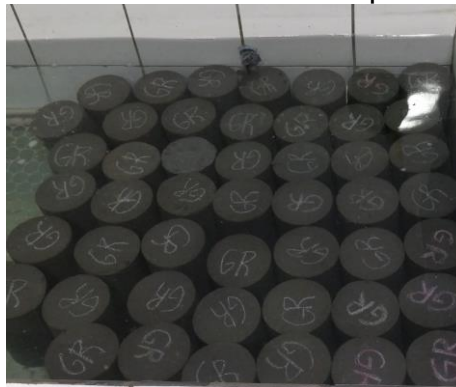


pesagem dos materiais. A quantidade utilizada de material para a mistura produziu cerca de 0,15 m<sup>3</sup> de concreto.

## 2.2 MÉTODOS

Ao todo foram produzidos 96 corpos de prova, seguindo os padrões estabelecidos pela NBR 5738:2015, sendo 48 corpos de prova referência, os quais foram produzidos utilizando água potável como água de amassamento, e 48 chamados de contaminados devido ao uso da água obtida na bacia de decantação de uma mineradora de carvão de Criciúma. As fôrmas utilizadas para moldagem dos corpos de prova eram no formato cilíndrico de dimensões 100x200 mm. A produção das amostras ocorreu nos dias 19 e 20 de maio de 2016, sendo mantidas saturadas em um tanque com água (Figura 2) após a desmoldagem até a idade de 28 dias.

Figura 2: Corpos de prova armazenados no tanque.



Fonte: do autor.

Visando determinar as propriedades mecânicas do concreto e as propriedades do concreto no estado fresco, realizaram-se os ensaios de Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone (NBR NM 67:1998), Resistência à Compressão Axial (NBR 5739:2007), Resistência à Tração por Compressão Diametral (NBR 7222:2011) e Módulo Elástico de Elasticidade a Compressão (NBR 8522:2008), nas idades de 28, 90, 120 e 150 dias. Para caracterização da microestrutura, foi realizado o ensaio de Difração de Raios X aos 150 dias.

### 2.2.1 DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE

As propriedades do concreto no estado fresco foram avaliadas por meio do ensaio de Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone (NBR NM

67:1998), que visa medir a consistência e a fluidez do material, permitindo que se controle a uniformidade do concreto.

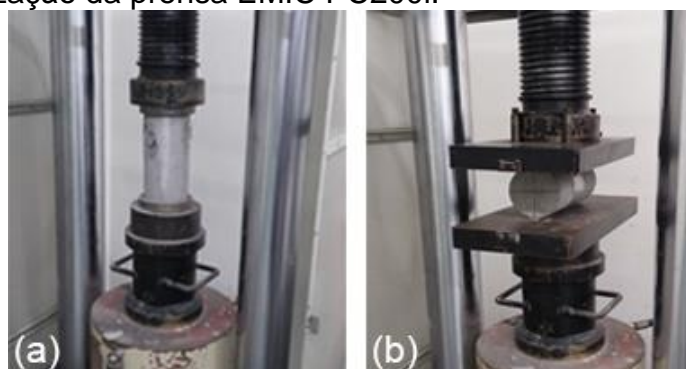
Foi definido, para a concretagem com água potável, o abatimento de  $100 \pm 20$  mm, ficando estabelecida, pelo abatimento, a quantidade de água a ser utilizada na segunda concretagem, tendo em vista que o propósito do estudo é utilizar a mesma quantidade dos componentes do concreto em ambas concretagens.

## 2.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para a determinação da Resistência à Compressão Axial e Resistência à Tração por Compressão Diametral, utilizou-se a prensa servo-hidráulica da marca EMIC, modelo PC200i, que possui capacidade máxima de 200 ton (2MN). Para ambos os testes a prensa aplica uma carga gradual e o software da EMIC compõe o diagrama de Tensão x Tempo à medida que a carga vai sendo aplicada e, ao final, gera o relatório com as informações retiradas do teste. Para cada idade de ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral foram ensaiados três corpos de provas que seguiram, respectivamente, o que determinam as normas NBR 5739:2007 e NBR 7222:2011.

