

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS  
*CAMPUS POÇOS DE CALDAS*

**LUIZ GUILHERME FERREIRA SILVA BERNARDES**

**ESTABILIZAÇÃO *IN LOCO* DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE URÂNIO EM  
MATRIZ CIMENTÍCIA**

Poços de Caldas

2023

**LUIZ GUILHERME FERREIRA SILVA BERNARDES**

**ESTABILIZAÇÃO *IN LOCO* DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE URÂNIO EM  
MATRIZ CIMENTÍCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) *campus* Poços de Caldas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Materiais e Compósitos Cerâmicos. Exemplar apresentado na defesa.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carolina Del Roveri

Coorientador: Dr. Alexandre Pereira de Oliveira

Poços de Caldas

2023

Bernardes, Luiz Guilherme Ferreira Silva.

Estabilização in loco de rejeito de mineração de urânio em matriz cimentícia / Luiz Guilherme Ferreira Silva Bernardes. - Poços de Caldas, MG, 2023.

78 f. : il. -

Orientador(a): Carolina Del Roveri.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Drenagem ácida de mina. 2. Tratamento de águas ácidas. 3. DUCA. 4. Cimento Portland. 5. Imobilização de resíduos. I. Del Roveri, Carolina, orient. II. Título.

LUIZ GUILHERME FERREIRA SILVA BERNARDES

“ESTABILIZAÇÃO IN LOCO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE URÂNIO EM MATRIZ CIMENTÍCIA ”

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 23 de fevereiro de 2023.

Profa. Dra. Carolina Del Roveri  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Diego Henrique de Almeida  
Instituição: : Universidade Federal de Rondônia

Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Carolina Del Roveri, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2023, às 16:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sylma Carvalho Maestrelli, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2023, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **DIEGO HENRIQUE DE ALMEIDA, Usuário Externo**, em 23/02/2023, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0907789** e o código CRC **34FCA4E8**.

*Dedico este trabalho à todas as pessoas que são vetores para minha motivação, principalmente à minha mãe e à minha namorada.*

*A todos que sempre torceram e estiveram ao meu lado.*

*À educação, ferramenta preponderante e essencial ao mundo e à sociedade.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por garantir minha saúde e bem-estar para que eu pudesse concluir mais este objetivo em minha trajetória.

À minha orientadora Professora Doutora Carolina Del Roveri pelo acompanhamento que vem de alguns anos, por todo o auxílio prestado, pela supervisão e pela orientação neste trabalho. Agradeço também pela colaboração, confiança e incentivo, fatores que com certeza foram imprescindíveis para que eu conseguisse chegar até aqui.

Ao meu coorientador Doutor Alexandre Pereira de Oliveira por toda disposição e suporte prestados, me auxiliando sempre que necessário.

À Universidade Federal de Alfenas – *campus* Poços de Caldas, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e a todo corpo de funcionários, que possibilitaram realização deste projeto.

Às Indústrias Nucleares do Brasil – Unidade Caldas pela disponibilização dos materiais necessários para o andar deste projeto.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear – Laboratório de Poços de Caldas pela solicitude e disponibilização das instalações e aos servidores Flavio, Henrique e Rodrigo por toda disposição e auxílio.

À Ouro Mix por toda disponibilidade e suporte nos ensaios realizados.

À minha família, em especial à minha mãe, irmão, padrasto e avós (que não se encontram mais presentes neste plano), que sempre estiveram junto a mim, me dando a força, o apoio e a motivação necessária para continuar trilhando o caminho que tracei.

À minha namorada, Larissa, companheira essencial durante esta jornada. Sempre presente, me encorajando, me motivando a ser uma pessoa melhor e me confortando em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

Aos amigos que sempre estão comigo me fornecendo suporte nos momentos árduos e compartilhando comigo, minhas vitórias.

Ao Serviço de Assistência Estudantil da Universidade Federal de Alfenas e à psicóloga Rosana Elizete Tavares pelo apoio e acompanhamento psicológico em um momento delicado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

*“Cause love's such an old fashioned word  
And love dares you to care for  
The people on the edge of the night  
And love dares you to change our way of  
Caring about ourselves”  
(Under Pressure – Queen)*

## RESUMO

A Unidade em Descomissionamento de Caldas das Indústrias Nucleares Brasileiras (UDC-Caldas) apresenta um forte motivo para preocupação ambiental devido ao fenômeno de drenagem ácida de mina (DAM) ocorrente. A DAM é um processo químico em que minerais sulfetados são submetidos à ação de água e oxigênio, sendo assim oxidados e conseqüentemente produzindo uma solução ácida que danifica solos e sistemas aquáticos. Contudo, o problema citado possui um agravante, pois a solução produzida apresenta caráter radioativo e isso deve-se ao fato de que o resíduo exposto à ação de DAM, é configurado como rejeito de minério de urânio. Atualmente a única ação mitigatória utilizada na instalação é o tratamento de águas ácidas com cal hidratada visando a precipitação dos contaminantes. Todavia, essa neutralização resulta em um outro problema que é a formação do composto residual conhecido por DUCA (diuranato de cálcio contendo hidróxidos metálicos). Esse resíduo aponta perigo para a solução de mitigação de DAM pois além de contaminar solos e águas, também pode ressolubilizar os contaminantes já precipitados durante o tratamento de águas ácidas. Portanto, um recurso para este problema é a imobilização e estabilização desse resíduo em cimento *Portland*, proposta a qual o presente trabalho visa estudar. Essa solução tem como objetivo a redução do potencial de contaminação, realizando a redução de mobilidade, solubilidade e toxicidade dos resíduos. Isso pode ser atingido quando o resíduo é encapsulado em uma matriz que apresenta alta integridade estrutural. Assim, este estudo tem como objetivo principal a determinação de uma formulação viável utilizando cimento *Portland*, água da lagoa ácida, DUCA e aditivo superplastificante, que imobilize mecanicamente o resíduo. Além da avaliação da resistência mecânica à compressão e ressolubilização dos contaminantes por meio de ensaios de lixiviação. Então, foram confeccionados 6 corpos de prova para 4 composições que se distinguem em relação às proporções dos componentes. Os corpos de prova foram submetidos à cura submersa por um período de 14 dias e em seguida, à ensaio de compressão de acordo com a norma ABNT-NBR 5739. Os ensaios de lixiviação, por sua vez, seguiram a norma ABNT-NBR 10005. A menor resistência mecânica média apresentada entre as formulações foi de  $6,41 \pm 0,43$ MPa, enquanto a maior foi de  $8,98 \pm 0,74$ MPa. Nos ensaios de lixiviação, o resíduo puro apresentou  $5,33 \pm 0,33$ mg/L de urânio e o melhor resultado obtido foi de  $0,0127 \pm 0,0016$ mg/L de urânio lixiviado, dessa maneira estando abaixo dos limites permitidos. Portanto, pode-se dizer que o cimento *Portland* se apresenta como alternativa viável para o problema descrito.

**Palavras-chave:** drenagem ácida de mina; tratamento de águas ácidas; DUCA; cimento *Portland*; imobilização de resíduos.

## ABSTRACT

The Decommissioning Unit of Caldas from Indústrias Nucleares Brasileiras (DUC-Caldas) shows a strong reason for environmental concern due to the phenomenon of acid mine drainage (AMD) that occurs. AMD is a chemical process in which sulphide minerals are subjected to the action of water and oxygen, being oxidized and consequently producing an acidic solution that damages soils and aquatic systems. However, the problem mentioned has an aggravating factor, because the solution produced has a radioactive character and this is due to the fact that the residue exposed to the action of AMD is configured as uranium ore waste. Currently, the only mitigation action used in the installation is the treatment of acidic water with hydrated lime, aiming at the precipitation of contaminants. However, this neutralization results in another problem which is the formation of the residual compound known as CADU (calcium diuranate containing metal hydroxides). This residue indicates a danger for the AMD mitigation solution because, besides contaminating soil and water, it can also resolve the contaminants that have already precipitated during the treatment of acidic water. Therefore, a resource for this problem is the immobilization and stabilization of this residue in Portland cement, a proposal which this work aims to study. This solution aims to reduce the contamination potential, reducing mobility, solubility and toxicity of waste. This can be achieved when the residue is encapsulated in a matrix that has high structural integrity. Thus, this study has as main objective the determination of a viable formulation using Portland cement, acid lagoon water, CADU and superplasticizer additive, which is capable of mechanically immobilizing the waste. Furthermore, to evaluating the mechanical resistance to compression and resolubilization of contaminants through leaching tests. Then, 6 specimens were made for 4 compositions that differ in relation to the proportions of the components. The specimens were subjected to submerged curing for a period of 14 days and then to a compression test in accordance with the ABNT-NBR 5739 standard. The leaching tests followed the ABNT-NBR 10005 standard. The minimum mechanical resistance shown was  $6.41 \pm 0.43$ MPa, while the highest was  $8.98 \pm 0.74$ MPa. In the leaching tests, the pure residue presented  $5.33 \pm 0.33$ mg/L of uranium and the best result obtained was  $0.0127 \pm 0.0016$ mg/L of leached uranium, thus being below the permitted limits. Therefore, it can be said that Portland cement is a viable alternative for the described problem.

**Keywords:** acid mine drainage; acid water treatment; CADU; Portland cement; waste immobilization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma descritivo para a metodologia adotada .....	27
Figura 2 - DUCA sólido úmido .....	29
Figura 3 - DUCA sólido seco .....	29
Figura 4 - Sistema de filtração a vácuo .....	30
Figura 5 - Água residuária filtrada .....	30
Figura 6 - Eliminação de cimento aglomerado.....	33
Figura 7 - Componentes devidamente medidos para a preparação das massas.....	34
Figura 8 - Sistema para homogeneização dos componentes e preparo das massas; onde a) e b) homogeneização dos materiais particulados; c) massa homogeneizada e preparada para a confecção dos corpos de prova.....	35
Figura 9 - Preenchimento, adensamento e moldagem dos corpos de prova; a), b) e c) .....	37
Figura 10 - Corpo de prova desmoldado .....	38
Figura 11 - Corpos de prova submetidos à cura submersa; a) período de cura: 1 dia e b) período de cura: 7 dias .....	38
Figura 12 - Realização do ensaio de compressão; a) e b).....	39
Figura 13 - Corpo de prova após ensaio de compressão .....	40
Figura 14 - Peneiramento do material britado .....	41
Figura 15 - Formação da pilha de homogeneização .....	41
Figura 16 - Soluções preparadas para determinação de solução extratora .....	42
Figura 17 - Medição de pH para as soluções.....	43
Figura 18 - Agitação das soluções em agitador rotatório .....	44
Figura 19 - Primeira filtração para obtenção do extrato lixiviado (filtro de papel).....	44
Figura 20 - Segunda filtração para obtenção do extrato lixiviado ( <i>micropore</i> ) .....	45
Figura 21 - Fluxograma demonstrativo para o ensaio de lixiviação .....	46
Figura 22 - Resistência mecânica de acordo com as diferentes composições.....	49
Figura 23 - Extratos lixiviados preparados para análise por ICP-MS .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de resíduos segundo a ABNT NBR 10004 .....	14
Tabela 2 - Classificação, características e local de deposição de rejeitos radioativos .....	19
Tabela 3 - Composições em porcentagem de cerâmicas de silicato .....	24
Tabela 4 - Principais compostos químicos presentes no cimento <i>Portland</i> .....	24
Tabela 5 - Formulações propostas e respectivas proporções entre componentes.....	32
Tabela 6 - Eficiência da filtração da água do coletada na saída do decantador .....	32
Tabela 7 - Massas medidas pré e pós-secagem dos cadinhos para determinação do teor de umidade presente no DUCA.....	47
Tabela 8 - Percentual de água presente em cada um dos sistemas .....	47
Tabela 9 - Resistência mecânica (em MPa) média das composições e seus respectivos corpos de prova .....	49
Tabela 10 - Quantidade de urânio presente nos extratos lixiviados .....	53
Tabela 11 - Massas dos corpos de prova para cada uma das composições propostas.....	68
Tabela 12 - Resistência, força peso, nº de CP's e altura estimada das pilhas .....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas	<b>IAEA</b>	Agência Internacional de Energia Atômica
<b>A/C</b>	Água-Cimento	<b>IBRAM</b>	Instituto Brasileiro de Mineração
<b>APHA</b>	<i>American Public Health Association</i>	<b>INB</b>	Indústrias Nucleares Brasileiras
<b>Bq</b>	Becquerel	<b>MPa</b>	Megapascal
<b>CNEN</b>	Comissão Nacional de Energia Nuclear	<b>ml</b>	Mililitro
<b>CP</b>	Cimento <i>Portland</i>	<b>mSv</b>	Milisievert
<b>DAM</b>	Drenagem Ácida de Mina	<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>D/C</b>	DUCA-Cimento	<b>NN</b>	Norma Nuclear
<b>DUCA</b>	Diuranato de Cálcio	<b>PRAD</b>	Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
<b>F</b>	Força	<b>t<sub>1/2</sub></b>	Meia-vida
<b>f<sub>c</sub></b>	Resistência à Compressão	<b>u</b>	Unidade de Massa Atômica
<b>FEAM</b>	Fundação Estadual do Meio Ambiente	<b>UDC</b>	Unidade de Descomissionamento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
2.1 OBJETIVOS GERAIS .....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
<b>3 JUSTIFICATIVAS.....</b>	<b>10</b>
3.1 JUSTIFICATIVA AMBIENTAL .....	10
3.2 JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA .....	10
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
4.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA .....	12
4.2 RESÍDUO DE NEUTRALIZAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA .....	14
4.3 RADIOATIVIDADE E REJEITO RADIOATIVO .....	15
4.4 FUNDAMENTOS E MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS .....	21
4.5 CIMENTO <i>PORTLAND</i> .....	22
4.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	25
4.7 IMOBILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA .....	26
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
5.1 DIURANATO DE CÁLCIO (DUCA) E ÁGUA RESIDUÁRIA .....	27
5.2 ESTUDO DAS FORMULAÇÕES E ENSAIOS DE IMOBILIZAÇÃO.....	31
5.2.1 Estudo e Preparo das Formulações.....	31
5.2.2 Ensaio de Imobilização .....	35
5.3 ENSAIOS MECÂNICOS.....	38
5.4 ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO .....	40
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
6.1 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE.....	47
6.2 ENSAIOS DE IMOBILIZAÇÃO.....	48
6.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA .....	48
6.4 ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO .....	52
<b>7 ANÁLISE DE VIABILIDADE DE CUSTO .....</b>	<b>55</b>

<b>8 CONCLUSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE A – Cálculo do resíduo gerado anualmente na UDC-INB Caldas .....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE B – Quantidade de cimento necessária .....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE C – Cálculo do custo estimado.....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE D – Projeção da pilha de corpos de prova .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Existem registros que comprovam que atividades relacionadas à mineração são datadas desde o período pré-histórico, em que o homem extraía e manuseava rochas do solo com o intuito de desenvolver armas e utensílios. Com a evolução do homem, novas tecnologias passaram a ser desenvolvidas e conseqüentemente a aplicação de diversos insumos minerais pôde ser inserida às necessidades do homem ao longo da história (VIDAL; CASTRO; FRASCÁ, 2014).