A Figura 3 mostra o modo de utilização da prensa no teste de resistência à compressão axial (a), que é aplicada a força perpendicularmente ao eixo horizontal do corpo de prova e, no teste de resistência à tração por compressão diametral (b), aplicando-se a força perpendicularmente ao eixo vertical.

Figura 3: Utilização da prensa EMIC PC200i.



Fonte: do autor.

A resistência à compressão ( $f_c$ ) é definida pela equação estabelecida na NBR 5739:2007, a qual é representada na Equação (1).

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:  $f_c$  é a resistência à compressão, em megapascals (MPa);

$F$  é a força máxima alcançada, em newtons (N);

$D$  é o diâmetro do corpo de prova, expresso, em milímetros (mm);

Para que se obtenha os valores de resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) é necessário a utilização da equação estabelecida pela NBR 7222:2010, a qual é representada na Equação (2).

$$f_{ct,sp} = \frac{2 F}{\pi d l} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:  $f_{ct,sp}$  é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (MPa);

$F$  é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

$d$  é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

$l$  é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

### 2.2.3 MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO

Utilizou-se a prensa servo-hidráulica e microprocessada para o ensaio de módulo estático de elasticidade a compressão, da marca EMIC, modelo PC200CS, de capacidade máxima para 200 ton (2MN).

Segundo a NBR 8522:2008, para que se possa realizar o cálculo do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) em GPa, é necessária a aplicação de uma tensão de aproximadamente 30 % da resistência à compressão do concreto ( $\sigma_b$ ) obtida no teste de compressão axial de amostras de uma mesma concretagem e com mesma idade. Durante o teste, mantém-se o nível de tensão por aproximadamente 60 segundos. Para o cálculo do módulo de elasticidade, utiliza-se a Equação (3).

$$E_{ci} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} 10^{-3} = \frac{(\sigma_b - \sigma_a)}{(\varepsilon_b - \varepsilon_a)} 10^{-3} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:  $\sigma_b$  é a tensão maior, em MPa ( $\sigma_b = 0,3f_c$ );

$\sigma_a$  é a tensão básica, em MPa ( $\sigma_a = 0,5$  MPa);

$\varepsilon_b$  é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica;



Equipando um extensômetro na prensa e acoplado-o ao corpo de prova de concreto, como pode ser visto na Figura 4, é possível realizar a determinação de módulo tangente inicial e módulo secante por meio do software TESC-EMIC e gerar o relatório e o diagrama tensão-deformação. O ensaio seguiu o que determina a NBR 8522:2008, sendo que o extensômetro faz a medição da deformação localizada no ensaio e, posteriormente é realizado o cálculo do módulo de elasticidade por meio da Equação 2, apresentada anteriormente.

Figura 4: Extensômetro acoplado ao corpo de prova.



Fonte: do autor.

## 2.2.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Para caracterização da microestrutura dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de difração de raios X (DRX) aos 150 dias, o qual visa entregar um relatório com a composição química da amostra de concreto, informando quais reações químicas se formaram e se podem influenciar nas características do concreto.

O ensaio de difração de raios X foi executado no laboratório CECAM, pertencente ao Iparque, sendo utilizado o equipamento da marca Shimadzu, modelo LabX XRD-6100, conforme pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Shimadzu LabX XRD-6100.



Fonte: do autor.

Segundo Cesário (2014), “O ensaio de difração de raios X (DRX) permite identificar sólidos cristalinos, através dos picos gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral”.

## 2.2.5 ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE TUKEY

Para realizar a análise estatística dos resultados obtidos em todas as idades e verificar se os resultados possuem diferença significativa, foi utilizado o software MS Excel para a Análise de Variância (ANOVA) e o software Past para o teste Tukey. A ANOVA foi realizada entre três corpos de prova de referência e três corpos de prova contaminados em cada idade, sendo que para o Excel é necessário habilitar a ferramenta de análise de dados no qual são inseridas as resistências de cada corpo de prova analisado por idade, exibindo o resultado da forma exposta na Figura 6.

Figura 6: Modo de exibição dos resultados da ANOVA.