Na sociedade atual, raramente encontram-se materiais que não possuem qualquer matéria-prima de origem mineral ou que tiveram contato com produtos provenientes de minerais, mesmo que em seu processo de conformação. Tendo isso em vista, pode-se afirmar que a mineração apresenta um papel de suma importância quando relacionada à qualidade de vida e ao bem-estar da humanidade. Entretanto, por mais que tal atividade seja imprescindível para o desenvolvimento, é fundamental que haja o uso racional dos bens minerais, responsabilidade social e responsabilidade ambiental (IBRAM, 2014).

Como citado anteriormente, a mineração tem um papel propulsor que está diretamente relacionado ao desenvolvimento da humanidade e no Brasil isso não é diferente. Além do setor minerário ser um contribuidor relevante para o PIB do país e ser responsável por um número significativo de empregos gerados, alguns empreendimentos desse setor possuem programas sociais que auxiliam e beneficiam as comunidades locais das regiões exploradas.

Entretanto é de conhecimento mútuo que a indústria da mineração tem grande responsabilidade sobre as questões ambientais, isso se dá ao fato da mesma ser uma das maiores contribuidoras de danos ao meio ambiente. Além da alteração do relevo local que conseqüentemente está atrelada ao impacto visual causado, existe também o impacto ambiental provocado pela geração de grandes quantidades de resíduos provenientes da mineração (estéreis e rejeitos). Partindo de uma denominação simples, estéril, de acordo com Silva *et al.* (2006) é um material de ocorrência natural (solo, subsolo ou rocha) que não possui aproveitamento econômico; e rejeito de mineração pode ser classificado como material particulado remanescente após a etapa de beneficiamento de minério ter sido realizada e o material de interesse ter sido obtido.

De acordo com o Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração (ano base 2017), publicado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), no período de janeiro a

dezembro de 2017, o montante de resíduos provenientes de mineração no estado de Minas Gerais somou mais de 562 milhões de toneladas. A partir desse valor, 51,55% são de rejeito (289,9 milhões de toneladas), 48,41% são de estéril (272,2 milhões de toneladas) e 0,04% é proveniente de outros resíduos (242,1 mil toneladas) (FEAM, 2018).

Oliveira-Filho e Muniz (2008) esclarecem que a liberação de rejeitos oriundos da atividade mineira é um fator deveras preocupante não só se tratando da questão ambiental. Isso porque na maioria das vezes, o rejeito de mineração é composto por metais pesados que por sua vez acabam contaminando o ar, sistemas aquáticos e o solo. Por consequência, a concentração crescente de metais pesados nos ecossistemas acaba atingindo um domínio social, tendo em vista que esses resíduos são extremamente nocivos à saúde humana. Com isso, é mais do que correto afirmar que a redução de impactos causados pela contaminação dos solos e água é uma condição imprescindível para se manter a qualidade de vida da população.

Antes de compreender como o rejeito de mineração pode impactar negativamente o meio-ambiente, é preciso deixar claro como ele pode ser disposto em um empreendimento mineiro. Martini *et al.* (2016) especificam duas maneiras: em volumosas estruturas de pilhas ou em reservatórios que são formados por barragens de rejeitos. Atualmente, esse assunto tem conseguido maior notoriedade devido aos desastres socioambientais causados pelo rompimento das barragens do Fundão em 2015 e do Córrego do Feijão em 2019, nas cidades de Mariana e Brumadinho respectivamente, ambas no estado de Minas Gerais. O impacto ambiental causado pela contaminação de rios e vegetação por metais pesados contidos no rejeito é de grandeza imensurável e responsável por declarar a morte do ecossistema por um longo período.

Com mais esse agravante, a exigência de se depositar rejeitos que contêm metais pesados em sua composição, se torna cada vez mais irrefutável. Uma solução viável que é apresentada e utilizada pelo mundo para manter esse material em segurança, é o chamado repositório geológico. Repositórios geológicos são ambientes geológicos específicos que são utilizados como destino para a deposição de rejeitos contendo metais pesados ou material radioativo (HEILBRON *et al.*, 2019). Roxburgh (1987) pontua algumas propriedades relevantes que as rochas devem apresentar para serem utilizadas como repositório geológico: propriedades hidrogeológicas que diminuam o contato do rejeito com águas subterrâneas; propriedades geoquímicas e mineralógicas que retenham o trânsito de radionuclídeos (em casos de falhas da barreira) para a biosfera; propriedades termoquímicas que permitam que a rocha tolere a carga térmica proveniente do rejeito; e propriedades estruturais que garantam a estabilidade física do repositório.

A limitação de novas áreas para deposição de rejeitos decorrente da restrição de recursos naturais possibilita estabelecer uma conexão direta com o Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração e com o fator de contaminação do meio ambiente. Tendo em vista que os números relacionados à produção de rejeitos são exorbitantes e que os mesmos são responsáveis por severos danos ao meio ambiente e à saúde da população, fica clara a necessidade de um estudo que aponte uma solução para tal problema.

Partindo da problemática que envolve essas questões relacionadas à mineração e ao gerenciamento dos resíduos provenientes dessa atividade, é essencial levantar as questões relativas aos minérios que produzem rejeitos que contêm metais pesados. Se enquadrarmos nesse tipo de resíduo, os provenientes do minério de urânio por haver a grande probabilidade de conter contaminantes transurânicos (SANTOS, 1979). O urânio é visto como material de interesse partindo do ponto de vista da questão de energia nuclear, que traz consigo o objetivo de contribuir com a diminuição da emissão de gases liberados pela queima de combustíveis fósseis. Levando esse fato em consideração pode-se notar a relevância do papel do urânio como matéria-prima no mundo contemporâneo, nos tópicos que tratam de fontes de energias renováveis.

O rejeito da mineração do urânio é o resultado do processo de beneficiamento do minério de urânio. O termo “beneficiamento” se refere às etapas pelas quais o minério é submetido após sua extração e até que o mesmo se torne utilizável como combustível nos reatores nucleares. Voltando ao rejeito de urânio oriundo da mineração, um dos motivos que o torna nocivo à biosfera é a drenagem ácida de mina (DAM). Santos e Ladeira (2011) utilizam esse termo para designar o produto da oxidação que ocorre de maneira natural de minerais sulfetados (como exemplo, pode-se citar a pirita –  $\text{FeS}_2$ ). De maneira mais aprofundada, a DAM ocorre quando minerais sulfetados sofrem oxidação causada por ação conjunta de água e oxigênio. O resultado dessa reação química é a formação de ácido sulfúrico que atribui aos efluentes, baixos valores de pH. Devido aos valores de pH, cria-se um ambiente ácido que por sua vez é responsável pelo transporte dos metais diluídos até as matrizes rochosas. A DAM é um fator que implica severa atenção tanto pela questão ambiental quanto pela econômica, pois além de contaminar solos e cursos d’água, altos custos estão envolvidos no tratamento de ambientes que sofrem ação de efluentes ácidos (SANTOS; LADEIRA, 2011).

Segundo Goda (2020) esse é um problema que assola a unidade de Caldas – MG das Indústrias Nucleares Brasileiras (INB). Os processos relacionados às atividades de mineração, desde extração ao beneficiamento de urânio, se encerraram em 1997 e ao longo dos 15 anos de operação foram responsáveis pela geração de  $89 \times 10^6$  toneladas de rejeito que estão dispostos

em pilhas de estéreis a céu aberto. A questão envolvida pela DAM tem um agravante que é justamente a presença de urânio nas rochas também acaba sendo dissolvido na reação. Um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) foi submetido visando estratégias para a recuperação e remediação do ambiente, trazendo consigo um conjunto de propostas para as áreas de cava da mina, de bota-fora (estéreis), bacias de rejeito e área onde realizou-se o beneficiamento do minério de urânio (GODA, 2020).

Goda (2020) também ressalta que uma das propostas apresentadas pelo PRAD seria realizar o preenchimento da cava da mina com o material presente nos bota-foras. Porém duas pilhas de estéreis (bota-fora 4 e 8) são responsáveis pela geração de drenagem ácida, assim como na própria cava da mina. Com o intuito de mitigar o dano causado pela DAM gerada nesses setores é realizado o tratamento dessa drenagem proveniente da reação química que ocorre. Esse tratamento ocorre realizando a neutralização das águas ácidas com hidróxido de cálcio, contudo um novo problema desponta com esse processo que é a geração do resíduo da neutralização da DAM.

Esse resíduo resultante da neutralização de águas ácidas possui uma matriz calcária com hidróxidos metálicos. O estudo que será apresentado visa analisar a caracterização de tais resíduos e por meio da identificação de formulações de cimentos, identificar um material que seria capaz de criar estabilidade para que os resíduos não sejam lixiviados por drenagem ácida e assim reduzir o impacto ambiental causado por tal problema na unidade de Caldas – INB.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem por objetivo geral a análise e avaliação da imobilização de contaminantes provenientes do tratamento de águas ácidas de uma mina de urânio das Indústrias Nucleares do Brasil, utilizando-se cimento *Portland*, resíduo da mineração de urânio, água residuária de urânio e aditivo superplastificante como componentes para as formulações.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que seja possível atingir o objetivo geral, este estudo deverá realizar os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinação de uma formulação ótima levando-se em consideração os componentes do material: cimento *Portland*, resíduo, água residuária e aditivo superplastificante *Glenium 51*;
- b) Avaliação da eficiência de imobilização do resíduo de urânio em cimento *Portland* CP-II, variando-se as relações de cimento *Portland*/resíduo/água;
- c) Avaliação da resistência mecânica do material por meio de testes de compressão diametral;
- d) Avaliação da solubilização do urânio do material estabilizado por meio de testes de lixiviação que simulam as condições às quais os resíduos são submetidos naturalmente;

### 3 JUSTIFICATIVAS

#### 3.1 JUSTIFICATIVA AMBIENTAL

O avanço de estudos envolvendo novas tecnologias que têm por objetivo a mitigação de impactos ambientais vem se mostrando extremamente imprescindível. E a mineração mostra-se como uma das atividades que mais carecem de atenção acerca desse tema, devido à magnitude dos impactos causados pela mesma. A drenagem ácida de mina (DAM) pode ser enquadrada nesse âmbito e por isso requer certa atenção devido ao transporte de metais pesados para determinado habitat. Esse fator acarreta na contaminação de solos, matrizes rochosas, águas superficiais e subterrâneas e por consequência de tal fenômeno, a recuperação das áreas afetadas acaba tornando-se mais cara graças à uma maior dificuldade de reflorestamento (FUNGARO; IZIDORO, 2006).

A contaminação a partir da DAM ocorre graças ao ácido sulfúrico produzido pela oxidação de sulfetos. Essa reação geralmente é intensificada por operações de lavra e beneficiamento de minérios, pois essas atividades acabam alterando as condições de permeabilidade do ar, favorecendo o contato de minerais reativos com o oxigênio. Todos esses processos atribuem ao local e principalmente aos sistemas aquáticos, um pH de caráter ácido. Entretanto, o maior impacto que se encontra relacionado à DAM não é o pH ácido em si, e sim às grandes concentrações de metais pesados e ânions dissolvidos (NÓBREGA; LIMA; LEITE, 2008; RITCHIE, 1994).

Dessa forma, a necessidade do surgimento de novas tecnologias visando a mitigação de impactos ambientais e em decorrência dos danos causados pela drenagem ácida de mina são fatores que se mostram como causa legítima para o desenvolvimento deste estudo.

#### 3.2 JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

Conner e Hoeffner (1998) definem o termo estabilização como um conjunto de técnicas que tem por objetivo a potencial redução de risco que determinado resíduo apresenta, visando a alteração do mesmo para uma forma menos solúvel, móvel ou tóxica. Os autores ainda discorrem sobre os diferentes tipos de processos responsáveis pela estabilização de resíduos e

citam os processos químicos, que são aqueles que envolvem algum tipo de matéria-prima como base. Entre essas bases podem ser citados cimentos, pozolanas e até mesmo cal.

Existem estudos referentes à imobilização que levam em consideração diferentes materiais sendo utilizados como matriz imobilizadora de rejeitos radioativos, como propõe Guzella (2010) e Hermann *et al.* (1999). No primeiro estudo, a autora avalia a viabilidade de imobilizar os resíduos utilizando betumes nacionais e no segundo trabalho, os autores estudam a possibilidade de imobilizar lama contendo radionuclídeos e metais pesados em um material cuja base é composta por cimento *Portland*.

Apesar da quantidade de estudos sobre o assunto ser relativamente baixa, os resultados apresentados em ambos os trabalhos citados anteriormente, corroboram a justificativa de que seria viável, do ponto de vista científico, a realização de uma avaliação da imobilização do resíduo produzido pela INB-Caldas em uma matriz de cimento *Portland*.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

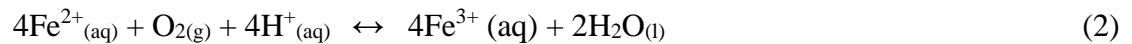
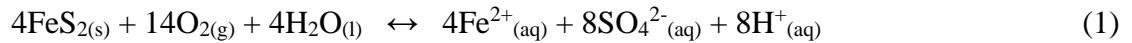
Um dos principais problemas que estão atrelados aos empreendimentos mineiros é a maneira adequada para realizar o gerenciamento dos resíduos produzidos pela mineração. Usualmente esses resíduos são dispostos em pilhas de rejeitos resultantes dos processos de extração e beneficiamento de minérios. Entretanto os rejeitos podem acabar causando sérios danos ao meio ambiente devido às suas composições químicas, principalmente no que se refere ao solo e lençóis freáticos (SANTOS; LADEIRA, 2011).

Quando esse evento acontece, ocorre a chamada drenagem ácida de mina (DAM). Que segundo Santos e Ladeira (2011), é o produto da oxidação de minerais sulfetados (principalmente a pirita –  $\text{FeS}_2$ ). De acordo com as autoras, os minerais sulfetados oxidam-se pela ação conjunta de água e oxigênio e como produto dessa reação, forma-se o ácido sulfúrico que atribui aos efluentes e conseqüentemente ao solo, valores de pH em torno de 2,0 (FUNGARO; IZIDORO, 2006). Fungaro e Izidoro (2006) ainda pontuam em quais aspectos esses valores de pH influenciam diretamente no aumento da taxa de mortalidade, diminuição das taxas de reprodução, coloração e turbidez da água. Tudo isso devido à queda na qualidade da água.

Segundo Evangelou (1995), existem alguns critérios que precisam ser atendidos para que ocorra a drenagem ácida de mina:

- O resíduo deve apresentar quantidade de sulfetos superior à dos álcalis presentes no meio;
- O resíduo deve apresentar permeabilidade que possibilite a infiltração da água e oxigênio;
- O resíduo deve-se encontrar em ambiente úmido ou estar exposto às águas, de maneira que seja possível a percolação da água da chuva para transportá-lo ao meio ambiente.

Evangelou (1995) ainda complementa Santos e Ladeira (2011) dizendo que a oxidação da pirita em presença de oxigênio e água formam o ácido sulfúrico que por sua vez, favorece a lixiviação do elemento ferro na forma de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ . As equações que representam as reações químicas envolvidas no processo de oxidação da pirita se encontram a seguir (SANTOS; LADEIRA, 2011):



A equação (1) mostra a oxidação da pirita ( $\text{FeS}_2$ ) em presença de oxigênio. O íon ferroso gerado nessa reação é oxidado ao estado férrico, de acordo com a equação (2) que por sua vez sofre processo de hidrólise onde produz mais acidez, como mostrado na equação (3) (SANTOS; LADEIRA, 2011).

Porém não é somente a pirita o mineral responsável pela geração de DAM; outros minerais podem contribuir com esse fenômeno, principalmente quando são levados em consideração minerais que se encontram depositados em pilhas de estéreis e que por consequência sofrem grave ação de intemperismo (ABREU *et al.*, 2012). Evangelou (1995) diz que entre esses outros minerais que contribuem para a geração de DAM podem ser citados os aluminossilicatos, óxidos de ferro e óxidos de manganês. O autor também acrescenta que a variedade de minerais presentes no rejeito de mineração é um fator que influencia de forma direta nas características da DAM.

Se tratando de DAM já ocorrente, existem dois processos que são realizados visando a mitigação do fenômeno: métodos de prevenção e métodos de remediação. Os métodos de prevenção podem ter caráter químico, físico ou bacteriológico e têm por objetivo o descobrimento de formas para impedir a geração de DAM ou até mesmo diminuir a quantidade de ácido produzida. Já os métodos de remediação utilizam-se de técnicas de contenção e/ou tratamento. Tais técnicas são classificadas como ativas ou passivas dependendo da necessidade ou não de energia para o funcionamento do processo (AKCIL; KOLDAS, 2006; BLOWES *et al.*, 2003).

Uma solução de prevenção é a utilização de coberturas secas que têm por objetivo atuar como agentes controladores para entrada de oxigênio e água, para que dessa forma a reação de oxidação do sulfeto não ocorra (SOUZA; BORMA; MENDONÇA, 2003). Outra solução encontrada para a mitigação do problema gerado por DAM, segundo Mylona, Xenides e Paspaliaris (2000), é o uso de sistemas de coberturas com adição de materiais alcalinos (cal e calcário, por exemplo) que teriam como objetivo a neutralização da acidez e a imobilização de metais residuários de DAM.

Conforme discorre Goda (2020), atualmente na UDC-INB Caldas (Unidade de Descomissionamento das Indústrias Nucleares Brasileiras), o procedimento utilizado visando

mitigar o dano causado por DAM é o tratamento das águas ácidas através da ação de cal hidratada para neutralização e precipitação dos contaminantes.

#### 4.2 RESÍDUO DE NEUTRALIZAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

Antes de discorrer sobre os resíduos originados de DAM, é importante ter ciência de que existe a diferença entre os termos “resíduo” e “rejeito” por mais que em muitas vezes, possam ser sinônimos. O primeiro termo remete a ideia de um material obtido através de um processo produtivo, enquanto o segundo traz a ideia de um material exaurido de uma substância de interesse cujo beneficiamento não se mostra mais viável economicamente.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) padroniza a classificação de resíduos de acordo com a norma ABNT NBR 10004:2004. A tabela 1 organiza as classes dos resíduos com suas respectivas características (ABNT, 2004):

**Tabela 1** - Classificação de resíduos segundo a ABNT NBR 10004

<b>Tipos</b>	<b>Características</b>
<b>Classe I – Perigoso</b>	Resíduos ou misturas destes que apresentam risco a saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidência de doenças, risco ao meio ambiente, Possuem uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
<b>Classe II a – Não-perigoso e não-inerte</b>	Resíduos ou misturas de resíduos que não se enquadram na classe I ou na classe II-b. Podem ter propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
<b>Classe II b – Não-perigoso e inerte</b>	Resíduos ou misturas de resíduos que não têm nenhum dos seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de águas.

**Fonte:** Adaptado de ABNT NBR 10005 (2004)

Como citado no tópico anterior, na UDC-INB Caldas utiliza-se de cal hidratada para tratar do problema causado pela ação de DAM, entretanto esse procedimento acaba gerando um resíduo denominado DUCA (diuranato de cálcio contendo hidróxidos metálicos) e conforme a ABNT NBR 10004:2004 esse resíduo é caracterizado como Classe - II a (não-perigoso e não inerte). Tratando-se da caracterização química do DUCA, Lima (2014) mostra que o resíduo possui elevada quantidade de urânio e de outros metais em sua composição. Entre esses metais se encontram alumínio, cálcio, manganês, zínco e elementos de terras raras. A presença desses elementos na composição do DUCA faz com que seja necessário o tratamento do resíduo.

Segundo o mesmo autor, em 2010, estima-se que havia aproximadamente 67 mil toneladas de DUCA depositado na cava da mina da Unidade de Caldas – INB. Esse montante é proveniente do tratamento de águas ácidas no local desde 1998 (LIMA, 2014). Goda (2020) observa na mesma unidade da INB a existência de uma lagoa de águas ácidas originada da DAM e que o contato do DUCA com tais águas facilita a ressolubilização de metais presentes no próprio resíduo e assim fazendo com que a qualidade da água torne a sofrer alteração e consequentemente alterando os critérios de tratamento da mesma.

Quando essa situação ocorre, os resíduos se encontram depositados de uma maneira na qual não apresenta estabilidade mecânica devido ao urânio aparecer em forma de íons trocáveis. Em outras palavras, o transporte de contaminantes é facilitado devido à falta de estabilidade e consequentemente a probabilidade de resultar em um processo danoso ao meio ambiente é maior (GOMES, 2009).

Graças a esse problema, alguns estudos vêm levantando propostas para tratar ou até mesmo reaproveitar o resíduo. Gomes (2009) e Lima (2014) pontuam que a concentração de urânio no DUCA varia de 0,24% a 0,64% e esse fato demonstra uma viabilidade econômica para se realizar o processo de recuperação de urânio. Outra proposta para conter o avanço dos danos causados pelos resíduos componentes do DUCA é justamente o objetivo deste estudo, que é sanar o problema causado pelo transporte de contaminantes, deixando-os estáveis mecanicamente em um material que suporte as ações causadoras de DAM.

#### 4.3 RADIOATIVIDADE E REJEITO RADIOATIVO

Tendo ciência de que toda e qualquer atividade industrial é responsável pela geração de uma ou outra forma de resíduo, a mineração não é uma atividade que foge à regra. Independente

da natureza do resíduo, é de extrema importância se atentar aos devidos cuidados que devem ser tomados ao lidar com esse tipo de material, pois essa atenção possibilita classificá-lo de acordo com a sua natureza e assim determinar a melhor forma para lidar com o resíduo. No caso deste estudo, o resíduo proveniente do beneficiamento do minério possui uma particularidade que acaba fazendo com que se torne proibida a sua liberação no meio ambiente. A radioatividade presente no material é uma condição que faz com que exista uma maior precaução ao lidar com tais detritos. Precaução essa, que se encontra atrelada aos danos que podem ser causados diretamente ao ambiente devido à radiação emanada por elementos pesados como rádio, polônio e no caso do resíduo proveniente da UDC da INB-Caldas, o urânio.

Discorrendo de maneira sucinta sobre o urânio e de acordo com a tabela periódica sabe-se que o elemento é representado pelo símbolo U, possui número atômico 92 e massa atômica igual a 238u. Foi descoberto em 1789 e é reconhecido por ser o primeiro elemento que trouxe estudos e resultados acerca da radioatividade. Também é conhecido por ser um elemento instável e possuir como isótopos naturais o  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$ , sendo todos radioativos e emissores de radiação  $\alpha$  e  $\beta$  (OHLWEILER, 1973). O urânio é encontrado predominantemente em rochas sedimentares e sua ocorrência se dá principalmente na forma de óxidos. Como principais minerais de urânio podem ser citados a uraninita, carnotita, autunita, tobernita e bequerelita, sendo o primeiro citado, o de maior importância. A principal finalidade para o urânio é a atuação como combustível nuclear, visando a produção de energia elétrica (os isótopos anteriormente citados são utilizados para tal aplicação). A energia é produzida através de uma reação de fissão que ocorre em um reator nuclear que geralmente encontra-se imerso em um tanque. O calor resultante da fissão nuclear por sua vez, acaba produzindo vapor de água que se desloca até as turbinas responsáveis por acionar os geradores e assim, produzir energia elétrica (HABASHI, 1993; INB, 2020; MERRIT, 1971).

É importante levar em consideração que o resíduo gerado pela mineração de urânio não apresenta somente um caráter sólido, sendo assim, também podendo ser classificado em resíduo líquido ou ainda gasoso. De acordo com Santos (1979), os resíduos sólidos são aqueles originados da rocha estéril e da cobertura de solo, sendo que ambos possuem atividade radioativa baixa. Já como resíduo líquido tem-se principalmente a água de drenagem de mina como exemplo, isso devido a presença de urânio dissolvido e na forma de partículas que se encontram em suspensão. Por sua vez, os resíduos gasosos são aqueles transportados pelo ar e

são constituídos em sua maioria por partículas de urânio que se encontram em suspensão, além de outros gases radioativos.

No entanto, antes de discorrer sobre os perigos provenientes e os cuidados a serem tomados com o resíduo radioativo, é prudente compreender, brevemente, sobre o que é a radioatividade. O cientista Antoine H. Becquerel ao estudar a fosforescência e fluorescência moleculares acabou chegando à conclusão de que o elemento urânio emitia alguma forma de radiação penetrante e que essa característica era natural do próprio elemento e não apresentava relação com o fenômeno de fluorescência. Essa radiação penetrante emitida inicialmente foi denominada “raios de Becquerel”, que posteriormente foi chamada de radioatividade por Madame Marie Curie (SNYDER, 1997).

Xavier *et al.* (2006) ressaltam que Madame Curie acabou demonstrando grande interesse pelos trabalhos de Becquerel e juntamente de seu marido, Pierre Curie, iniciaram estudos com a finalidade de descobrir qual era a fonte de emissão de radiação observada anteriormente no minério de urânio. Então com o auxílio de um eletroscópio e de um piezo eletrômetro, analisaram o minério e com a medição das radiações, conseguiram constatar que essas eram uma propriedade particular do elemento urânio e que sua intensidade era diretamente proporcional à quantidade de urânio presente no minério.

O casal Curie ainda deu continuidade com os estudos acerca da radioatividade e descobriram que a pechblenda (minério contendo óxido de urânio) apresentava um potencial radioativo maior ainda que o do próprio urânio isolado. Isso demonstrava que possivelmente esse minério era composto por outros elementos radioativos além do urânio. E assim, no ano de 1898, apresentaram para o mundo mais dois novos elementos: polônio e o rádio. Devido a esse relevante estudo e por toda a trajetória científica, Becquerel e o casal Curie foram premiados com o Nobel de Física e posteriormente, Madame Curie foi laureada com o Nobel de Química, se tornando a única pessoa da história a ser contemplada com dois prêmios em áreas científicas distintas (XAVIER *et al.*, 2006). Cordeiro e Peduzzi (2011) ainda complementam que ao trazer sua descoberta ao mundo, Madame Curie fez com que a radioatividade chamasse a atenção dos cientistas, sendo Ernest Rutherford um deles. O pesquisador conduziu vários estudos com o urânio e acabou comprovando a existência de dois tipos de radiações, denominadas alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ), sendo que foi dito que a primeira é rapidamente absorvida e a segunda possui uma natureza mais penetrante.

Com o decorrer da história e graças a esses e a diversos outros estudos, a humanidade pôde usufruir da vasta aplicabilidade da radioatividade. Vários âmbitos operam com o auxílio dessa propriedade, como: medicina, química, estudos de datação, preservação de alimentos e na produção de energia elétrica, como citado anteriormente. Por outro lado, a história também conta sobre ocorridos lastimosos que acabam envolvendo de alguma maneira, a radioatividade: Hiroshima e Nagasaki, o acidente nuclear de Chernobyl e o acidente radioativo de Goiânia. Esses fatos nos mostram que apesar dos ganhos que os estudos acerca da radioatividade proporcionam, deve-se tratá-la com ponderação e cautela.

Tendo isso em vista, pode-se notar a importância em lidar com prudência com o armazenamento e gerenciamento de rejeitos radioativos. Bredehoeft *et al.* (1978) ressaltam a necessidade de um local apropriado para uma deposição correta de rejeitos radioativos. Determinar uma região que se mostre segura para tal ação é uma tarefa que demanda uma análise e caracterização rigorosas devido ao fato de cada rejeito apresentar características intrínsecas. Os autores exemplificam com os casos dos isótopos  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{137}\text{Cs}$  que sofrem decaimento durante centenas de anos e sobre elementos como Pu, Am, Np e Ra (elementos transurânicos que conseguem resistir ao tempo por milhões de anos), que acabam aumentando a probabilidade de ocorrerem perturbações em determinadas formações geológicas.

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica, IAEA (2009), os rejeitos radioativos devem ser depositados em determinados locais (depósitos geológicos), levando em consideração suas características radioativas. Os depósitos geológicos referem-se a locais que apresentam formação geológica estável de maneira que consigam conter os efeitos provenientes de rejeitos radioativos (IAEA, 2011). A Tabela 2 mostra as diferentes classificações para resíduos radioativos, assim como as características que os definem e a melhor opção para a deposição dos mesmos (IAEA, 2009):

**Tabela 2** - Classificação, características e local de deposição de rejeitos radioativos

<b>Tipo de Rejeito</b>	<b>Características</b>	<b>Opção de Deposição</b>
1 – Isento	Níveis de atividade iguais ou inferiores aos limites de isenção que foram baseados em uma dose anual para os membros do público inferior a 0,01mSv.	Sem restrição radiológica.
2 – Baixo e Médio Níveis	Níveis de atividade superiores ao limite de isenção e geração de calor inferior ou da ordem 2kW/m <sup>3</sup>	Depósitos próximos à superfície ou depósitos geológicos.
2.1 – Vida Curta	Concentração de emissores alfa de meia-vida longa restrita.	Depósitos geológicos.
2.2 – Vida Longa	Concentração de radionuclídeos emissores alfa superiores a 4000Bq/g.	Depósitos geológicos.
3 – Alto Nível	Geração de calor superior a 2kW/m <sup>3</sup> e concentração de radionuclídeos emissores alfa superiores a 4000Bq/g.	Depósitos geológicos.

**Fonte:** (IAEA, 2009).

É válido complementar que os rejeitos que apresentam baixo e médio nível de radiação podem ser classificados de acordo com seu tempo de meia-vida, podendo ser rejeitos de meia-vida curta e rejeitos de meia-vida longa. Primeiramente, a meia-vida de um elemento radioativo pode ser interpretada como sendo o tempo necessário para que a atividade radioativa de determinado elemento atinja a metade da atividade inicial. Ou seja, todo elemento apresenta uma velocidade de decaimento característica e para cada tempo de meia-vida atingido, o elemento tem sua atividade radioativa reduzida à metade, até que essa atividade apresente um valor que não se mostre nocivo (CNEN, 2008).