Anova: fator único						
RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Coluna 1	3	83,957415580	27,985805193	0,311907132		
Coluna 2	3	88,477415964	29,492471988	0,312123284		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,405067245	1	3,405067245	10,913145133	0,029835287	7,708647422
Dentro dos grupos	1,248060831	4	0,312015208			
Total	4,653128076	5			<0,05, é significativo	

Fonte: do autor.

Para interpretar os resultados exibidos na Figura 6, é necessário saber que para a diferença entre os dados inseridos ser considerada significativa o “valor-P” deve ser inferior a 0,05 e o valor de “F” deve ser superior ao “F crítico”, conforme exibido na Figura 6, a análise utilizada como exemplo resultou em uma diferença significativa entre os dados inseridos para seis corpos de prova de uma mesma idade, sendo três referências e três contaminados. Para confirmação da existência de uma diferença significativa, faz-se uso do software Past, o qual analisa os mesmos dados inseridos para a ANOVA e traz como resultados o que está exposto na Figura 7.

Figura 7: Interface software Past.

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p(same)
Between groups:	3,40507	1	3,40507	10,91	0,02984
Within groups:	1,24806	4	0,312015		
<b>Total:</b>	<b>4,65313</b>	<b>5</b>			
omega^2:	0,623				

Levene's test for homogeneity of variance, based on means: p(same) = 0,9561  
Based on medians: p(same) = 0,9802

Welch F test in the case of unequal variances: F=10,91, df=4, p=0,02984

Residuals

Tukey's pairwise comparisons:  
Q \ p(same)

	A	B
A		0,03002
B	4,672	

Fonte: do autor.

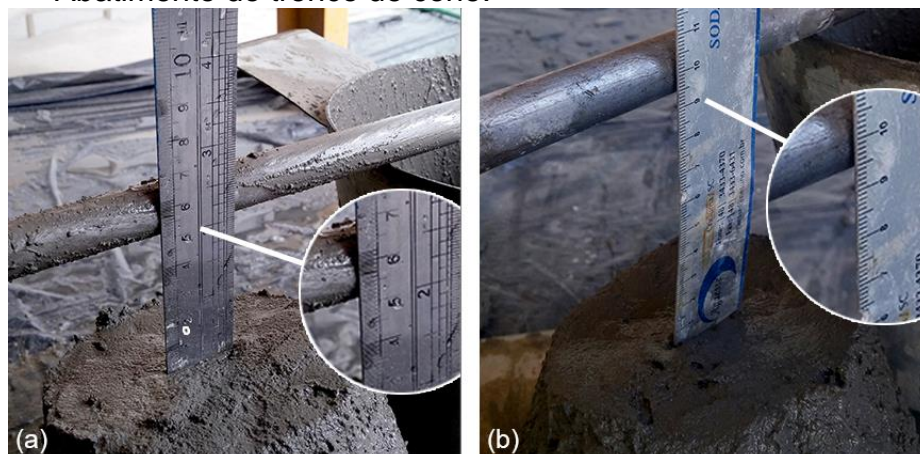
O teste Tukey executado no software Past exibe seus resultados na forma exposta na Figura 7 e, caso algum resultado da planilha exibida na parte inferior da figura apareça realçado em vermelho, a análise dos dados apresenta diferença significativa, o que comprova o resultado obtido com a ANOVA.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE

Para realizar a comparação entre a amostra referência e a amostra contaminada, manteve-se a mesma proporção de materiais para ambas, assim como a mesma relação água cimento. Durante a concretagem foi realizado o teste de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone como mostra a Figura 8.

Figura 8: Abatimento do tronco de cone.



Fonte: do autor.