Retomando, os rejeitos de baixo e médio nível de radiação que apresentam meia-vida curta, detêm baixas concentrações de radionuclídeos de vida longa ( $t_{1/2} > 30$  anos). E contrário ocorre nos rejeitos de meia vida longa, por apresentarem concentrações consideráveis de radionuclídeos com meia-vida que superam 30 anos. Assim, os rejeitos de meia-vida curta

podem ser dispostos em repositórios à superfície. O oposto dos rejeitos de baixo e médio nível de radiação que apresentam meia-vida longa, que obrigam a disposição em formações geológicas em que o grau de isolamento é maior (CNEN, 2008; GUZELLA, 2010).

O processo desde a classificação do rejeito até o seu local de destino deve seguir um rigoroso roteiro para garantir um bom gerenciamento do material radioativo. De acordo com a norma NN 8.01 da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), essa elaboração é composta por 6 fases, descritas a seguir (CNEN, 2014):

- Descrição e classificação: nesta etapa deve-se descrever em que estado o rejeito se encontra (sólido, líquido ou gasoso), assim como os radionuclídeos presentes e a composição química do material. Também é válido ressaltar sobre a importância de apontar a existência de algum outro risco, como por exemplo, inflamabilidade ou patogenicidade.
- Coleta, segregação, acondicionamento e identificação: imprescindível descrever todos os procedimentos detalhadamente para cada passo desta etapa, informando sobre todo o material utilizado e quais os parâmetros escolhidos para identificação do rejeito (características radiológicas, físico-químicas, biológicas e origem).
- Armazenamento em depósito inicial: na terceira etapa deve-se descrever o local inicial selecionado para realizar o armazenamento do rejeito. Levando-se em consideração que o mesmo tenha as paredes internas lisas e pintadas à tinta impermeável. Além disso, é necessário também que o acesso a tal local seja controlado, que a área seja bem-sinalizada.
- Tratamento: é incumbência da etapa de tratamento a descrição dos processos propostos para o tratamento do rejeito radioativo.
- Dispensa de rejeitos: nesta etapa devem ser definidos quais serão os procedimentos adotados para que seja realizada a transferência de rejeitos radioativos para um local determinado pela CNEN.
- Registros e inventários: por fim, devem ser elaborados registros que contenham os dados sobre localização, procedência, destino e transferência dos respectivos volumes de rejeitos radioativos. Tais documentos devem ser devidamente mantidos e organizados na instalação em questão.

O resíduo encontrado na INB-Caldas não apresenta atividade radiológica em altos níveis e por isso é depositado próximo à superfície. Todavia, como já relatado anteriormente, o mesmo vem sendo responsável pela contaminação da região em que está localizado. Portanto, acabou se tornando mais do que necessária a atuação de uma ação mitigatória.

#### 4.4 FUNDAMENTOS E MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Para dar início a um estudo que aborda os mecanismos e fundamentos para a estabilização de resíduos, é importante ter o conhecimento de que existem processos físicos, químicos e ou físico-químicos que vão garantir as propriedades necessárias para atingir a estabilidade pretendida. Levando-se em consideração a estabilização física, o estado físico do material é alterado por meio de solidificação ou encapsulamento. Por outro lado, considerando-se a estabilização química, o que se altera é o estado químico dos elementos componentes do material, fazendo com que a solubilidade dos contaminantes em água diminua (GODA, 2020).

Yousuf *et al.* (1995) dizem que os processos utilizados para realizar a estabilização de resíduos são complexos por necessitarem de um equilíbrio entre os elementos que constituem o resíduo com a matriz utilizada como estabilizadora. Fora isso, fatores como a presença de compostos inorgânicos e orgânicos em meios aquosos podem influenciar diretamente na lixiviação dos elementos e aplicando ao resíduo imobilizado características distintas das esperadas. Isso nos mostra a importância de se conhecer o ambiente e as condições a que ele está submetido, para que assim seja possível realizar um estudo com maior efetividade.

Para isso, Goda (2020) explica que é importante se analisar os produtos de solubilidade dos compostos inorgânicos que se encontram no resíduo. Esses produtos indicam a forma em quem o metal se encontrará mais estável mecanicamente e qual a maneira mais adequada de disposição final do resíduo em questão. A partir dessa análise realizada, é possível determinar qual tecnologia é a mais adequada para lidar com o resíduo.

Resíduos que contêm elevado número de metais tratados por processos de solidificação-estabilização tendem a apresentar solubilidades diferentes dentro de um intervalo amplo. Em ocasiões com esse caráter, como já citado aqui por Mylona, Xenides e Paspaliaris (2000), o uso de álcalis é utilizado visando a formação de hidróxidos metálicos. Entre os álcalis mais utilizados estão cal virgem e hidratada ( $\text{CaO}$  e  $\text{Ca(OH)}_2$ ), que têm função de regulador de pH. Já como função da matriz que traz estabilidade mecânica ao sistema (agente ligante), podem

ser citados as cinzas de fornos de cimento, silicato de sódio, cal e cimento *Portland*, sendo este último objeto de estudo neste trabalho (CONNER; HOEFFNER, 1998).

#### 4.5 CIMENTO *PORTLAND*

Antes de aprofundar sobre as propriedades do cimento *Portland* (CP), é plausível nos atentarmos primeiramente sobre o próprio cimento por si só. Entre as quatro classes de materiais existentes, o cimento é classificado como uma cerâmica. De acordo com Callister e Rethwisch (2012), as cerâmicas são materiais formados através de interações entre elementos metálicos e não metálicos e que na maioria das vezes, são óxidos, nitretos e carbetos, seguindo a obrigatoriedade de serem materiais inorgânicos e não-metálicos.

Sobre cimentos, os autores dizem que esses materiais têm como principal característica, a formação de uma pasta quando misturados com água. Antes que essa pasta seque e endureça, ela permite ser facilmente moldada em qualquer forma. Após endurecer, o cimento é um material que apresenta elevada rigidez, fato esse que o torna extremamente procurado para utilidade em estruturas. Outra característica importante dos cimentos, é a capacidade dos mesmos atuarem como uma fase de união ele materiais particulados. Em outras palavras, o cimento serve como uma matriz que aglutina quimicamente esses agregados particulados em uma estrutura estável e coesa (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Já Neville (1997), visando abranger uma grande gama de materiais cimentícios, descreve o cimento como um material que apresenta propriedades adesivas e coesivas que implicam a si a capacidade de unir fragmentos minerais em formato de uma unidade compacta. Os cimentos hidráulicos (denominados assim devido reagirem quimicamente com a água), são aqueles utilizados na construção civil, para a produção de concreto e são formados à base de calcário, silicatos e aluminatos de cálcio. Assim, podendo ser classificados em cimentos aluminosos, naturais e *Portland*.

Discorrendo sobre os cimentos do tipo *Portland*, esses materiais recebem tal denominação devido à cor e propriedades de endurecimento semelhantes a rocha de *Portland* (um calcário de *Dorset*), ilha localizada no Reino Unido. De acordo com as normas brasileiras podem ser classificados em 5 tipos (GALVÃO, 2003):

- CP I – comum;
- CP II – composto;
- CP III – alto-forno;
- CP IV – pozolânico;
- CP V – alta resistência inercial.

No que se refere ao cimento *Portland*, o CP I (comum) é utilizado em serviços em geral, quando não se exigem propriedades especiais para o cimento; CP II (composto) possui algumas vantagens quando comparado ao CP I devido à adição de materiais como a pozolana, a escória de alto-forno ou carbonáticos durante sua moagem; O CP III (alto-forno) é uma mistura de cimento com escória granular de alto-forno (mistura de CaO, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); CP IV (pozolânico) é uma mistura de cimento *Portland* com pozolanas (matérias naturais ou artificiais que contêm sílica ativa). E por fim, o CP V (alta resistência inercial) recebe essa denominação devido ao cimento apresentar o mínimo de resistência à compressão de 34,0 MPa nos primeiros 7 dias de idade (GALVÃO, 2003).

Segundo Yousuf *et al.* (1995), o cimento *Portland* é uma mistura heterogênea de diversos constituintes, sendo os principais compostos: o silicato tricálcico comumente conhecido como alita; o silicato dicálcico, conhecido como belita; o aluminato tricálcico; e o ferroaluminato tetracálcico.

Levando-se em consideração à composição química dos cimentos *Portland*, podem-se observar as Tabelas 3 e 4:

**Tabela 3** - Composições em porcentagem de cerâmicas de silicato

Cerâmicas	Composição (%)					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Outros
<b>Refratário de Sílica</b>	96	-	-	-	-	4
<b>Refratário de Argila</b>	50-70	45-25	-	-	-	5
<b>Refratário de Mulita</b>	28	72	-	-	-	-
<b>Porcelana Elétrica</b>	61	32	6	-	-	1
<b>Porcelana Esteatita</b>	64	5	-	30	-	1
<b>Cimento <i>Portland</i></b>	25	9	-	-	64	2

Fonte: Shackelford (2008).

**Tabela 4** - Principais compostos químicos presentes no cimento *Portland*

Nome do Composto	Composição em Óxidos
<b>Silicato Tricálcico</b>	3CaO.SiO <sub>2</sub>
<b>Silicato Dicálcico</b>	2CaO.SiO <sub>2</sub>
<b>Aluminato Tricálcico</b>	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Ferroaluminato Tetracálcico</b>	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Sulfato de Cálcio Hidratado</b>	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O

Fonte: Neville (1997).

Observando as tabelas, é possível estabelecer algumas relações com informações citadas anteriormente. A tabela 3 mostra a composição química em porcentagem de algumas cerâmicas à base de silicato, entre elas o cimento *Portland*. Analisando os valores apresentados, nota-se que a cal (CaO) é o componente em maior quantidade no cimento *Portland* seguida pela sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

A tabela 4 traz os principais compostos químicos presentes na composição do cimento *Portland*. Observando as composições em óxidos, nota-se que na maioria dos compostos encontram-se a cal, a sílica e a alumina. Essa informação corrobora os valores da tabela 3 que

apresenta esses mesmos compostos em maior concentração (em porcentagem) na composição do cimento *Portland*.

Por fim, uma última informação que é possível retirar da análise das tabelas 3 e 4 é a viabilidade de se utilizar o cimento *Portland* como estabilizador mecânico dos resíduos provenientes de DAM. Como citado anteriormente, os álcalis neutralizam a acidez e imobilizam os metais residuários de DAM. Dessa forma, como a cal (CaO) é um álcali e se encontra em maior volume (%) na composição do cimento *Portland*, o material aponta uma possível solução para o problema proposto.

#### 4.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Um dos obstáculos mais corriqueiros que surgem ao se preparar uma massa cimentícia, é lidar com o comportamento e relacionamento da água juntamente do cimento. Esse obstáculo está diretamente relacionado com o fenômeno conhecido por floculação. A floculação tende a ocorrer uma vez que água e cimento entram em contato, dando origem ao que chamam de “flocos”. Eles, por sua vez acabam retendo a água utilizada para a mistura da massa em seu interior, comprometendo dessa maneira, a trabalhabilidade do concreto. Uma saída usualmente escolhida para lidar com tal problema, é a adição de mais água ao sistema, podendo resultar em outros problemas subsequentes como: criação de porosidade, retração desuniforme do concreto, heterogeneidade na peça, segregação e até mesmo resultar em fratura (HARTMANN; HELENE, 2003).

Visando evitar esse tipo de situação, os aditivos são aplicados, já que atuam diretamente na função de defloculante do sistema. Com isso, e de maneira interligada, evitam-se os problemas citados anteriormente, além de atribuir uma melhora na trabalhabilidade do concreto. Esses componentes, também denominados “redutores de água”, adotam tal termo justamente por liberar a água retida em um sistema em que houve floculação e assim reduzir a quantidade necessária de água (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os autores citados anteriormente ainda declaram que os superplastificantes fazem parte de uma categoria especial dos aditivos redutores por permitirem consideráveis reduções da quantidade de água (20% à 30%), enquanto plastificantes comuns agem reduzindo em menor escala (5% à 10%). Isso acaba acarretando além de uma melhor trabalhabilidade, um aumento nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto.

#### 4.7 IMOBILIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM MATRIZ CIMENTÍCIA

A imobilização de resíduos a partir do uso de cimento *Portland* como matriz estabilizadora é um processo aplicado em diversos estudos que apresentam resultados satisfatórios. O princípio desse processo se baseia na neutralização do potencial de contaminação através da redução da solubilidade, mobilidade e toxicidade dos contaminantes, além de agregar o resíduo em uma matriz de alto potencial estrutural (GODA, 2020).

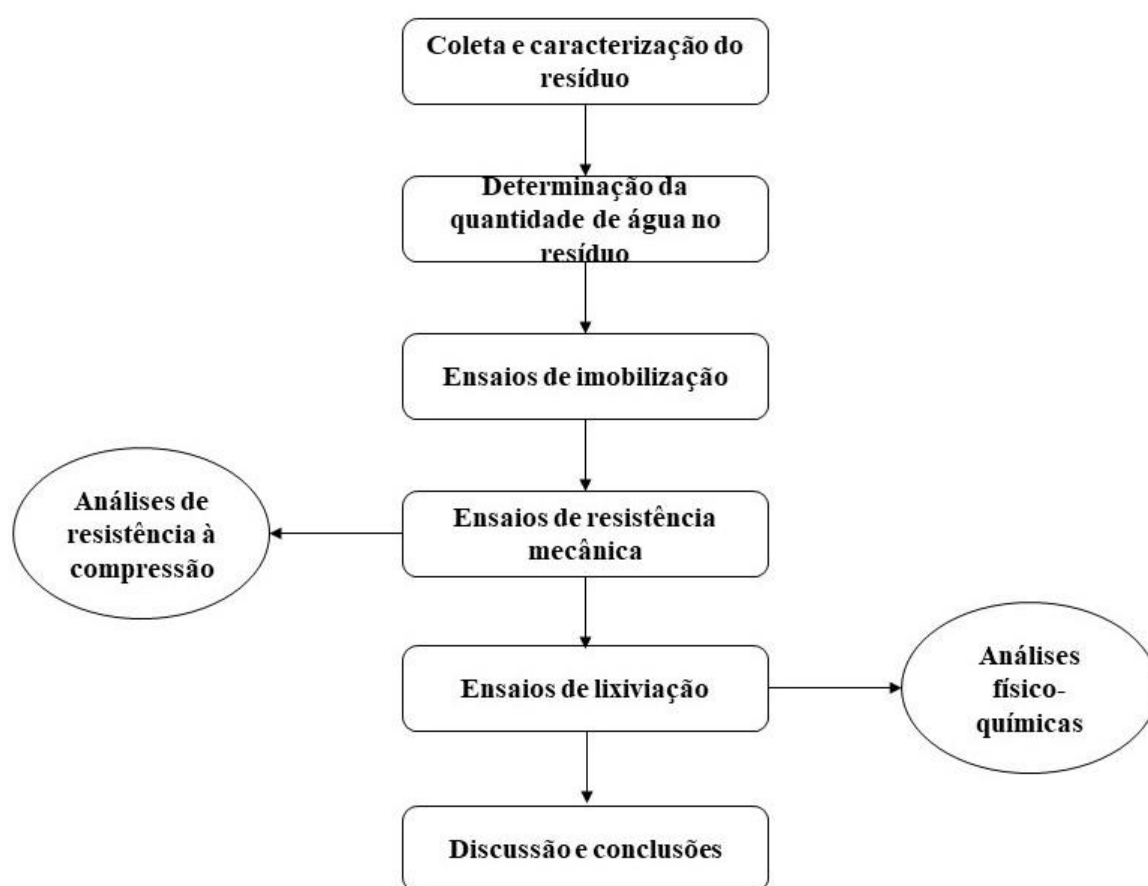
Alguns autores estudaram a técnica de solidificação e estabilização de resíduos perigosos e obtiveram bons resultados como conclusão. Silva (2007) e Bertoli *et al.* (2015) analisaram a eficiência do cimento *Portland* como matriz estabilizadora de resíduos e ambos os autores obtiveram resultados positivos. O primeiro autor estudou os efeitos da solidificação e estabilização de resíduos contendo metais pesados provenientes de indústria metalúrgica, têxtil e automotiva, confirmando a eficiência do cimento *Portland* atuando como estabilizador. Os outros autores trabalharam com a imobilização de resíduos oriundos da indústria de galvanoplastia que também possuía substâncias tóxicas em suas composições e conseguiram obter resultados positivos em relação à eficiência do cimento *Portland*.