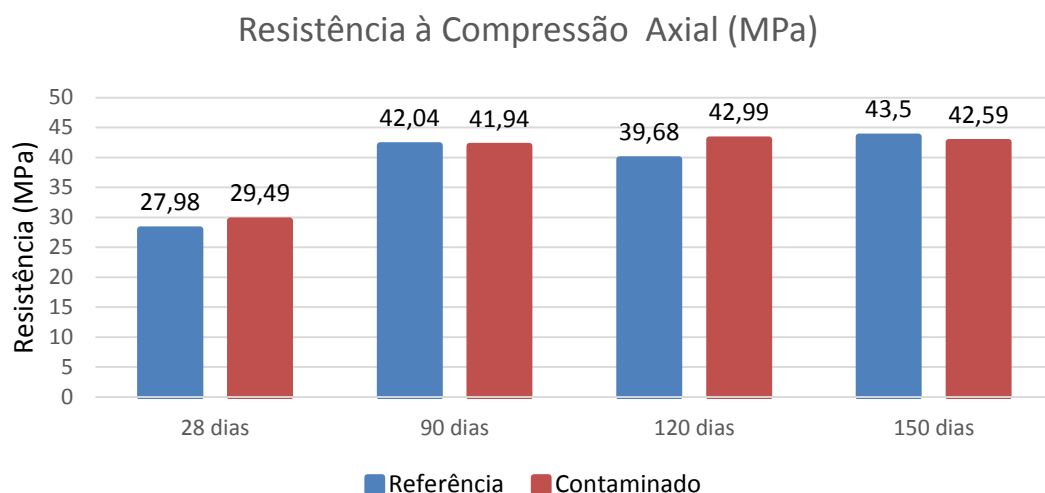
A Figura 8 mostra os resultados obtidos no teste de abatimento de tronco de cone, sendo representada a amostra contaminada (a), com um abatimento de aproximadamente 50 mm e a amostra referência (b) com um abatimento de aproximadamente 90 mm.

A diferença entre o abatimento das amostras pode ser explicada pelo fato de que a água contaminada possui resíduos de mineração de carvão em sua composição, devido ao fato de que a quantidade de água de cada mistura é determinada por peso, na água contaminada o peso não era apenas da água por si só e sim de toda a sua composição (água + resíduos) e, por haver sólidos em sua composição, os mesmos podem ter influenciado na mistura do concreto, deixando-o mais consistente.

### 3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados obtidos nas quatro idades no teste de Resistência à Compressão Axial encontram-se representados na Figura 9, sendo que a variação em percentual entre as amostras para cada idade analisada pode ser observada na Tabela 4.

Figura 9: Valores obtidos no teste de resistência à compressão axial.



Fonte: do autor.

Tabela 4: Desvio padrão e variação em percentual para o teste de resistência à compressão axial.

Idade	Amostra	MPa (média)	Desvio Padrão	Varição em % com relação ao CP Referência
28 dias	Referência	27,98	0,55	-
	Contaminado	29,49	0,56	5,40
90 dias	Referência	42,04	2,42	-
	Contaminado	41,94	1,14	-0,24
120 dias	Referência	39,68	1,46	-
	Contaminado	42,99	1,41	8,34
150 dias	Referência	43,50	1,05	-
	Contaminado	42,59	1,07	-2,09

Fonte: do autor.

Comparando-se as resistências à compressão axial dos corpos de prova contaminados com as resistências obtidas na referência exibidas na Figura 9, nota-se a inexistência de um padrão, porém, como pode ser observado aos 28 e 120 dias, a amostra contaminada apresentou uma resistência entre 5,40 e 8,34 % superior em relação à referência nas mesmas idades, sendo estas diferenças estatisticamente significativas. Para tal afirmação, foi necessária a realização da Análise de Variância (ANOVA) e do Teste de comparação de médias (Teste de Tukey) e os resultados do teste estão exibidos na Figura 10.

Figura 10: Resultados teste Tukey para Compressão Axial.

28 DIAS			90 DIAS		
	A	B		A	B
A		0,03002	A		0,9489
B	4,672		B	0,09672	
120 DIAS			150 DIAS		
	A	B		A	B
A		0,04819	A		0,3554
B	3,983		B	1,477	

Fonte: do autor.

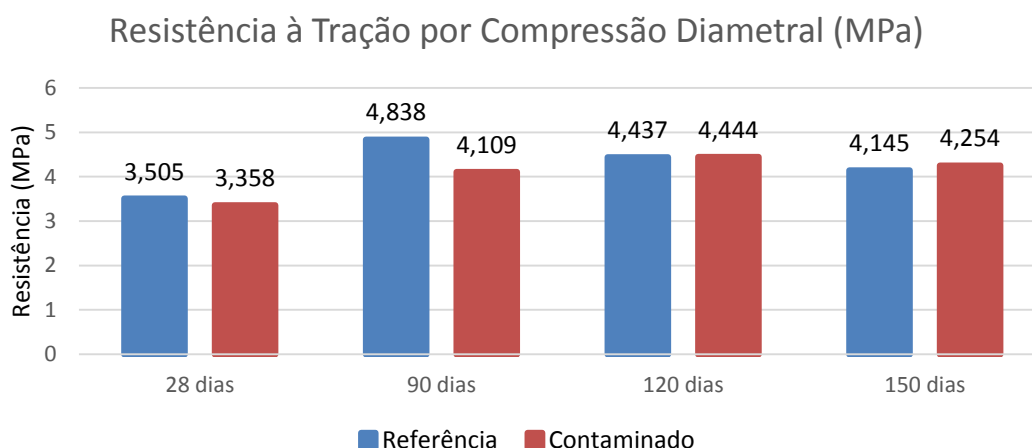
Nas idades de 90 e 150 dias a amostra referência apresentou uma resistência superior, sendo 42,04 MPa aos 90 dias e 43,50 MPa aos 150 dias, frente aos 41,94 MPa e 42,59 MPa da amostra referências respectivamente nas mesmas idades. O maior desvio padrão obtido durante os testes entre amostras em uma mesma idade foi de 2,42 MPa.



### 3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os valores obtidos nas quatro idades no teste de Resistência à Tração por Compressão Diametral estão exibidos na Figura 11 e na Tabela 5, os quais também não mantiveram um padrão ao longo das idades.

Figura 11: Valores obtidos no teste de resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: do autor.

Tabela 5: Desvio padrão e variação em percentual para o teste de resistência à tração por compressão diametral.

Idade	Amostra	MPa (média)	Desvio Padrão	Varição em % com relação ao CP Referência
28 dias	Referência	3,505	0,17	-
	Contaminado	3,358	0,10	-4,19
90 dias	Referência	4,838	0,11	-
	Contaminado	4,109	0,63	-15,07
120 dias	Referência	4,437	0,70	-
	Contaminado	4,444	0,80	0,16
150 dias	Referência	4,145	0,14	-
	Contaminado	4,254	0,35	2,61

Fonte: do autor.

Aos 28 e 90 dias, as amostras contaminadas apresentaram uma resistência até 15,07 % inferior às amostras de referência e, a partir de 120 dias, as amostras contaminadas apresentaram resistências superiores às amostras de referência em

até 2,61 %, sendo que o teste aos 120 dias o desvio padrão foi de 0,80 MPa, sendo o maior obtido entre todas as idades.

Mesmo com as diferenças citadas e os dados expostos anteriormente, mediante a Análise de Variância (ANOVA) e o Teste de comparação de médias (Teste de Tukey), as diferenças entre as amostras em cada idade não foram significativas, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12: Resultados teste Tukey para Tração por Compressão Diametral.

28 DIAS			90 DIAS		
	A	B		A	B
A		0,27	A		0,1245
B	1,81		B	2,744	

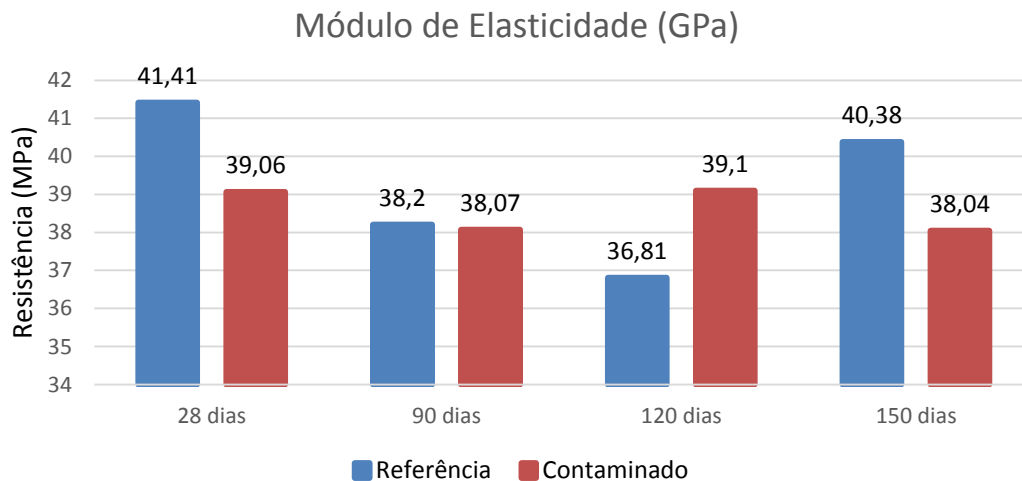
120 DIAS			150 DIAS		
	A	B		A	B
A		0,9911	A		0,6524
B	0,01696		B	0,6877	

Fonte: do autor.