Hermann *et al.* (1999) trabalharam com a imobilização de resíduos radioativos (urânio e Ra-226) através de cimento *Portland*. Nesse estudo em questão, os autores lidaram com um resíduo proveniente do tratamento de DAM de uma antiga mineração de urânio. O resíduo além de urânio e Ra-226, continha arsênio em sua composição e era tratado com cimento *Portland*. Devido às similaridades desse estudo com o problema que atinge a UDC-INB Caldas e à eficiência do mesmo, Goda (2020) optou por utilizar de metodologia semelhante, obtendo resultados satisfatórios de maneira similar.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia descrita a seguir (Figura 1) foi realizada nos laboratórios das dependências da Universidade Federal de Alfenas – *campus* Poços de Caldas, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) – Laboratório de Poços de Caldas e do laboratório de ensaios mecânicos da empresa Ouro Mix, situada na cidade de Andradas – MG.

**Figura 1** - Fluxograma descritivo para a metodologia adotada



Fonte: Do autor.

### 5.1 DIURANATO DE CÁLCIO (DUCA) E ÁGUA RESIDUÁRIA

Primeiramente, os resíduos foram coletados e embalados na UDC-INB Caldas por funcionários da própria unidade de descomissionamento e transportado, seguindo todos os protocolos de segurança. O resíduo de caráter sólido foi retirado na cava mina, enquanto a água

residuária, na polpa do decantador. Em seguida, foram transportados até a CNEN-LAPOC para as etapas subsequentes da metodologia: ensaios de imobilização e lixiviação.

Para determinar a massa de água e sólidos presente na amostra sólida, seguiu-se a metodologia descrita em “*Standard Methods for the examination for water and wastewater*” determinada pela *American Public Health Association* (APHA, 2012). O método baseia-se na transferência de uma fração da amostra de aproximadamente 200mg para uma cápsula previamente calcinada a 550°C e posteriormente pesada. Após a secagem da amostra em uma estufa por 24h, à 105°C, mede-se a massa do conjunto. Assim, quantidade de sólidos totais é calculada por meio da diferença de massa que o conjunto apresenta antes e após a secagem na estufa. O valor referente à quantidade perdida de massa, corresponde à quantidade de água pertencente ao sistema.

Após determinadas a quantidade de água e sólidos, foi necessário realizar a preparação do resíduo para as etapas seguintes. Todo o resíduo de caráter sólido foi levado a uma estufa a uma temperatura de aproximadamente 100°C para que toda a água presente pudesse ser retirada das amostras e assim servir de material agregado para as formulações estipuladas. Após 24h, as amostras foram retiradas da estufa e submetidas a um processo cominuição por meio de britagem primária e secundária. O objetivo dessa etapa é justamente preparar o material fragmentado para etapa de imobilização do resíduo/confecção dos corpos de prova e para os ensaios de lixiviação. Para isso, 100% do material foi fragmentado até obter uma granulometria menor que 9,5mm, de acordo com a norma ABNT-NBR 10005 e ao que diz Fusco (2008), que trata partículas com diâmetro máximo de até 9,5mm, como agregado miúdo e ressalta a importância desse tamanho de partícula para a formação da matriz do concreto. As figuras 2 e 3 ilustram o resíduo sólido antes e após a secagem.

**Figura 2 - DUCA sólido úmido**



**Fonte:** do autor.

**Figura 3 - DUCA sólido seco**



**Fonte:** do autor.

Para a separação da água residuária coletada no decantador foi necessário primeiramente deixá-la armazenada nos galões por 24h para que todo o material particulado presente pudesse ser decantado naturalmente.

Após esse período, por meio de sifonação, grande parte da água pôde ser transferida para um balde, otimizando assim o processo futuro de filtração. O restante da água residuária nos galões foi filtrada em um sistema de filtração a vácuo (Figura 4) para obter a maior quantidade de água possível para a confecção das massas.

É possível notar a aparência “lamacenta” presente no béquer (Figura 4). Essa fração de água residuária corresponde à fração decantada no galão. Após o fim dessa etapa, a água filtrada foi novamente armazenada nos galões de 5L conforme a Figura 5.

**Figura 4** - Sistema de filtração a vácuo



**Fonte:** do autor.

**Figura 5** - Água residuária filtrada



**Fonte:** do autor.

## 5.2 ESTUDO DAS FORMULAÇÕES E ENSAIOS DE IMOBILIZAÇÃO

### 5.2.1 Estudo e Preparo das Formulações

Com as amostras de DUCA e de água residuária devidamente preparadas, seguiu-se a metodologia para a etapa de estudo e preparo das formulações a serem analisadas. De acordo com Goda (2020), foi determinado que a quantidade mínima de cimento, em porcentagem, para que os corpos de prova apresentassem estabilidade e integridade física para serem submetidos ao ensaio mecânico seria de 20% em relação à composição total. Entretanto, os resultados referentes ao estudo de lixiviação não foram satisfatórios devido à alta presença de urânio no extrato lixiviado. Dessa maneira, determinou-se uma quantidade mínima de 33% de cimento para as formulações propostas neste estudo, já que esse teor se mostrou efetivo para o processo de imobilização do urânio. O cimento utilizado foi o do tipo *Portland* CP II-F-32 da fabricante LafargeHolcim, devido à secagem rápida, de alta resistência e aplicabilidade vasta, segundo informações da fabricante.

Baseando-se em uma relação fixa entre DUCA e cimento para todas as formulações e variando a de água e cimento, foi possível pré-determinar as composições. É importante ressaltar que o estipulado para o uso do superplastificante *Glenium 51*, produzido pela BASF S/A, em cada uma das composições foi de 0,035 (em proporção mássica) para 1 de cimento, de acordo com a utilizada por Oliveira (2022). Dessa forma, em resumo, foram estipuladas algumas formulações em que a relação entre água residuária e cimento variava, porém a relação entre DUCA e cimento e a quantidade de defloculante eram mantidas as mesmas.

Em um primeiro momento, foram investigadas 6 diferentes composições com base nas conclusões obtidas anteriormente. Todavia, devido a ensaios preliminares e uma sequência de fatores e dificuldades encontradas, uma quantidade considerável de material foi perdida e com isso, o número de composições foi reduzido para 4. Entre as adversidades encontradas, principalmente, podem ser listadas as relacionadas à homogeneização dos componentes e à confecção dos corpos de prova, ambas em razão da falta de equipamentos. Sendo assim, após realizado o cálculo sobre a quantidade remanescente de material, foi possível estipular 4 diferentes composições, que podem ser observadas na tabela a seguir.

**Tabela 5** - Formulações propostas e respectivas proporções entre componentes

<b>Composição</b>	<b>Cimento</b>	<b>DUCA</b>	<b>Água</b>	<b>Aditivo</b>	<b>A/C</b>	<b>D/C</b>
<b>C1</b>	33,00%	19,80%	45,87%	1,16%	1,39	0,6
<b>C2</b>	34,19%	20,51%	44,11%	1,20%	1,29	0,6
<b>C3</b>	35,39%	21,23%	42,11%	1,24%	1,19	0,6
<b>C4</b>	37,95%	22,77%	37,95%	1,33%	0,99	0,6

**Fonte:** do autor.

Pela Tabela 5 é possível notar que a proporção entre DUCA e cimento (D/C) não se altera independente da composição. Pois, como citado anteriormente, de acordo com Goda (2020), a relação D/C que trouxe os resultados mais satisfatórios acerca da imobilização de urânio foi a de 0,6. Dessa maneira, todas as formulações propostas mantiveram tal relação, variando apenas a proporção de água residuária. Goda (2020) comprovou uma elevada eficiência para a filtração (em torno de 70% de acordo com a Tabela 6), além de concluir que a implantação de tal processo em larga escala seria realizável, uma vez que o reaproveitamento dessa água é uma etapa que se mostrou viável tanto no âmbito econômico, quanto no âmbito ambiental.

**Tabela 6** - Eficiência da filtração da água do coletada na saída do decantador

<b>Meio Filtrante</b>	<b>Massa de água retirada por filtração (%)</b>
<b>Papel Xarope</b>	72,85 ± 0,30
<b>Faixa Branca</b>	71,33 ± 1,31
<b>Faixa Azul</b>	70,22 ± 1,30

**Fonte:** Goda (2020).

O uso da água rica em DUCA foi pensado justamente para não fosse necessário o uso de água tratada. Portanto, pode-se notar e é válido ressaltar que todas as relações A/C são

maiores ou igual a 1,00 e isso foi determinado pensando unir o viés ambiental com o tecnológico. Uma vez que a geração de água ácida na UDC – INB Caldas é um problema crônico e devido a tal fator, pensou-se em justamente em definir uma finalidade para essa complicação, utilizando-a como componente juntamente com aditivo *Glenium*. Pensando nisso, foi proposto o emprego de um aditivo redutor de água como o último componente. Esse aditivo, também conhecido como superplastificante, tem a função de reduzir o consumo de água necessário no momento da mistura, porém mantendo a trabalhabilidade final desejada e não comprometendo a estabilidade física do material (METHA; MONTEIRO, 2008), (NEVILLE, 1997).

Com as composições e metodologia para homogeneização corrigidas e definidas, seguiu-se para o ensaio de imobilização. Para o preparo das massas, primeiramente mediu-se uma massa de 2,2kg e a partir disso aplicaram-se as devidas proporções para o restante dos componentes para cada uma das composições sugeridas anteriormente. A seguir, o cimento foi transferido para um almofariz com a finalidade de eliminar qualquer existência de material aglomerado e assim, facilitar a homogeneização.

**Figura 6** - Eliminação de cimento aglomerado



**Fonte:** do autor.

**Figura 7** - Componentes devidamente medidos para a preparação das massas



**Fonte:** do autor.

Com auxílio de um misturador de argamassa acoplado à uma furadeira, misturou-se em um balde o cimento com o DUCA, até que fosse obtido um material particulado bastante homogêneo. Em um outro balde, adicionou-se o aditivo à água e agitou-se com um bastão de vidro, adicionando o líquido à metade do material particulado, antes homogeneizado. Após submeter essa massa a agitação constante do misturador de argamassa, adicionou-se o restante do material particulado, agitando novamente com o misturador. Após um intervalo considerável, a massa foi misturada até atingir um caráter bem homogêneo, estando assim pronta para o ensaio de imobilização. A Figura 8 mostra a sequência das etapas descritas.

**Figura 8** - Sistema para homogeneização dos componentes e preparo das massas; onde a) e b) homogeneização dos materiais particulados; c) massa homogeneizada e preparada para a confecção dos corpos de prova



**Fonte:** do autor.

### 5.2.2 Ensaio de Imobilização

Após a obtenção de uma massa homogênea, a próxima etapa foi a de preparação e conformação dos corpos de prova. Em uma superfície completamente plana, forrou-se com um plástico não utilizado (com a finalidade de evitar contaminações), onde os moldes foram colocados para a confecção dos corpos de prova.

Seguindo a ABNT-NBR 5738 (2015), foram confeccionados 6 corpos de prova para cada uma das composições estipuladas. Vale ponderar que devido às perdas de material e visando uma maior variedade de dados para análise, os corpos de prova apresentaram um volume menor do que o mínimo descrito pela ABNT-NBR 5738 (2015), que é de 10cm x 20cm. Os moldes utilizados apresentaram 7,5cm de diâmetro x 15cm de altura, assim, respeitando a obrigatoriedade da razão altura/diâmetro dos corpos de prova igual a 2.

Os moldes foram cortados no sentido axial para facilitar o desmolde. Antes de iniciar o preenchimento, foram passadas fitas adesivas para evitar com que os moldes se expandissem e/ou que abrissem no momento em que fossem preenchidos com as massas. Para contribuir com uma melhor aderência da massa às paredes internas dos moldes, essas foram untadas com o óleo mineral Nujol (do fabricante Hypera), também inerte, em termos químicos, para não interferisse na composição das massas. Após a conferência de que não existia qualquer espécie de vão, os moldes foram preenchidos com a massa, com o auxílio de uma espátula de alvenaria.

Após seguir algumas metodologias para o preenchimento dos moldes, a que melhor se aplicou durante o processo, foi a de adensamento das massas com o auxílio de uma concha. Sua superfície côncava se mostrou muito efetiva na função de adensar os vazios junto às paredes internas dos moldes. Função essa que outros tipos de instrumentos como colheres e espátulas não mostraram grande efetividade. Ao serem totalmente preenchidos, os moldes foram nivelados com a espátula de alvenaria de modo com que todo o excesso de massa fosse retirado, para que não houvesse influência ou alteração nas dimensões dos corpos de prova. A Figura 9 demonstra tais etapas citadas.

**Figura 9** - Preenchimento, adensamento e moldagem dos corpos de prova; a), b) e c)

a)



b)



c)



**Fonte:** do autor.

Após a secagem do cimento e decorrido 24 horas desde a moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, transferidos para um recipiente vazio, cobertos totalmente por água e envolvidos com um saco plástico, para serem submetidos à etapa de cura submersa por um período de 14 dias. A Figura 10 traz um dos corpos de prova decorridas as 24 horas do período de moldagem. Já a Figura 11, os corpos de prova submetidos à etapa de cura submersa.

**Figura 10** - Corpo de prova desmoldado



**Fonte:** do autor.

**Figura 11** - Corpos de prova submetidos à cura submersa; a) período de cura: 1 dia e b) período de cura: 7 dias

a)



b)



**Fonte:** do autor.

### 5.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Passado o período de cura, os corpos de prova foram retirados da água com 24 horas de antecedência ao ensaio de compressão. Tal ensaio teve como finalidade a determinação da

resistência máxima à compressão, de acordo com a norma ABNT-NBR 5739 (2018). Uma vez que se pretende dispor o material em formato de pilhas, é necessário saber se suportaria os fenômenos provenientes da compressão que um agiria sob o outro.

Os corpos de prova foram levados até a sede da empresa Ouro Mix, na cidade de Andradas-MG para que fossem submetidos ao ensaio em máquina universal de ensaios modelo 1.501.220 200tf da fabricante Solotest.

A partir disso, dessa maneira, calculava-se a resistência à compressão do corpo de prova através da equação matemática a seguir:

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

Em que,

$f_c$  - Resistência à compressão, dada em mega Pascal (Mpa);

$F$  - Força no momento do rompimento, dada em newtons (N);

$D$  - Diâmetro do corpo de prova, dado em milímetros (mm).