### 3.4 MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE À COMPRESSÃO

As variações dos resultados obtidos no módulo estático de elasticidade à compressão também não ocorreram de forma uniforme e os mesmos encontram-se apresentados na Figura 13.

Figura 13: Valores obtidos no teste de módulo estático de elasticidade a compressão.



Fonte: do autor.

Mediante os valores apresentados na Figura 13 e que também se encontram exibidos na Tabela 6 a seguir, a amostra contaminada apresentou uma variação de 5,79 % inferior a 6,22 % superior às amostras de referência, se mostrando superior apenas aos 120 dias. O maior desvio padrão entre amostras de uma mesma idade foi de 3,74 GPa para as amostras de referência analisadas aos 150 dias.

Tabela 6: Desvio padrão e variação em percentual para o teste de módulo estático de elasticidade a compressão.

Idade	Amostra	GPa (média)	Desvio Padrão	Varição em % com relação ao CP Referência
28 dias	Referência	41,41	1,19	-
	Contaminado	39,06	1,20	-5,67
90 dias	Referência	38,2	2,45	-
	Contaminado	38,07	1,21	-0,34
120 dias	Referência	36,81	2,41	-
	Contaminado	39,1	2,54	6,22
150 dias	Referência	40,38	3,74	-
	Contaminado	38,04	3,26	-5,79

Fonte: do autor.

Após analisar os resultados e executar a Análise ANOVA e o teste Tukey, foi verificado que não existe diferença significativa entre os resultados encontrados nas amostras ao longo das quatro idades e, o resultado do teste Tukey encontra-se ilustrado na Figura 14.

Figura 14: Resultados teste Tukey para o teste de módulo estático de elasticidade a compressão.

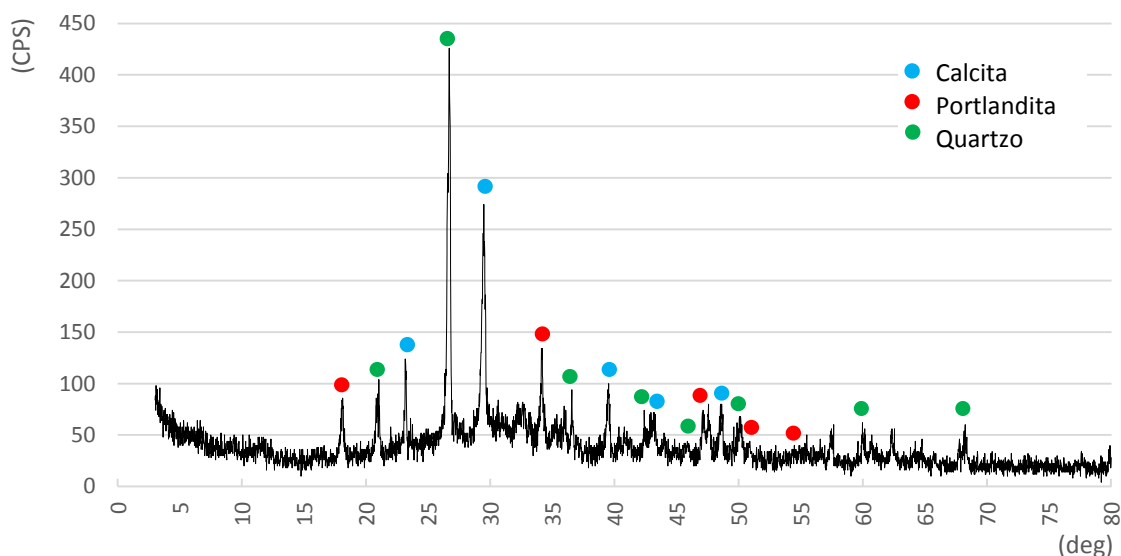
28 DIAS			90 DIAS		
	A	B		A	B
A		0,07696	A		0,9406
B	3,353		B	0,1124	
120 DIAS			150 DIAS		
	A	B		A	B
A		0,3217	A		0,4584
B	1,599		B	1,16	

Fonte: do autor.