Na Figura 12 e Figura 13 é possível observar os corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão axial e pós-ensaio, respectivamente.

**Figura 12** - Realização do ensaio de compressão; a) e b)

a)



b)



**Fonte:** do autor.

**Figura 13** - Corpo de prova após ensaio de compressão



**Fonte:** do autor.

#### 5.4 ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO

Os ensaios de lixiviação foram realizados com a finalidade de se determinar a concentração mínima de cimento *Portland* necessária para que não haja a ressolubilização dos contaminantes do rejeito imobilizado. Os ensaios seguiram de acordo com a norma ABNT-NBR 10005 (2004).

Primeiramente, deve-se atentar à granulometria necessária para que o material que seja submetido ao teste de determinação de solução extratora. As partículas estarão aptas ao ensaio se forem  $\leq 9,5\text{mm}$ . Para isso, os corpos de prova foram levados a um britador para que atingissem a granulometria solicitada. A fração retida na peneira, retornava ao britador e esse processo foi repetido até que não houvesse material retido na peneira de #50. Em seguida, homogeneizou-se o material britado através de uma pilha de homogeneização com o objetivo de retirar uma amostra o mais representativa possível.

**Figura 14** - Peneiramento do material britado



**Fonte:** do autor.

**Figura 15** - Formação da pilha de homogeneização



**Fonte:** do autor.

Com o material devidamente homogeneizado, seguiu-se para a definição da solução extratora a ser utilizada para a realização do ensaio. Duas soluções podem ser utilizadas: uma composta por ácido acético glacial e NaOH ( $\text{pH} = 4,93 \pm 0,05$ ) e outra somente por ácido acético glacial ( $\text{pH} = 2,88 \pm 0,05$ ). Para a determinação de qual solução a ser utilizada, realizou-se um teste com uma fração do material britado anteriormente. Em seguida, transferiu-se 5,0g do

material particulado para um béquer e em seguida foram adicionados 96,5mL de água deionizada. Essa mistura foi agitada vigorosamente por um agitador magnético e ao fim de 5min, teve seu pH medido. Caso o pH fosse  $\leq 5,0$ , utilizava-se a primeira solução extratora. Caso o pH fosse  $> 5,0$ , seria necessário adicionar 3,5mL de HCl 1N, homogeneizar a solução com o auxílio do agitador enquanto seria aquecida a 50°C, por 10min. Após o resfriamento da solução, mediu-se novamente o pH das soluções e se fosse  $\leq 5,0$ , utilizava-se a solução extratora nº 1 (ácido acético e NaOH), caso continuasse  $> 5,0$ , utilizava-se da solução extratora nº 2 (somente ácido acético).

Assim, foram preparadas 5 soluções, nomeadas: D, 1, 2, 3 e 4. Em que a primeira continha apenas o resíduo puro e as demais, correspondentes à numeração das composições preparadas. Pensou-se em preparar uma solução apenas com o resíduo para fins comparativos com as demais soluções e observar o quanto de urânio foi ou não lixiviado. Na primeira parte da triagem para a determinação da solução extratora, todas as soluções apresentaram pH  $> 5,0$ , dessa maneira, todas foram submetidas a uma nova análise com a adição de HCl. Após os 10min pré-determinados de agitação à 50°, o pH de cada uma das soluções novamente foi medido e todas as soluções mantiveram pH  $> 5,0$ . Dessa maneira pôde-se definir que a solução extratora a ser utilizada, seria a nº 2 (ácido acético).

**Figura 16** - Soluções preparadas para determinação de solução extratora



**Fonte:** do autor.

**Figura 17** - Medição de pH para as soluções



**Fonte:** do autor.

Definida a solução extratora, pesou-se 100g de amostra de cada uma das composições e de DUCA puro, para serem submetidos à etapa de agitação em solução extratora previamente determinada. As amostras foram transferidas para um béquer e em seguida foi adicionada uma massa da solução extratora 20x maior que a massa do resíduo e agitada com o auxílio de um bastão de vidro. Com as soluções devidamente preparadas, foram transferidas para frascos e esses, vedados com fita de PTFE (politetrafluoretileno) para evitar vazamentos. Então, os frascos foram presos corretamente ao agitador rotatório que operou por 20 horas, à uma temperatura de 25°C e rotação de  $30 \pm 2$  rpm. A Figura 19 mostra o processo de agitação das soluções.

**Figura 18** - Agitação das soluções em agitador rotatório



**Fonte:** do autor.

Passadas as 20 horas do processo de agitação, as soluções foram filtradas com o intuito de se obter o extrato lixiviado. Primeiramente, em cada uma das soluções, foram realizadas duas filtrações, ambas à vácuo, porém com diferentes meios filtrantes. A primeira, com filtro e papel e a segunda com filtro de membrana *micropore*. Os extratos lixiviados obtidos podem ser observados das imagens a seguir, assim como os processos de filtração.

**Figura 19** - Primeira filtração para obtenção do extrato lixiviado (filtro de papel)



**Fonte:** do autor.

**Figura 20** - Segunda filtração para obtenção do extrato lixiviado (*micropore*)

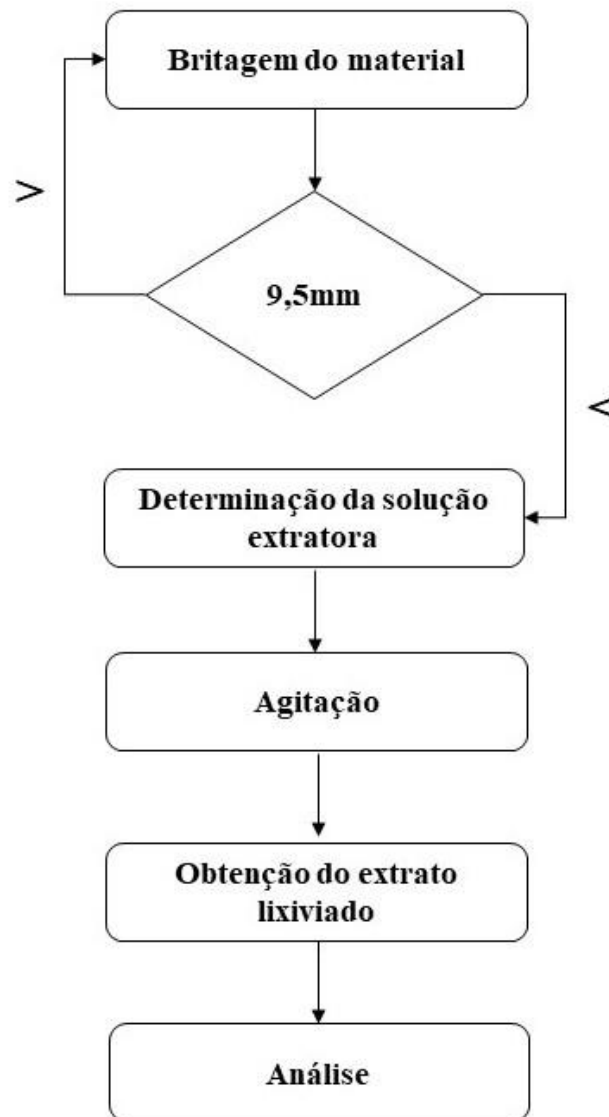


**Fonte:** do autor.

É possível notar a importância da segunda filtração quando se compara a turbidez da água nas Figuras 19 e 20. Isso faz com que o extrato lixiviado a ser analisado apresente maior confiabilidade. Essa análise tem como objetivo, averiguar a ocorrência de lixiviação do material imobilizado, mais precisamente o urânio presente no DUCA. A quantificação desse material foi realizada por ICP-MS de acordo com *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

O fluxograma a seguir ilustra todas as etapas do ensaio de lixiviação:

**Figura 21** - Fluxograma demonstrativo para o ensaio de lixiviação



**Fonte:** Adaptado de ABNT NBR 10005 (2004)

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

A tabela a seguir apresenta as massas medidas antes e após os cadinhos serem levados à estufa para secagem.

**Tabela 7** - Massas medidas pré e pós-secagem dos cadinhos para determinação do teor de umidade presente no DUCA

<b>Pré-secagem</b>		
<b>Cadinho 1 (g)</b>	<b>Cadinho 2 (g)</b>	<b>Cadinho 3 (g)</b>
34,51	34,91	35,95
<b>Pós-secagem</b>		
<b>Cadinho 1 (g)</b>	<b>Cadinho 2 (g)</b>	<b>Cadinho 3 (g)</b>
34,39	34,77	35,84

**Fonte:** do autor.

Levando em consideração as massas medidas pré e pós-secagem, foi possível estabelecer a quantidade de água presente em cada um dos sistemas, em termos de massa e percentualmente.

**Tabela 8** - Percentual de água presente em cada um dos sistemas

	<b>Cadinho 1</b>	<b>Cadinho 2</b>	<b>Cadinho 3</b>
<b>% água</b>	63,64%	61,90%	57,89%
<b>% sólidos</b>	36,36%	38,10%	42,11%

**Fonte:** do autor.

Calculando a média e o desvio padrão dos dados obtidos acima, tem-se que a porcentagem de água presente no resíduo coletado é  $61,15\% \pm 0,02$ , enquanto a porcentagem de sólidos nesse mesmo sistema é de  $38,85\% \pm 0,02$ , justificando seu caráter argiloso. Tais números servem para demonstrar a necessidade em se levar todo o DUCA retirado da cava da

mina para um processo de secagem antes de ser utilizado na preparação das massas. Devido à quantidade de água presente no resíduo, poderia haver certa dificuldade no seu processo de britagem e conseqüentemente na homogeneização dos componentes.

## 6.2 ENSAIOS DE IMOBILIZAÇÃO

Passado o tempo de cura submersa de 14 dias, pôde-se notar que independente das composições e suas respectivas relações água/cimento, todos os corpos de prova apresentaram integridades física e estrutural satisfatórias. Ressalta-se também que em alguns, foi possível perceber a presença de pequenos vazios. Tais defeitos, provavelmente, são provenientes à etapa de adensamento da massa dentro do molde. Entretanto, todos conseguiram manter sua forma durante o período de cura, corroborando que a quantidade mínima de cimento necessária seria de 20%.

## 6.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

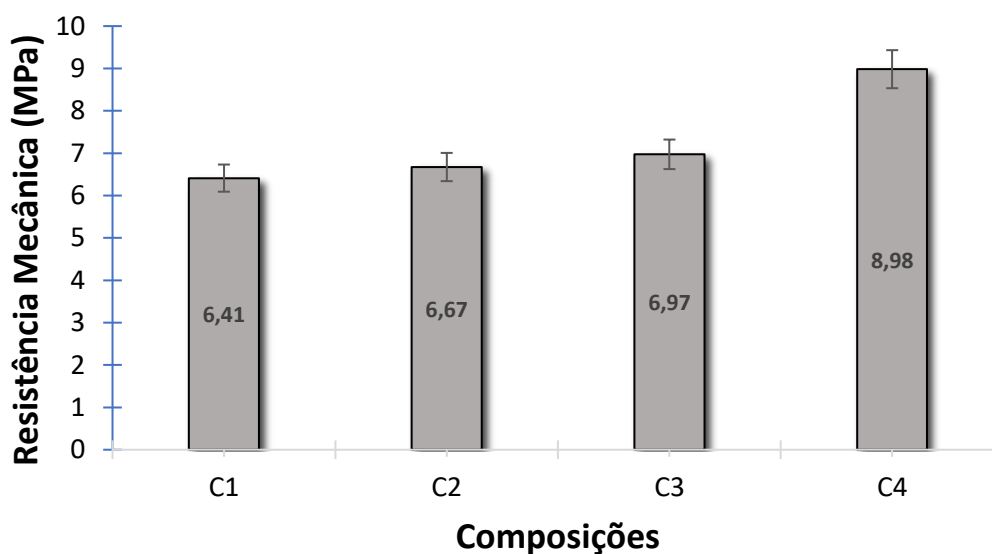
Todos os corpos de prova apresentaram boa integridade física e estrutural, podendo ser submetidos ao ensaio de compressão axial para determinar a resistência mecânica do material conformado.

A tabela a seguir traz os resultados obtidos por meio do ensaio de resistência à compressão de acordo com cada composição e suas respectivas relações água/cimento, em MPa.

**Tabela 9** - Resistência mecânica (em MPa) média das composições e seus respectivos corpos de prova

Composição	A/C	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5	CP-6	Resistência
								Média (MPa)
<b>C1</b>	1,39	6,78	6,59	5,55	6,50	6,23	6,82	6,41 ± 0,43
<b>C2</b>	1,29	6,72	6,83	6,68	6,61	6,31	6,89	6,67 ± 0,19
<b>C3</b>	1,19	7,55	7,05	6,81	6,88	6,63	6,92	6,97 ± 0,29
<b>C4</b>	0,99	8,91	10,59	8,42	8,87	8,87	8,60	8,98 ± 0,74

Fonte: do autor.

**Figura 22** - Resistência mecânica de acordo com as diferentes composições

Fonte: do autor.

A Tabela 9 apresenta as resistências à compressão de cada um dos corpos de prova, por composição, tal qual suas relações água/cimento e a suas resistências mecânicas médias. Já a Figura 22 traz a representação gráfica da resistência mecânica de cada uma das composições. Observa-se um aumento na resistência mecânica quando são comparadas as composições C1 a C4.

Sabe-se (METHA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997) que a relação de água/cimento é um dos fatores que mais influenciam nas propriedades de concretos e argamassas. Um baixo teor de água pode trazer uma heterogeneidade do corpo, pouca fluidez e baixa hidratação do cimento e a não formação das fases responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica final dos corpos. O excesso de água por sua vez pode acarretar a segregação dos componentes e na perda das propriedades devido à retração excessiva e permeabilidade. Nas composições estudadas, observa-se que a resistência mecânica aumenta à medida em que a relação água/cimento diminui, o que é esperado até que sejam atingidos certos valores, a partir dos quais tende a ocorrer uma diminuição novamente das propriedades como explicado. A utilização do defloculante de terceira geração, nesse caso, é fundamental pois a partir de seu uso é possível ter uma redução ainda maior no teor de água sem que haja o comprometimento das propriedades finais dos corpos, já que esse promove uma maior fluidez do sistema, favorecendo o adensamento e compactação dos corpos, diminuindo a porosidade e permeabilidade sem a necessidade de elevados teores de água.

Realizando um comparativo entre a composição C4 deste trabalho e a composição C6 proposta por Goda (2020), podem ser feitas algumas observações, visto que ambas possuem a mesma relação água/cimento (0,99) e DUCA/cimento (0,60). A resistência à compressão obtida pelo autor para a sua composição C6 foi de  $9,39 \pm 0,85$ MPa, enquanto a resistência apresentada pela composição C4 deste presente trabalho foi de  $8,98 \pm 0,74$ MPa. Importante ressaltar que ocorreram divergências, principalmente se tratando do modo e período de cura entre os dois trabalhos. Uma vez que neste, os corpos de prova foram submetidos a um tempo de 14 dias de cura submersa, enquanto Goda (2020) submeteu os corpos de prova a um período de 28 dias de cura ao ar livre. Levando em consideração que ambos estudos trabalharam com o cimento *Portland CP II* e com o mesmo resíduo, os resultados para essas duas composições em particular, podem ser consideradas semelhantes. Válido pontuar que essa situação também se repete entre a composição C5, proposta por Goda (2020), que apresentou uma resistência média de  $7,50 \pm 0,59$ MPa e a composição C1 deste estudo, que apresentou resistência média de  $6,41 \pm 0,43$ MPa.