### 3.5 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Segundo a Cement Concrete & Aggregates Australia (2011), a deterioração do concreto ocorre devido à reação química do sulfato com a matriz do cimento, podendo resultar na formação de Etringita e Gipsita. A Figura 15 ilustra os resultados obtidos no ensaio de Difração de Raios-X da amostra referência.

Figura 15: Composição química da amostra referência aos 150 dias.

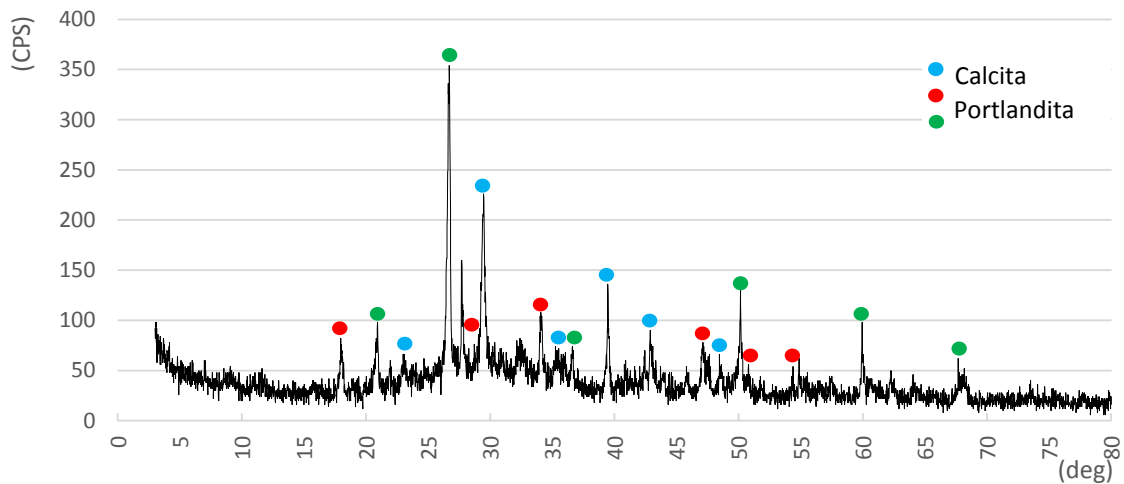


Fonte: CECAM, 2016.

A análise através da Difração de Raios-X da amostra referência aos 150 dias, exibida na Figura 15, conforme era de se esperar, apresentou apenas a formação de elementos comuns do concreto, como a Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), o Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e a Portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]. A Calcita, conhecida como calcário, é utilizada na produção do cimento, adicionada junto ao clínquer e outros materiais dependendo do tipo de cimento. O Quartzo é uma forma cristalina da sílica, um dos óxidos mais abundantes na crosta terrestre, e se encontra presente no clínquer, que é a matéria prima dos cimentos Portland. Segundo Souza (2007) “A Portlandita é o principal responsável pela alta alcalinidade e é liberada em farta quantidade quando da hidratação do cimento Portland (...)”.

Os mesmos elementos encontrados na análise da amostra referência foram encontrados na amostra contaminada, conforme pode ser visto na análise de DRX da amostra contaminada aos 150 dias exibida na Figura 16.

Figura 16: Composição química da amostra contaminada aos 150 dias.



Fonte: CECAM, 2016.

As reações químicas, Etringita e Gipsita, que eram esperadas para um concreto produzido com água de amassamento contaminada com altos teores de sulfato não foram encontradas na análise realizada aos 150 dias. Os elementos encontrados na análise de DRX não influenciam negativamente na resistência do concreto, pois, como já foi dito anteriormente, são elementos comumente encontrados na composição do mesmo. A não formação de Etringita e Gipsita pode ser explicada devido à utilização do cimento Portland CP IV que possui adição de pozolana em até 40 % e segundo a PINI (2008) “Seu uso é muito mais vantajoso em obras que ficarão expostas à ação de água corrente e em ambientes agressivos”.