Discorrendo ainda sobre os diferentes processos de cura adotados e suas conclusões, devem ser salientados alguns pontos. O primeiro ponto está relacionado ao tipo de cura. O intuito da cura submersa é fazer com que o concreto não perca água para o ambiente, mantendo-se saturado e assim preservando suas propriedades mecânicas. Por outro lado, vários autores

relacionam a resistência mecânica diretamente com o tempo de cura. Alguns pontuam que o concreto em cura submersa apresenta melhores resultados para resistência mecânica quando comparado com outro submetido à cura ao ar livre, pelo mesmo tempo. Porém, independentemente do tipo de cura, quanto maior o período de decorrência para esse processo, maior a resistência à compressão apresentada (BATTAGIN, 2002; NASCIMENTO *et al*, 2009).

Ainda comparando as duas composições, desconsiderando o fator “homogeneização”, um elemento que deve ser considerado para que as resistências sejam semelhantes, é o uso do aditivo superplastificante. O emprego desse componente implica diretamente em um aumento da resistência mecânica e trabalhabilidade do concreto, com isso, demandando uma quantidade relativamente menor de água para incorporação da massa. Em outras palavras, o superplastificante implica ao concreto um melhor desempenho em termos mecânicos, sem necessitar de grandes frações de água. Então, é possível dizer que a aplicação do *Glenium 51* às composições favoreceu um resultado satisfatório para o propósito deste trabalho, como já discutido (HARTMANN; HELENE, 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Por fim, é relevante levantar a hipótese de que caso a composição C4 fosse submetida a um período de cura de 28 dias, possivelmente poderia apresentar um resultado de resistência à compressão mais satisfatório que a C6 de Goda (2020). Levando em consideração a cura submersa e o emprego do aditivo superplastificante.

A composição que apresentou melhor resultado para resistência mecânica, foi a C4. O valor obtido por ela representa 28,1% da resistência descrita pelo fabricante (32MPa). Devido o material agregado apresentar um caráter friável e aspecto de pó, leva-se em consideração que ele não tenha contribuído para a resistência mecânica do material (negativamente ou positivamente). Porém, independente desse fator, esperava-se uma resistência à compressão maior do que foram apresentadas neste trabalho. A norma CNEN NN 6.09 (1990), que trata sobre os critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos, diz que materiais cimentados utilizados para fins de disposição de resíduos, devem apresentar resistência à compressão igual ou superior à 10MPa (após 28 dias de cura). Com base nessa norma e na metodologia adotada para este trabalho, nenhuma das composições aqui apresentadas estaria de acordo para tal finalidade. Porém, é pertinente enfatizar que resultados mais satisfatórios poderiam ter sido obtidos, talvez, com o uso de equipamentos apropriados, principalmente para as etapas de homogeneização e preparo das massas e conformação dos corpos de prova. Além

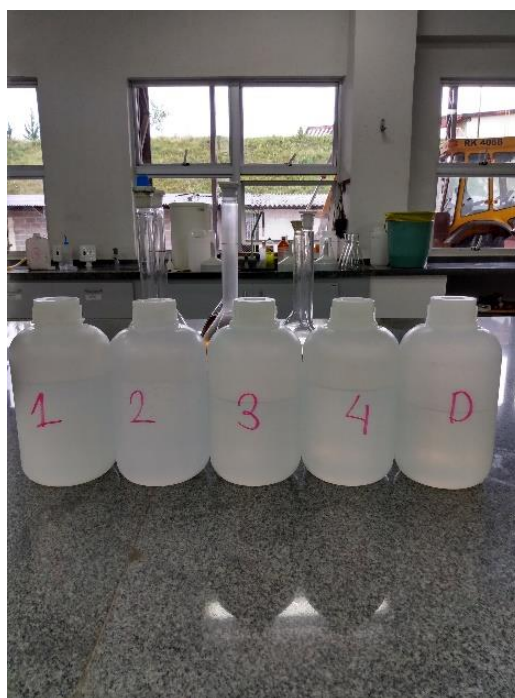
disso, os corpos de prova apresentaram dimensões menores do que o padrão ditado, fator que poderia interferir nos resultados

Mas levando em consideração o objetivo principal desta etapa da metodologia, que seria dispor o material confeccionado em formato de pilhas e considerando a composição C4 para tal função (visto que foi a que apresentou melhores resultados de resistência à compressão), foi possível calcular a quantidade necessária de corpos de prova para que fosse construída uma pilha. Com base nas dimensões dos corpos de prova, resistência e massa médias, conseqüentemente foi possível obter o peso médio dos corpos de prova dessa composição (9,02N), tal qual a força máxima a que poderiam ser submetidos *in loco* (39,67kN). A partir de todos esses dados, concluiu-se então que uma pilha de 4396 corpos de prova e 659m de altura, poderia ser montada sem que afetasse a estrutura dos materiais (APÊNDICE D).

#### 6.4 ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO

A Figura 24 apresenta as amostras devidamente lacradas e aptas à quantificação.

**Figura 23** - Extratos lixiviados preparados para análise por ICP-MS



**Fonte:** do autor.

Os frascos foram fechados e nomeados de acordo com o número da composição e DUCA puro. Nota-se que o extrato não apresenta turbidez, isso devido à filtração à vácuo, realizada primeiramente com filtro de papel e em seguida com filtro *micropore*. Esse é um fator positivo, pois demonstra que não existe a presença de material particulado que poderia implicar em uma possível influência na análise. A Tabela 10 mostra os resultados de todos os extratos lixiviados.

**Tabela 10** - Quantidade de urânio presente nos extratos lixiviados

Amostra	A/C	Quantificação de Urânio (mg/L)	Nº de Preparações
C1	1,39	$0,0127 \pm 0,0016$	6
C2	1,29	$0,0358 \pm 0,0028$	6
C3	1,19	$0,1307 \pm 0,0096$	6
C4	0,99	$0,472 \pm 0,029$	6
D	-	$5,33 \pm 0,33$	6

**Fonte:** do autor.

6 preparações foram realizadas para cada uma das amostras analisadas, a fim de se obter uma maior representatividade. Ao observar a tabela, é possível observar uma alta concentração de urânio no extrato, resultando em uma grande discrepância quando comparada com as demais concentrações. Percebe-se também uma relação inversamente proporcional à encontrada para os resultados de compressão. Os resultados para os ensaios mecânicos mostraram que quanto menor é a relação água/cimento, maior era a resistência à compressão. Por sua vez, os resultados para lixiviação mostram que quanto maior a relação água/cimento, menor a quantidade de urânio mobilizada.

Comparando composições C1 deste estudo com a C5 de Goda (2020) (que possuem a mesma relação água/cimento), é possível dizer, de certa maneira que os resultados para lixiviação também foram semelhantes. Uma vez que a primeira apresentou uma quantidade de urânio de  $0,0127 \pm 0,0016\text{mg/L}$  (melhor resultado entre as amostras) enquanto a segunda apresentou  $<0,1\text{mg/L}$ , sendo também o melhor resultado. Segundo o autor, o resultado foi obtido nessa maneira porque a concentração de urânio foi menor que a do limite de detecção

do equipamento utilizado. Então, realizando um comparativo entre os dois estudos, é possível afirmar que uma imobilização satisfatória do resíduo se dá a partir de uma relação DUCA/cimento de 0,60. Tais resultados também servem para demonstram que o uso de aditivo superplastificante nas composições, não influenciou nos resultados para a lixiviação.

Se tratando das condições e padrões para lançamento de efluentes, a resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) 430, de 2011, diz que efluentes não podem atribuir ao corpo receptor quaisquer características que possam alterar a qualidade da água. Existem quantidades parametrizadas para alguns elementos como arsênio, chumbo, estanho, selênio, além de compostos químicos. Cada uma dessas substâncias listadas possui um valor máximo (em mg/L) que pode ser lançado em um corpo de água de uma maneira que não altere sua qualidade. As substâncias e elementos que não estão nessa relação, devem seguir os limites de qualidade de acordo com a classe em que o corpo receptor se enquadre. Analisando a lista de substâncias e elementos parametrizadas, notou-se a ausência do elemento urânio, dessa maneira, levou-se em consideração o padrão de qualidade do corpo d'água. O corpo receptor em questão é a Bacia de Águas Claras – Ribeirão das Antas, que é classificado como “corpo receptor de água doce Classe II”, o que implica em um valor máximo de urânio permitido de até 0,02mg/L (GODA, 2020).

Levando em consideração o limite permitido de acordo com a resolução 430 do CONAMA e a quantidade de urânio lixiviado em cada uma das soluções, foi possível estabelecer algumas relações colocando esses fatores um em razão do outro. Por exemplo, a concentração de urânio no extrato lixiviado que continha apenas DUCA é de 267 vezes maior do que o limite permitido para um corpo receptor de água doce Classe II. Os extratos das composições C2, C3 e C4 apresentaram uma concentração de, aproximadamente, 2, 7 e 24 vezes maior do que o estabelecido, respectivamente. Por fim, o extrato da composição C1 apresentou uma quantidade de urânio de quase metade do limite permitido, trazendo assim um resultado satisfatório para o objetivo desta etapa da metodologia.

## 7 ANÁLISE DE VIABILIDADE DE CUSTO

Caso a solução apresentada neste estudo fosse aplicada, seria necessário um cálculo da quantidade acerca da quantidade de material utilizada e conseqüentemente, da viabilidade econômica para a execução do projeto. Pensando nisso, alguns valores foram levantados com base em alguns dados coletados. Lima (2014) traz a informação de que no ano de 2014, aproximadamente 67000 toneladas de DUCA se encontravam na cava da mina da UDC – INB CALDAS. Também, por informações da própria que anualmente são transferidas cerca de 13 toneladas para esse mesmo local. De acordo com Goda (2020), a concentração de  $U_3O_3$  é de 0,328%, resultando em uma quantidade de 3,96 mil toneladas de DUCA (em base seca) depositada anualmente. Com base nesses dados foi possível estimar que a quantidade de DUCA depositada na cava da mina até o ano de 2022, aproxima-se do montante de 102,67 mil toneladas (APÊNDICE A).

Consultando o banco de dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção, registrou-se que o valor médio praticado no Brasil no ano de 2022 para um saco de 50kg de cimento *Portland CP-II* foi de R\$ 33,35. Valor esse que quando convertido para tonelada, chega à R\$ 667,00. Uma vez que apenas uma relação DUCA/cimento foi determinada foi utilizada (0,60) e que anteriormente estimou-se o valor referente para a quantidade de DUCA presente na cava da mina, logo torna-se possível também estimar a quantidade total de cimento necessária para a imobilização de todo o resíduo, concomitantemente com o custo acerca da quantidade de material. Os valores encontrados respectivamente para quantidade e custo total de cimento foram de 171,11 mil toneladas e R\$ 114.1135.630,30. Sabendo-se também que anualmente, cerca 3,96 mil toneladas de DUCA são depositadas da cava da mina e que a relação entre DUCA/cimento é 0,6, é possível assim, calcular a quantidade anual necessária de cimento, assim como seu custo. Os valores calculados foram de 6,61 mil toneladas de cimento/ano e R\$ 4.405.995,93/ano. Dependendo de outras variáveis (além da quantidade de resíduo a ser imobilizado), tais como: local para disposição dos corpos de prova e possivelmente transporte desses materiais, os valores finais podem acabar se mostrando inviáveis do ponto de vista econômico.

## 8 CONCLUSÕES

Partindo do interesse em utilizar a água da saída do decantador como componente para as composições e na viabilidade de filtração tratada em estudos anteriores, tal etapa foi realizada neste estudo, a qual foi corroborada. Sendo assim, se mostrando efetiva e de fato, viável, o que possibilitou o emprego dessa água formulações propostas.

A determinação da quantidade do teor de umidade do resíduo coletado no interior da cava da mina retornou valores de  $61,15\% \pm 0,02$  para quantidade de água e conseqüentemente,  $38,85\% \pm 0,02$  de sólidos. A quantidade predominante de água no resíduo explica o caráter “argiloso” apresentado por ele, além de justificar o processo de secagem em estufa até que toda água seja liberada. Caso contrário, o processo de britagem e conseqüentemente de homogeneização apresentariam grandes dificuldades.

Devido às dificuldades e obstáculos encontrados para a homogeneização e imobilização do resíduo em massa cimentícia, grande parte do material foi perdida nas tentativas para se determinar a melhor metodologia para tais etapas. Com isso, 4 formulações foram estipuladas e preparadas para serem analisadas.

Foi possível notar que quanto menor a relação água/cimento, maior era a resistência mecânica apresentada pela composição. A composição C4 foi a que apresentou melhor resistência à compressão:  $8,98 \pm 0,74\text{MPa}$ . Apesar de tal valor não ser condizente com o que dita a norma CNEN NN 6.09, acredita-se que, caso o tempo de cura fosse de 28 dias, essa composição poderia apresentar o valor determinado pela norma.

No que diz respeito a lixiviação, a composição C1 obteve um resultado bastante satisfatório. Uma vez que a resolução CONAMA 430 delimita que o limite para o corpo d’água receptor Classe – II seja  $0,02\text{mg/L}$  e tal composição apresentou  $0,0127 \pm 0,0016\text{mg/L}$ . Outras composições de outros estudos que possuem a mesma relação A/C também apresentaram resultados positivos acerca da quantidade de urânio lixiviada. Apesar da composição C1 ter atingido o objetivo deste trabalho, ela foi a que menor apresentou resistência à compressão. Entretanto, acredita-se que a resistência mecânica de todas as formulações propostas poderia ser maior caso não houvessem dificuldades, principalmente, na etapa de homogeneização e preparo das massas. Etapas essas, de suma importância para um resultado satisfatório.

Se tratando de viabilidade econômica, primeiramente estimou-se que exista certa de 102,67 mil toneladas de DUCA depositadas na cava da mina. Levando em consideração esse valor estimado juntamente com a relação D/C, calculou-se que seria necessário, para o tratamento, um investimento total de R\$ 114.135.630,30 e anual de R\$ 4.405.995,93.

Por fim, o trabalho conseguiu comprovar que a imobilização do resíduo pode ser realizada em matriz de cimento *Portland CP-II*. Válido também ressaltar que a utilização da água residuária proveniente da saída do decantador, não influenciou nos resultados de lixiviação, apontando assim, uma saída para o problema crônico presente na UDC-INB Caldas que é o aumento gradativo da lagoa de água ácida. Portanto, apesar do objetivo principal ter sido atingido, acredita-se que executando uma metodologia de homogeneização livre de obstáculos, submetendo os corpos de prova a um período de cura submersa de 28 dias, juntamente com o uso devido do superplastificante *Glenium*, crê-se que outras formulações podem ser preparadas em cima dos mesmos parâmetros com a finalidade de se obter resultados mais satisfatórios.

## 9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto às conclusões obtidas acerca do assunto abordado neste trabalho, considera-se necessário o desenvolvimento de estudos posteriores. A seguir, estão listados alguns temas que podem servir para foco de pesquisas, visando a otimização da metodologia proposta para o tratamento e/ou destinação do resíduo:

- Análise da disposição do material em pilhas formada por blocos;
- Análise estrutural e microscópica do material com o resíduo imobilizado;
- Ensaaios de tração e flexão do material;
- Análise de imobilização do resíduo ao longo do tempo;
- Avaliação radiológica visando aplicação estrutural do material.

## REFERÊNCIAS

ABREU, A. T.; FARIA, E. M.; GUIMARÃES, J. A. C.; LEITE, A. L.; LENA, J. C. Avaliação em laboratório do uso de sistemas de coberturas alcalinas para prevenção da drenagem ácida de mina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 36, n. 3, p. 787-802, jun. 2012. FapUNIFESP. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000300010>.

AKCIL, A.; KOLDAS, S. **Acide Mine Drainage (AMD): Causes, treatment, and case studies**. J. Cleaner Produc., 14:1139- 1145, 2006.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. (APHA). **Standard Methods for the examination for water and wastewater**. 22th ed. New York, 2012

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

BATTAGIN, A.F; CURTI, R.; SILVA, C. O; MUNHOZ, F. A. C. Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho. **44º Congresso Brasileiro do Concreto**. Belo Horizonte, IBRACON, 2002.

BREDEHOEFT, J. D.; ENGLAND, A. W.; STEWART, D. B.; TRASK, N. J.; WINODGRAD, I. J. 1978. Geologic disposal of high-level radioactive wastes - Earth-Science perspectives. **U.S. Geological Survey Circular**, 1978, 779: 1-15.

BERTOLI, R. F.; CAPUTO, N; SGORLON, J. G; GOMES, M. C. S.; MENEZES, M. L. Estudo da solidificação/estabilização de um resíduo sólido industrial em matrizes de cimento: avaliação da lixiviabilidade e solubilidade de contaminantes. **Anais do congresso brasileiro de engenharia química em iniciação científica – COBEQ IC 2015**, [s.l.], v. 1, n. 3, p.327-345, jun. 2015. Editora Edgard Blücher. <http://dx.doi.org/10.5151/chemeng-cobeqic2015-318-33914-265881>.

BLOWES, D. W.; PTACEK, J.; LAMBOR, J. L.; WEISNER, C. G. The geochemistry of acid mine drainage. In: Holland, H.D. & Turekian, K.K., eds. **Treatise on geochemistry**. Amsterdam, Elsevier B.V., 2003. v.9. p.149-204

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **NN 6.09**: Critérios de aceitação para deposição final de rejeitos de baixo e médio níveis de atividade. Rio de Janeiro: Diário Oficial da União, 1990. 14 p.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **NN 8.01**: Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. Rio de Janeiro. 2014

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). National Report of Brazil 2008. **Third review meeting of the joint convention on safety fuel management and on safety of radioactive waste management**, Rio de Janeiro, 2008. 136 p.

CONNER, J. R.; HOFFNER, S. L. The History of Stabilization/Solidification Technology. **Critical Reviews In Environmental Science And Technology**, [s.l.], v. 28, n. 4, p. 325-396, out. 1998. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10643389891254241>.

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Aspectos da natureza da ciência e do trabalho científico no período inicial de desenvolvimento da radioatividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 33, n. 3, p. 3601 – 3601-11, 05 out. 2011.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

EVANGELOU, V. P. **Pyrite Oxidation and Its Control**: Solution Chemistry, Surface Chemistry, Acid Mine Drainage (AMD), Molecular Oxidation Mechanisms, Microbial Role, Kinetics, Control, Ameliorates and Limitations, Microencapsulation. Editorial Press CRC. New York, 1995.

FONSECA, M. R. M. **Completamente Química: Físico-Química**. São Paulo: FTD, 2001.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração. Ano base 2017. Belo Horizonte, 2018

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C. Remediação de Drenagem Ácida de Mina Usando Zeólitas Sintetizadas a Partir de Cinzas Leves de Carvão. **Revista Química Nova**. v. 29 (4), p. 735740, 2006.

FUSCO, P.B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. São Paulo: Editora PINI, 2008.

GALVÃO, J. C. A. **Estudo das propriedades dos concretos confeccionados com cimento CP V – ARI e CP II – F 32, sob diferentes temperaturas de mistura e métodos de cura**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

GODA, R. T. **Imobilização física de resíduo proveniente do tratamento de águas ácidas de uma instalação de mineração de urânio**. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2020.

GOMES, A. F. S. **Avaliação do potencial poluidor de lamas radioativas como subsídio para ações futuras de mitigação**. 2009. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologias das Radiações, Minerais e Materiais) - Comissão Nacional de Energia Nuclear - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2009.

GUZELLA, M. F. R. **Desenvolvimento de processo para imobilização de rejeitos de usinas nucleares utilizando betumes nacionais**. 2010. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

HABASHI, F. **A textbook of hydrometallurgy**. Metallurgie extractive. Quebec, 1993.

HARTMANN, C. T. HELENE, P. R. L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilato destinado a concretos de cimento Portland**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2003

HEILBRON, P. F. L.; SILVA, C.; ALVES, R. N.; GUERRERO, J. S. P.; XAVIER, A. M.; HEILBRON, M. C. P. L.; VALERIANO, C. M. Geological Disposal of Radioactive Wastes: geological formations and guidelines in the context of the brazilian nuclear program: Geological Formations and Guidelines in the Context of the Brazilian Nuclear Program. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [s.l.], v. 42, n. 3, p. 339-360, 30 set. 2019. Instituto de Geociências - UFRJ. [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_3\\_339\\_360](http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_339_360).

HERMANN, E.; KUNZE, C.; GATZWEILER, R.; G. KIEßIG; DAVIDOVIT, J. **Solidification of various radioactive waste in geopolymer and long-term stability**. In: GÉOPOLYMÈRE

'99 INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., 1999, Saint-Quentin. Proceedings. [s.i.]: Geopolymer Institute, 1999. p. 01-15.

IBRAM (Brasília). A indústria da mineração para o desenvolvimento do Brasil e a promoção da qualidade de vida do brasileiro. Brasília: IBRAM, 2014. 73 p. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005649.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2020.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **Como é o processo de geração de energia elétrica por uma usina nuclear?**. Disponível em: <http://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/como-e-o-processo-de-geracao-de-energia-eletrica-por-fonte-nuclear?Origem=1068>. Acesso em: 19 maio 2021.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **SAFETY STANDARDS SERIES N° GSG-1: Classification of Radioactive Waste: General Safety Guides**. Viena, 2009. 48 p.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **SAFETY STANDARDS SERIES N° SSR-5: Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements**. 2011. 83 p.

LIMA, P. **Recuperação de urânio e de terras raras do resíduo gerado no tratamento de águas ácidas**. 2014. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) — Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG.

MARTINI, R. J.; CAETANO, T. R.; SANTOS, H. A.; ARANHA, P. R. A. Deposição de rejeitos de minério de ferro em reservatórios: uma aplicação do método gpr.: uma aplicação do método GPR. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s.l.], v. 11, n. 4, p. 878, 25 out. 2016. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1831>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracoon, 2008. 674 p.

MERRIT, R. C. **The Extractive Metallurgy of Uranium**. Colorado School of Mines Research Institute, United States Atomic Energy Commission, 1971.

MYLONA, E.; XENIDIS A.; PASPALIARIS, I. **Inhibition of acid generation from sulphidic wastes by the addition of small amounts of limestone**. *Miner. Eng.*, 13:1161-1175, 2000.

NASCIMENTO, J. W. B. do; MACIEL, K. R. D.; SILVA, V. R. da; LOPES, F. F. de M.; LOPES NETO, J. P. Blocos de concreto para construção modular de silos cilíndricos. **Revista**

**Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 13, n., p. 991-998, dez. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662009000700023>.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

NÓBREGA, F. A.; LIMA, H. M.; LEITE, A. L. Análise de múltiplas variáveis no fechamento de mina – Estudo de caso da pilha de estéril BF-4, Mina Osamu Utsumi, INB Caldas, Minas Gerais. **Mineração**, v.61, p. 197-202, 2008.

OHLWEILER, O. A. **Química Inorgânica**. Edgard Blucher LTDA, 1973.

OLIVEIRA, I. R. B. **Materiais compósitos à base de cimento com adições de vidro cominuído como agregado fino para aplicação da construção civil**. 108. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas, 2022.

OLIVEIRA-FILHO, E. C.; MUNIZ, D. H. F. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da Saúde**, [s.l.], v. 4, n. 1, p. 83-100, 29 abr. 2008. Centro de Ensino Unificado de Brasília. <http://dx.doi.org/10.5102/ucs.v4i1.24>.

RITCHIE, A. I. M. Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport. **MAC Short Course Handbook**, v. 22, p. 201-246, 1994.

ROXBURGH, I. S. **Geology of High-Level Nuclear Waste Disposal: an introduction**. Nova Iorque: Chapman and Hall, 1987. 299 p.

SANTOS, J. M. E. **Análise quantitativa dos rejeitos radioativos a serem gerados no programa nuclear brasileiro**. 1979. 259 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Energia Nuclear) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.

SANTOS, E. A.; LADEIRA, A. C. Q. Remoção e Concentração de Urânio de Rejeito de Mina. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 15, n. 1, p. 34-41, jun. 2011.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SILVA, G. P.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M.; BARROS, N. F. Caracterização Química, Física e Mineralógica de Estéreis e Rejeito da Mineração de Ferro da Mina de Alegria, Mariana - MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 1, p. 45-52, jan. 2006.

SILVA, M. A. R. **Solidificação e estabilização de resíduos inorgânicos industriais**: estudo de eficiência do processo e evidência de mecanismos de imobilização. 2007. 107 f. Tese (Doutorado em Química) - Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SNYDER, C. H. **The Extraordinary Chemistry of Ordinary Things**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997. 656 p.

SOUZA, V. P.; BORMA, L. D. S.; MENDONÇA, R. M. G. **Projeto de Coberturas Secas para Controle da Drenagem Ácida em Depósitos Geradores de Acidez**. Em: SEMINÁRIO BRASIL - CANADÁ DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS MINERADAS, 2003, Florianópolis. Rio de Janeiro: CETEM, 2003. p. 253-271.

VIDAL, F. V.; CASTRO, N. F.; FRASCÁ, M. H. B. O. **Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

XAVIER, A. M.; LIMA, A. G. de; VIGNA, C. R. M.; VERBI, F. M.; BORTOLETO, G.; GORAIEB, K.; COLLINS, C. H.; BUENO, M. I. M. S. **Marcos da História da Radioatividade e Tendências Atuais**. *Química Nova*, Campinas, v. 30, n. 1, p. 83-91, 30 ago. 2006.

YOUSUF, M.; MOLLAH, A.; VEMPATI, RAJAN, K.; LIN, T.; COCKE, David L. The interfacial chemistry of solidification/stabilization of metals in cement and pozzolanic material systems. *Waste Management*, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 137-148, jan. 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0956-053x\(95\)00013-p](http://dx.doi.org/10.1016/0956-053x(95)00013-p).

**APÊNDICE A – Cálculo do resíduo gerado anualmente na UDC-INB Caldas**

De acordo com dados da própria UDC-INB Caldas e Goda (2020), aproximadamente 3963,41 toneladas por ano são depositadas na cava da mina. Ainda com projeções do mesmo autor, no ano de 2019, havia um montante de cerca de 90780,49 toneladas de resíduo em base seca. Com base nessas relações e cálculos, podem-se estimar os dados para o ano de 2022:

$$DUCA_{2019} = 90.780,49t$$

$$DUCA_{2022} = 90.780,49 + (3 * 3.963,41)$$

$$DUCA_{2022} = 102.670,73t$$

**APÊNDICE B – Quantidade de cimento necessária**

Levando em conta que a relação entre cimento e DUCA determinada foi a mesma para todas as composições estipuladas (0,60) e que anteriormente estimou-se o valor referente para a quantidade de DUCA presente na cava da mina, logo torna-se possível também estimar a quantidade total de cimento necessária para a imobilização de todo o resíduo:

$$Qtd. total de cimento = \frac{102.670,73t}{0,60}$$

$$Qtd. total de cimento = 171.117,9t$$

### APÊNDICE C – Cálculo do custo estimado

Levando em consideração o valor médio de R\$ 33,35 para um saco de 50kg de cimento no ano de 2022, foi possível calcular o custo total estimado com esse material:

$$\text{Custo de cimento} = \left( \frac{R\$ 33,35}{50} \right) * 1000$$

$$\text{Custo de cimento} = R\$ 667,00/t$$

$$\text{Custo de cimento total} = R\$ 667,00/t * 171.117,9t$$

$$\text{Custo de cimento total} = R\$ 114.135.630,30$$

Entretanto, tendo em vista que a geração anual de DUCA é de ordem de 3693,51 toneladas e utilizando a relação de 0,60 para DUCA/cimento, é possível, então, estimar a quantidade e custo anuais para o cimento.

$$\text{Qtd. de cimento anual} = \frac{3936,41}{0,60} = 6605,69t/\text{ano}$$

$$\text{Custo de cimento anual} = 6605,69 * R\$33,35 = R\$ 4.405.995,93$$

### APÊNDICE D – Projeção da pilha de corpos de prova

A tabela a seguir apresenta os valores em massa (em g) dos corpos de prova, para cada uma das composições, assim como as médias e a força peso (em N) referentes à tal grandeza:

**Tabela 11** - Massas dos corpos de prova para cada uma das composições propostas

<b>Amostra</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
<b>1</b>	727	785	807	918
<b>2</b>	719	776	798	921
<b>3</b>	717	775	796	938
<b>4</b>	719	777	798	921
<b>5</b>	724	782	804	921
<b>6</b>	723	780	802	902
<b>Média (kg)</b>	721,48	779,19	800,84	919,97
<b>Força Peso (N)</b>	7,08	7,64	7,86	9,02

**Fonte:** do autor.

Com base nesses valores, nos dados obtidos para resistência mecânica e dimensões dos corpos de prova, utilizou-se da equação a seguir para a determinação da força  $F$  média (em N) responsável por romper cada uma das composições:

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2}$$

Determinada a força  $F$ , dividiu-se pela força peso média obtida por meio da média das massas e com isso, foi possível obter o número necessário de corpos de prova para atingir tal solicitação. Tendo esse valor e a altura do corpo de prova (15cm), possibilita o cálculo da altura estimada da pilha projetada. A tabela a seguir apresenta todos os valores encontrados com base nesses cálculos.

**Tabela 12** - Resistência, força peso, nº de CP's e altura estimada das pilhas

<b>Composição</b>	<b>Resistência (Mpa)</b>	<b>Força Peso (kN)</b>	<b>Nº de Corpos de Prova</b>	<b>Altura estimada (m)</b>
<b>C1</b>	6,41 ± 0,43	28,32	4001	600
<b>C2</b>	6,67 ± 0,19	29,47	3855	578
<b>C3</b>	6,97 ± 0,29	30,79	3920	588
<b>C4</b>	8,98 ± 0,74	39,67	4396	659

**Fonte:** Do autor.