#### 4. CONCLUSÕES

Em relação aos corpos de prova de referência, o concreto produzido com água contaminada apresentou diferença de 40 mm no teste de abatimento de tronco de cone, o que leva a conclusão de que a presença de sólidos na água contaminada influenciou no resultado obtido no teste.

Nos testes de resistência, as únicas diferenças significativas foram no ensaio de Resistência à Compressão Axial aos 28 e 120 dias, apresentando a amostra contaminada superior em 5,40 e 8,37 % em relação à amostra referência.

Analisando a composição química, as amostras de referência e as contaminadas apresentaram os mesmos minerais no teste de Difração de Raios-X aos 150 dias, sendo que os minerais encontrados são comuns de serem encontrados no concreto e não apresentam risco ao mesmo.



Com os resultados obtidos, pode-se concluir que concretos feitos com Cimento Portland CP IV-32 se comportam bem, até a idade de 150 dias, em relação aos agentes agressivos encontrados na água de amassamento, principalmente por se tratar de 4120 mg/L de sulfato acima da quantidade especificada pela NBR 15900-1:2009 e por conter um pH de 2,90 que é considerado muito ácido.

## 5. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilização de Cimento Portland CP II.

Realizar o estudo com idades superiores a 150 dias por meio de aceleração de envelhecimento do concreto.

Manter os corpos de prova concretados com água contaminada em um tanque com a mesma água utilizada na concretagem para realizar a cura de 28 dias.

Realizar o estudo inserindo barras de aço no interior da amostra de concreto.

Analisar a microestrutura do concreto com a utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Água para Amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos:** NBR 15900: 2009. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Água para Amassamento do concreto – Parte 2: Coleta de amostra de ensaios:** NBR 15900: 2009. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Água para Amassamento do concreto – Parte 3: Avaliação preliminar:** NBR 15900: 2009. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Água para Amassamento do concreto – Parte 7: Análise química, determinação de sulfato solúvel em água:** NBR 15900: 2009. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland pozolânico** NBR 5736: 1991. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone:** NBR NM 67: 1998. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**: NBR 5739: 2007. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**: NBR 5738: 2015. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. **Technical Note: Sulfate-resisting Concrete**. 2011. Disponível em: <[http://www.ccaa.com.au/imis\\_prod/documents/Library Documents/CCAA Datasheets/TN68Sulfate.pdf](http://www.ccaa.com.au/imis_prod/documents/Library_Datasheets/TN68Sulfate.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2016.

CIMENTO.ORG. Efeito da qualidade da água no concreto. 2010. Disponível em: <<http://cimento.org/efeito-da-qualidade-da-agua-no-concreto/>>. Acesso em: 05 de setembro de 2016.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Vida útil das estruturas de concreto**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, Gramado, 1999.

LAPA, José Silva. **PATOLOGIA, RECUPERAÇÃO E REPARO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO**. 2008. 56 f. Monografia - Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MELLO, Jaime Wilson Vargas de; DUARTE, Hélio Anderson; LADEIRA, Ana Cláudia Queiroz. **Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina**. CADERNOS TEMÁTICOS DE QUÍMICA NOVA NA ESCOLA. Nº 8, p. 24-29, 2014.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Types and Causes of Concrete Deterioration**. 2002. Disponível em: <[http://www.cement.org/docs/default-source/fc\\_concrete\\_technology/durability/is536-types-and-causes-of-concrete-deterioration.pdf?sfvrsn=4](http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/durability/is536-types-and-causes-of-concrete-deterioration.pdf?sfvrsn=4)>. Acesso em: 12 out. 2016.

SOUZA, Fabiana Lovatto de. **PROPRIEDADES DE CONCRETOS PRODUZIDOS PELA SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR REJEITOS DE USINAS CONCRETEIRAS**. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2007.

SUPRIMINERIOS (São Paulo). Suprimerios. **Calcita**. 2010. Disponível em: <<http://suprimerios.com.br/product/calcita/>>. Acesso em: 01 nov. 2016.